



## KARAYOLLARINDA ÜSTYAPI TİPİNİN KARBON AYAK İZİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Emre ALTINÖZ\*, Serdal TERZİ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler Öz

*Karbon Ayak İzi,  
Karbon dioksit,  
Birincil Ayak İzi,  
Asfalt Yol,  
Beton Yol.*

Çalışmada daha yaşanılabilir bir dünyaya katkı sağlamak üzere etkisi büyük olan ulaşım etkeni içerisinde esnek ve rijit üstyapıların karbon ayak izi takibi yapılmıştır. Esnek ve rijit yol uygulamalarının tüm yaşam döngüsü süresindeki çevresel etki ISO 10440 ve ISO 14044 standart metotları ile karbon ayak izi takibi yapılmıştır. IPCC Metodolojisi kullanılarak teorik hesaplamalar yapılmıştır. Avrupa Bitüm Birliği, ASMÜD (Asfalt müteahhitleri Birliği Derneği) ve Avrupa Beton Birliği Ölçüm Kombinasyonları yöntemine göre birincil ve ikincil karbon ayak izi takibi yapılarak esnek ve rijit üstyapıların karşılaştırılması incelenmiştir. Asfalt ve rijit yol yapımı süresince harcanan ve geri kazanım CO<sub>2</sub> şeması ve tabloları düzenlenmiştir. Sonuçlar Highways Agency Karbon hesaplama aracı tablosu halinde listelenmiştir. Yapılan karşılaştırmada asfalt yolların yapımı ve 1'inci yılsonunda çimento betonu yola oranla daha az karbon salınımı olduğu tespit edilmiştir. Ancak %2,35'lik yakıt tasarrufundan kaynaklı beton yolda asfalt yola oranla her yıl 5,8 ton CO<sub>2</sub> daha az salınım meydana gelmiştir. Elde edilen ölçümler ve araştırmalar ışığında, karbon salınımı ve karbon alınımı (geri kazanım) dikkate alındığında çıkardığımız teorik sonucu da uygun olarak %2,35'lik yakıt tasarrufu, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) azalması beton yolu daha sürdürülebilir yol olduğunu göstermiştir.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CARBON FOOTPRINT ON THE PAVEMENT TYPE OF HIGHWAY

### Keywords

*Carbon Footprint,  
Carbon Dioxide,  
Primary Footprint,  
Paved Roads,  
Concrete Roads.*

### Abstract

In this study, the carbon footprint of flexible and rigid pavements has been monitored to contribute to a liveable world. The environmental impact of flexible and rigid road pavements' carbon footprint throughout the entire life cycle has been monitored in accordance with the standard methods ISO 10440 and ISO 14044. Afterwards, theoretical calculations have been made using IPCC method. The primary and secondary carbon footprints for flexible and rigid pavements have been obtained using European Bitumen Association, European Union Asphalt Contractors Association and European Concrete Union Measurement Combinations methods and compared each other. Produced CO<sub>2</sub> by construction phase and recovered CO<sub>2</sub> afterwards, of the flexible and rigid pavements, have been listed in tables and the results are demonstrated in the Highways Agency Carbon calculation tool. As a result, flexible roads have less carbon footprint at the end of the first year after the construction. However, because of the fuel saving ratio of 2.35%, less than 5,8 tons of CO<sub>2</sub> has been released each year compared to the flexible pavements. Consequently, when both, carbon emission and recovery, and 2.35% fuel saving rate are taken into consideration, the rigid pavement is a better and sustainable choice.

### Alıntı / Cite

Altınöz, E., Terzi, S., (2020). Karayollarında Üstyapı Tipinin Karbon Ayak İzi Etkisinin Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(2), 451-459.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Altınöz, 0000-0003-1007-7426  
S. Terzi, 0000-0002-4776-824X

### Makale Süreci / Article Process

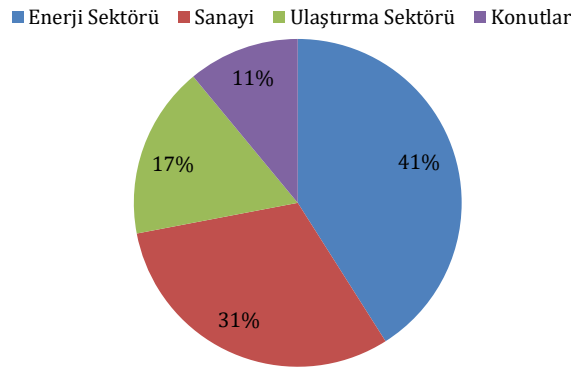
<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	31.05.2019
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	09.06.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	13.06.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.06.2020

\* İlgili yazar / Corresponding author: emre-altinoz@outlook.com , +90-246-211-1226

## 1. Giriş (Introduction)

İklim sistemi, dünya üzerinde yaklaşık olarak 4.5 milyar yıllık jeolojik tarihi süresince, milyonlarca yıldan on yıllara kadar tüm zaman diliminde değişme eğilimi içerisinde girmiştir. Küresel sıcaklıkların ortalama sıcaklıklar içerisinde olan 10.000 yıldaki herhangi bir yüzyılda 10°C'den daha fazla değişmesi olasılığı görülmeyeceği düşünülmektedir. Kısa adı NASA olan Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi, 1800'den günümüze kadar en sıcak yılın 2005 olup, onu 1998'in izlediğini belirtmiştir (Pekin, 2006).

Bu yıllarda küresel sıcaklıkların artmasında önemli etken olan dünyadaki sera gazlarının artması ile birlikte doğru orantılı olduğu belirtilmiştir. Sera gazlarının artması ile birlikte küresel sıcaklıklarda yükselişe sebep olduğu gibi iklim sisteminde de değiştirmiştir (Alexander vd., 2009). Haines vd. (2006), Özellikle ulaştırma sektöründeki fosil yakıtların yanmasından ortaya çıkan, küresel ısınmaya etki eden sera gazları içerisinde önemi büyük olan, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) küresel ısınmaya yaklaşık %60 oranında etkilemektedir. CO<sub>2</sub>'nin atmosferdeki kalma süresi 6 yıldır. Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) 2005'deki sıcaklıkların 1998'den daha yüksek olduğunu doğru kabul ederek, bu dönemde sadece atmosferdeki sera gazı olan CO<sub>2</sub> birikimi yaklaşık 280±10 ppm dolaylarında değişen bir dalgalanma gösterdiğini bildirmiştir (Pekin, 2006). Türkiye'de küresel ısınmadaki etkenler sırasıyla enerji sektörü %41, sanayi %31, ulaştırma %17 ve konutlar %11 olarak belirtilmiş ve Şekil 1'de gösterilmiştir (Diler,2006).



**Şekil 1.** Türkiye'de Karbondioksit Emisyonlarının Sektörlere Göre Dağılımı (Diler, 2006) (CO<sub>2</sub> emission distribution based on sectors in Turkey (Diler, 2006))

Bu çalışmada amaç, küresel ısınmaya Türkiye'de %17 oranında etkisi olan ulaştırma sektöründen (Diler, 2006) kaynaklanan karbondioksit salınımlarının azaltılması ve yaşanılabilir bir dünyaya katkı sağlamak üzere ulaştırma etkeni içerisinde esnek ve rijit üstyapı tiplerinin karbon ayak izine etkisinin araştırılmasıdır. IPCC hesaplamaları ve ölçüm sonuçlarının İngiltere karbon ayak izi hesaplama Anonim (2009), tablosuna işlenmesi ile esnek ve rijit üstyapı karbon ayak izi karşılaştırılması yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Bu çalışmada hem rijit üstyapılar hem de esnek üstyapılar incelenmiştir. Bu nedenle de bu bölümde her iki üstyapı tipi kısaca anlatılmıştır.

TUİK (2015; 2018), Rijit üstyapı için yüksek eğilme mukavemeti ile portland çimentosu kullanılarak yapılan tek tabakalı bir plak yardımıyla yükleri dağıtan bir üstyapı tipi tanımlanmıştır. Rijit üstyapı tabakasında kullanılan çimento üretimindeki karbondioksit emisyon miktarları belirlenmesinde kabul edilen ve sektör içerisinde faaliyet gösteren, sürdürülebilirlik raporunu yayınlayan Akçansa ve Çimsa'nın verileri ışığında çalışma yapılmıştır. Bu firmalar üç farklı ürün için EPD raporu da yayınlamıştır. Yayınlanan raporda 2013 yılı içerisinde Türkiye'de yaklaşık olarak 74 milyon ton çimento üretildiği belirtilmiştir. Akçansa tarafından sürdürülebilirlik raporunda 2013 yılını kapsayan dönemde bir ton çimento üretiminden kaynaklı 753 kg CO<sub>2</sub> emisyonu olduğu ifade edilmiştir (Akçansa, 2014). Çimsa tarafından açıklanan raporda 732 kg CO<sub>2</sub> emisyonu açıklaması yapılmıştır (Çimsa, 2013). Bu değerler farklı çimento sınıflarından kaynaklanan emisyon değerlerinin ağırlıklı ortalamasıdır. Bu firmaların atık ısıdan geri kazanım, alternatif yakıt ve hammadde kullanımı ve enerji verimliliği gibi konularda öncü olduğu düşünülürse verilerin Türkiye ortalamasının üstünde olmayacağı öngörülebilir. Ürünler incelendiğinde Türkiye geneli ile paralel olduğu görülmektedir. Sonuçta 2013 yılında bir ton çimento üretiminden kaynaklı CO<sub>2</sub> eşdeğeri ortalama 742 kg olarak belirlenebilir. 74 milyon ton çimento düşünülüğünde, 55 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonu olduğu söylenebilir. Çalışmada üretilen klinker kütlesi ton cinsinden ve klinker için emisyon faktörleri verileri girilerek CO<sub>2</sub> emisyonu ton bazında hesaplanmıştır. Çimento için ise CO<sub>2</sub> emisyonu ise yıllık tüketilen çimento üretimi ton cinsinden verisi, çimentoda klinker fraksiyonu verileri girilerek üretilen çimento türünden klinker kütlesi (ton)

cinsinden hesaplanmıştır. Debroux vd. (2007), Kanada'da Ulusal Araştırma Konseyi tarafından yapılan araştırmada kaplama çeşidinin ağır yük taşıtlarının yakıt tüketimindeki etkisi incelenmiştir. İncelenen konu içerisinde fosil yakıt tüketimini azaltmanın sosyal ve çevreyle ilgili önemi dolayısı ile yol kaplamalarının araçların ve ağır yük taşıtlarının yakıt tüketimindeki etkileri konusunda da incelemeler yapılmıştır. Yakıt tüketimi konu olduğunda yapılan karşılaştırmalarda rijit yolun esnek yola oranla daha az karbon salınımı meydana getirdiği belirlenmiştir. Genel olan çalışmada farklı düzgünlük seviyeleri olan kaplama tabakaları ve her mevsimde yapılan gözlemleri kapsayan son aşama en düşük farklılıkları çalışma sonunda gösterdi. Yakıt tasarrufu olarak ortalama % 2.35 yakıt tasarrufu göz ardı edilmesi mümkün olmayacağı ve hesaplamalarda büyük farklılıklara neden olur.

Karbondiyoksit emisyonlarının düşürülmesine, endüstriyel atıkların geri kazanımı için çimento fırınlarında kullanılan taşıt lastiği, solvent, atık yağ, atık su arıtma çamuru, boya artığı gibi malzemelerin alternatif yakıt olarak kullanılması önemli oranda katkı sağlar. Geri dönüşümde kullanılan bu malzemeler çimento üretimi sırasında yakılmadıklarında normal yollarla yakılmak durumundadır. Burada enerji kazanımı çok azdır ve karbondiyoksit emisyonları çimento endüstrisinde oluşan salınımlarla beraber hesaplanmak zorunda kalır. Geri dönüşümde kullanılan bu tür atıklar çimento fırınlarının 1450°C ulaşan sıcaklıklarda yakıldıklarında içlerindeki tüm organik moleküller yok edilir ve çevre için herhangi bir tehlike yaratmaz. Geri dönüşüm maddelerinden geriye de hiçbir şey kalmamaktadır (EUPAVE, 2009).

Kjellsen vd. (2005), Çimento üretimi sırasında dekarbonizasyon sürecinin sonucu CO<sub>2</sub> salınımı olur. Rekarbonizasyonun (tekrar karbonlaşmanın) sonrasında da CO<sub>2</sub> yaşam süresince beton tarafından emilir. Moloz betonlar 2 - 3 yıllık bir sürede havadan 15-35 kg / m<sup>3</sup> 'lük bir miktar karbondiyoksit emilimi yaparlar. Yaşam dönemine bakarsak o zaman yol betonu için toplam CO<sub>2</sub> alınımı olarak 25-45 kg/ m<sup>3</sup> gibi rakama ulaşır. Beton yapımında kullanılan 350 kg/m<sup>3</sup> yüksek fırın çimentosunun üretimi sırasında salınan CO<sub>2</sub> miktarının %15'i tekamül etmektedir (EUPAVE, 2009).

Esnek üstyapı tabakası yapılırken bitümlü sıcak karışım için; agregalar 160°C-170°C'ye ısıtılır. Agregalar diğer adımda 150°C-160°C'ye ısıtılmış bitüm ile karıştırılır ve kurutucu tarafından çıkan alevler ile kurutulma işlemi yapılır. Diğer yandan da bitüm, yalıtılmış, elektrikli veya kızgın yağ ısıtmalı tanklar içinde ısıtılarak mikserin içerisinde karıştırılır (ASMÜD, 2018).

Asfalt plentler genel olarak atmosferik emisyonu neden olurlar. Kurutma ve karıştırma aşamalarında açığa çıkan gazlar belirlenmiştir. Salınım tablolarına göre düzenlenmiş ve limit değerler ile son şeklini almıştır. Asfalt üretimi esnasında salınan gazların olması kaçınılmazdır. Asfalt yüklenmesi ve boşaltılması esnasında sızan emisyonlar için önlem alınıp bu sızmaların azaltılması yapılabilmektedir. Esnek üstyapı tabakası tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlar. Yükleri taban zeminine dağıtan bir üstyapı tipidir. Bağlayıcı alttemel, temel malzemeleri üzerinde trafiğe bağlı olarak bitümlü sıcak karışımla yapılmış tabakalardan veya bitümlü sathi kaplamadan oluşmaktadır. Asfalt plentlerinde 160°C civarında ısıtılmış mineral agrega ile bitümün karıştırılmasıyla sıcak karışım asfalt olarak da adlandırılan bitümlü sıcak karışım meydana gelmektedir. Karışım gradasyonu içerisinde agrega %93-97 oranında kullanılırken bitüm %3 ila %7 arasında yer almaktadır. Bitüm ham petrolün rafinerilerde uygun metotlarla damıtılması sonucu elde edilen bağlayıcı bir malzemedir. Yol yapım ve bakımında kullanılan bitümlere asfalt çimentosu adı da verilmektedir. Agregaya belirli bir gradasyona ve kaliteye sahip kayaç parçaları, çakıl, kırmataş, kum ve benzeri mineral malzeme veya bunların karışımından meydana gelmektedir.

IPCC (2006), Bu çalışmada yol üstyapısının aynı uzunluk ve kalınlıkta esnek ve rijit üstyapı tabakalarının kaynaklanan sera gazlarının IPCC metodolojisi kullanılarak emisyonları hesaplanmıştır. Burada rijit üstyapı ve esnek üstyapı tabakasının malzeme temini, inşaat aşaması, rutin bakım ve ömür döngüsü hesaplamaları yapılmıştır. IPCC; 1988 yılında WMO ve UNEP' in oluşturduğu uluslararası bir kurumdur. IPCC dünyadaki küresel iklim değişiklikleri, iklim değişikliğinin çevreye olumsuz sonuçlarını ve bunların en aza indirgenmesi için politikalar uygulamaktadır. IPCC programı ile "Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Raporu'ndaki" emisyon faktörleri ve belirsizlikler kullanılarak sera gazı emisyonları programdaki tier 1, tier 2 ve tier 3 yaklaşımlarına göre hesaplanmaktadır. Sera gazı emisyonu; faaliyet verilerinin faktörler ile çarpılmasıyla elde edilir. Ölçme birimi olarak ton kullanılır ve her bir sera gazı uygun GWP' ler kullanılarak CO<sub>2</sub> eşdeğer tona çevrilir.

Esnek ve rijit yol uygulamalarının yapımında ve kullanımında tüm yaşam döngüsü süresindeki çevresel etki (ISO 10440, ISO 14044) standart metotları ile karbon ayak izi takibi yapılmıştır. IPCC Metodolojisi kullanılarak teorik hesaplamalar yapılmıştır. Avrupa Bitüm Birliği, ASMÜD (Asfalt Mütahitleri Birliği Derneği) ve Avrupa Beton Birliği Ölçüm Kombinasyonları yöntemine göre İngiltere karbon ayak izi hesaplama tablosundan faydalanılarak, malzeme temini aşaması, inşaat aşaması ve rutin bakım ve ömür sürelerinin karbon ayak izi takibi yapılarak esnek ve rijit üstyapıların karşılaştırılması incelenmiştir.

Esnek ve rijit üstyapı tabakalarının malzeme temini aşamasında kullanılan formüller belirlenmiştir. Kaplama tabakaları 1 km uzunluğunda tek şeritli 4 m genişliğinde ve 0,15 m kalınlığında düşünülmüştür. Esnek ve rijit üstyapı tabakası yapımında gerek duyulan inşa malzemelerinden kaynaklanan karbondioksit salınımı Denklem 3.1 ile hesaplanmaktadır. Esnek üstyapı için malzeme özgül ağırlığı 2,4 ton/m<sup>3</sup>, rijit üstyapıda çimento miktarı için 350 kg/m<sup>3</sup> alınmıştır.

$$\varepsilon_{CO_2} = l * b * h * \gamma * S_{CO_2} \quad (1)$$

Burada;  $\varepsilon_{CO_2}$ , karbondioksit emisyonunu (kg/ton),  $l$  yolun uzunluğunu (m),  $b$  yolun genişliğini (m),  $h$  yolun derinliğini (m),  $\gamma$  yol inşa malzemelerinin özgül ağırlığını ( $t/m^3$ ) ve  $S_{CO_2}$  birim karbondioksit salınımını (kg/ton) ifade etmektedir.

Esnek ve rijit üstyapı tabakalarının inşaat yapım aşamasında kullanılan formüller belirlenmiştir. Esnek ve rijit üstyapı tabakası yapımında ısıtma, kurutma ve karıştırma süresinde CO<sub>2</sub> emisyonu Denklem 1 ile hesaplanmıştır. İnşaat aşamasında kamyonlara yüklenmesi, kamyonlar ile taşınması esnasında yakıt tüketimi ve serim amacıyla kullanılan finisher yakıt tüketimi, silindir yakıt tüketimi her iki yol üstyapı tabakası için benzer uygulamalar olup sonucu çok etkilemediğinden dikkate alınmamıştır.

Esnek ve rijit üstyapı tabakalarının rutin bakım ve ömür döngüsü süresinde kullanılan formüller belirlenmiştir. Esnek ve rijit üstyapı tabakası yapıldıktan sonra CO<sub>2</sub> geri kazanımı Denklem 1 ile hesaplanabilmektedir. Yolun ömür süresinde üstyapı tabakasını kullanan araçların yakıtlarından kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonu IPCC Tier 1 formülü (Denklem 1) ile hesaplanmıştır. Üstyapı tabakalarını kullanan araç sayısı 1000 olarak düşünülmüş ve yakıt türü olarak benzin dikkate alınmıştır.

Örnek olarak 2016 yılı verileri ile karayolunda 2156263 ton benzin tüketilmesi sonucunda açığa çıkan karbon emisyonu hesaplaması gösterilmiş ve bu hesaplama referans alınarak çalışmalar yapılmıştır (KGM, 2016)

Bu şekilde yapılan hesap ile 2016 yılında, karayollarında tüketilen 2156263 ton benzin, 6627,46 Gg CO<sub>2</sub> emisyonu vermektedir. Bu da 6,6 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonuna eşittir.

### 3. Bulgular (Research Findings)

Karaçor vd. (2010), Esnek üstyapı tabakaları birincil ayak izi yani doğrudan karbon salınımı yönünden beton yol tabakalarına göre daha avantajlıdır. Ancak, beton kaplamalar enerji, su, doğal kaynaklar, radyoaktif atıklar ve koku yönlerinden asfalt kaplamadan ikincil ayak izi yani dolaylı karbon salınımları yönünden daha avantajlı hale gelmektedir. Ancak, yol yapımında kullanılan hammadde hazırlanması, yol yapımı, servis ömrü, rutin bakım ve ömür döngüsünde incelendiğinde en önemlisi ulaştırma için kullanılan yakıtların hesaba katılması tamamen farklı bir tablo karşılacaktır. Ulaştırma sektöründe kullanılan araçların yakıt tüketimini düşürmek önem taşımaktadır. Bu yüzden farklı yol üstyapı kaplama tipleri yaşam dönemi değerlendirilmesine bakılarak yapılan karşılaştırmalarının çeşitli çevresel göstergeler için daha az "siyah-beyaz" bir resimle sonuçlanacağı düşünülebilir. Yapılan çalışma sonucu ne olursa olsun, geliştirme, yapım, bakım teknikleri, yıkım ve geri kazanım alanlarında çalışmalar devam ettikçe sonuç daha objektif olacaktır. Yapılan çalışmalar bize göstermiştir ki en önemli faktör yakıt tüketimi faktörüdür. Karbon ayak izi takibi için malzeme temini, inşaat aşaması, rutin bakım ve ömür döngüsü süresinde karbon emisyon takibi yapılmıştır. Esnek üstyapı tabakası ve rijit üstyapı tabakası için aynı km ve ortamlarda yapılması düşünüldüğü üstyapı kaplaması karbon ayak izi takibi incelenmiştir.

Esnek üstyapı tabakası ve rijit üstyapı tabakası için 1000 araç için yakıt tüketimi temel alınarak, aynı km ve ortamlarda yapılması düşünüldüğü üstyapı kaplaması karbon ayak izi takibi incelenmiştir. Esnek asfalt kaplama tabakası için km'de gerekli asfalt üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> miktarının hesaplanması yapılmıştır. Tüketilen bitüm üretilmesindeki CO<sub>2</sub> emisyonu ve taşınmasındaki CO<sub>2</sub> emisyonu miktarı Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada ilk olarak ilgili yol kesimi için ihtiyaç duyulan uygun değer bitüm miktarı denklem 3.1 kullanılarak 1440 ton asfalt ihtiyacı bulunmuş, %95 oranında agrega miktarı 1368 ton, %5 oranında bitüm 72 ton olarak belirlenmiş ve daha sonrasında ihtiyaç duyulan bitümün üretilmesi esnasında ortaya çıkan CO<sub>2</sub> miktarı esnek üstyapı için birim emisyon miktarı 190 kg/ton (EUPAVE, 2009) CO<sub>2</sub> alınarak 13,68 ton karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır.

Malzeme taşınması esnasında esnek üstyapı kaplama tabakası için karbondioksit emisyonu birim miktarı 3,39 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 1440 ton asfalt taşınmasında 4,88 ton karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır.

Üstyapı tabakasının yapımında ısıtılarak kurutma ve karıştırma esnasında karbondioksit emisyonu birim miktarı 3,39 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 1440 ton asfalt ısıtılmasında 18,54 ton CO<sub>2</sub> malzemelerin düzgün karıştırılabilmesi amacıyla ısıtma, daha sonra karıştırma esnasındaki ısıtma, kurutma esnasında tüketilen enerji dikkate alınmıştır. Karıştırma, esnek üstyapı kaplama tabakası için karbondioksit emisyonu birim miktarı 2,78 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 1440 ton asfalt karıştırılmasında 4,003 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

Esnek asfalt kaplama tabakasında km'de 1000 araç için yıllık ortalama günlük trafikten kaynaklanan CO<sub>2</sub> salınım miktarı hesaplanabilmesi için ilgili yol kesiminden bir yıl içinde geçen taşıt miktarı dikkate alınmıştır. İş günlerinde her 100 km'de 35 L yakıt tüketimi ile 1000 araç varsayımı yapılmıştır. 1 litre yakıtın yanmasıyla ortalama 2,5 kg'lık CO<sub>2</sub> salınım meydana gelmektedir. Yıllık CO<sub>2</sub> salınımı: 1000 araç ile karayollarında tüketilen 77000 ton benzin, 236,666 Gg CO<sub>2</sub> emisyonu vermektedir. Bu da 236 ton CO<sub>2</sub> emisyonuna eşittir.

Geri kazanım, esnek üstyapı kaplama tabakası için karbondioksit geri kazanımı birim miktarı 3,37 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 1440 ton asfalt geri kazanımında 4,85 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

350 kg/m<sup>3</sup> çimento kullanımında eşitlik 3.1 yardımıyla 210 ton çimento ihtiyacı olduğu hesaplanmıştır, tüketilen çimentonun üretilmesinde birim CO<sub>2</sub> salınım 400 kg/L (EUPAVE, 2009) olması durumunda karbondioksit emisyonu (CO<sub>2</sub>) miktarı 84 ton olarak hesaplanmıştır. Malzeme taşınması esnasında esnek üstyapı kaplama tabakası için bir metreküp için 1833,48 kg/m<sup>3</sup> agrega ihtiyacına göre denklem 3.1 yardımıyla 1100 ton agrega ihtiyacı tespit edilir. Bu agrega taşınmasında karbondioksit emisyonu birim miktarı 5,1 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 6,68 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

Rijit beton yol üstyapı tabakası yapımında 1100 ton agrega ve 210 ton çimento kullanılmıştır. Toplam karıştırma sırasında 1310 ton malzeme vardır. Karıştırma, esnek üstyapı kaplama tabakası için 1310 ton malzeme karıştırması durumunda karbondioksit emisyonu birim miktarı 3,9 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 5,1 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır. Beton yollar tarafından tekrar karbonlaşmanın sonucu ile geri kazanım, rijit üstyapı kaplama tabakası için geri kazanım karbondioksit emisyonu birim miktarı 0,15 kg/m<sup>3</sup> alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 31,5 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

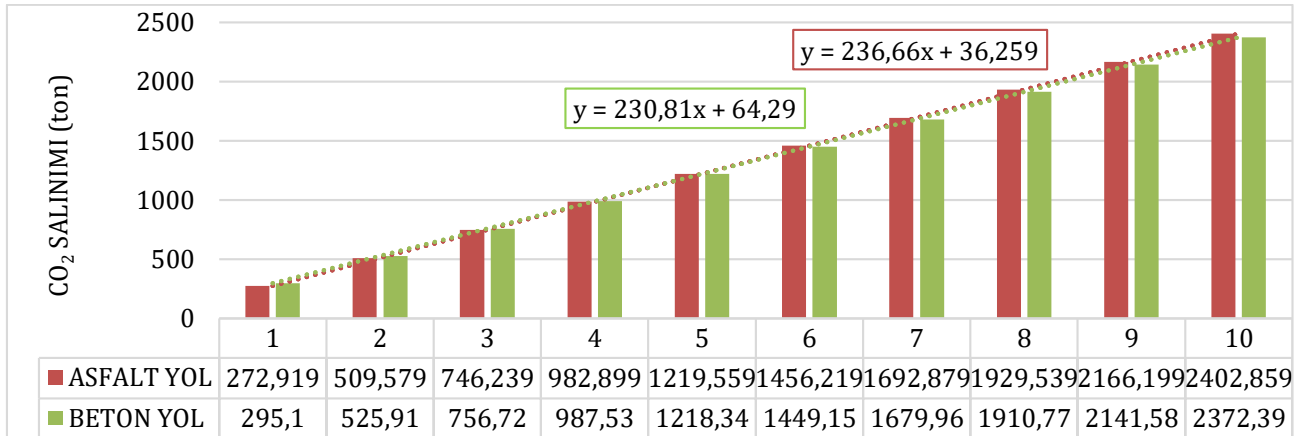
Beton yollarda 1000 araç ile yıllık ortalama günlük trafikten kaynaklanan karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır. Ağır yük şeridini asfalttan betona değiştirmeyi istediğimizi varsayalım. Burada beton yolun asfalt yola oranla yakıt tasarrufu %2.35 (EUPAVE, 2009) ile yıllık CO<sub>2</sub> salınımındaki azalma için asfalt yolda 1000 araçla hesaplanan: beton yolda tüketilen 75190,5 ton benzin, 230,81 Gg CO<sub>2</sub> emisyonu vermektedir. Bu da 230,81 ton CO<sub>2</sub> emisyonuna eşittir.

Hazırlanan tablo 1.Yıl, 2.Yıl, 10.Yıl, 20.Yıl ve 40.Yıl için karbon salınım miktarlarını göstermektedir. Salınım 1.Yılsonunda günde 1000 araç ile salınan CO<sub>2</sub> miktarları hesaplanmıştır. Yıllık gün sayısı 220 gün çalışma günü olarak belirlenmiştir. Bu miktar 2.Yıl ve sonraki yıllarda devam ettiği için ilk yılsonundaki toplam CO<sub>2</sub> salınımına eklenerek 2.Yıl, 4.Yıl, 10.Yıl, 20.Yıl ve 40.Yıl içinde salınımlar hesaplanmıştır.

**Tablo 1.** Rijit ve esnek üstyapıların 1000 araç için yaşam dönemi değerlendirmesine göre karbon ayak izinin karşılaştırılması (Comparison of the carbon footprint of rigid and flexible pavements based on life cycle for 1000 vehicles)

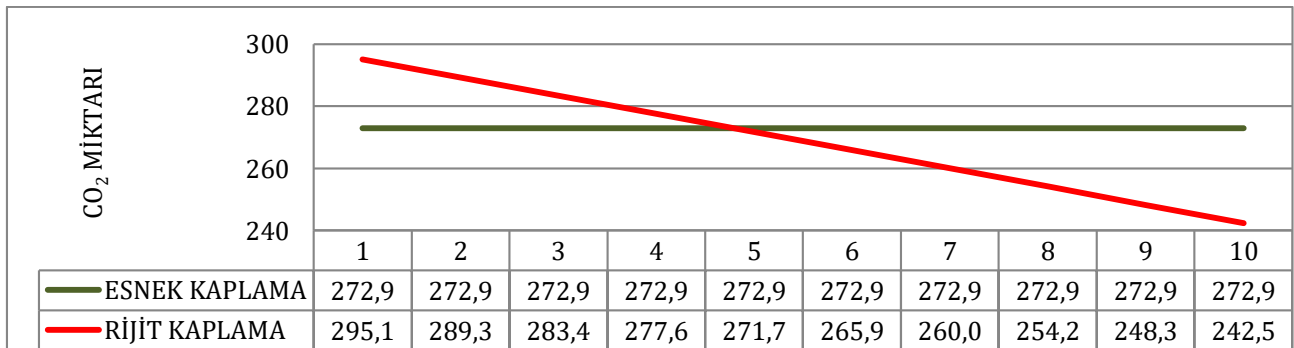
KARBON AYAK İZİ-1 Km'lik YOL İÇİN		YILLIK CO <sub>2</sub> SALINIMI(×10 <sup>3</sup> )	
		ASFALT CO <sub>2</sub> / ton	BETON CO <sub>2</sub> / ton
Malzeme temini	Bitüm Üretimi	13.68	
	Çimento Üretimi		84
İnşaat aşaması	Malzemenin Taşınması	4.881	6.681
	Karıştırma	4.003	5.109
	Isıtma ve Kurutma	18.547	
Rutin bakım ve ömür döngüsü	Malzeme Geri Kazanım	-4.852	
	CO <sub>2</sub> depolaması %15		-31.5
	1000 araç ile ömür döngüsü	236.66	230.81
SALINIM 1.YIL		272.91	295.1
SALINIM 2.YIL		509.57	552.91
SALINIM 4.YIL		1219.55	1218.34
SALINIM 10.YIL		2402.85	2372.39
SALINIM 20.YIL		4769.45	4680.49
SALINIM 40.YIL		9502.65	9296.69

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında yakıt tasarrufunun ömür döngüsü içerisinde etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir. Bu ulaşılan sonucun önemini anlatabilmek için yakıt tasarrufunun 10 yıllık kümülatif karbondioksit salınımı grafiği çizilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Karbon ayak izi karşılaştırılmasında zamana göre durum grafiği - 1000 araç durumu (State of the carbon footprint comparison by time - 1000 vehicle sample)

Yıllık yakıt tasarrufundan dolayı beton yollarda, asfalt yola oranla CO<sub>2</sub> salınımında azalma Şekil 3'de gösterilmiştir. Karbon salınımı karşılaştırıldığında Asfalt yol için eğilim çizgisi  $y=236,66x+36,259$  rijit üstyapı için eğilim çizgisi  $y=230,81x+64,29$  olarak bulunmuştur. Eğilim çizgileri denklem eşitliği yapıldığında  $x=4,79$  olarak bulunmuştur. Burada 4'üncü yıldan sonra beton yola göre karbon salınımı artmıştır.



Şekil 3. Yakıt tasarrufu etkisi - 1000 araç durumu (Impact of fuel savings - 1000 vehicle sample)

Asfalt yolun 1'inci yıl CO<sub>2</sub> salınımı sabit olup beton yolun asfalt yola oranla %2,35'lik yakıt tasarrufundan kaynaklı her yıl 5.8 ton CO<sub>2</sub> salınımı rijit üstyapı tabakasından düşerek aradaki farkı göstermek için Şekil 3 hazırlanmıştır. Beton yol daha az salınım yapacak hale gelecektir.

KGM (2013), Karbon ayak izi takibi için malzeme temini, inşaat aşaması, rutin bakım ve ömür döngüsü süresinde karbon emisyon takibi Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 Bölüm 400 içerisinde belirtilen kalınlıklara ve malzeme miktarlarına göre yapılmıştır. Esnek üstyapı tabakası ve rijit üstyapı tabakası için üstyapı kalınlıkları göz önüne alınarak üstyapı kaplaması karbon ayak izi takibi incelenmiştir. Esnek asfalt üstyapı da bulunan Aşınma, binder ve bitümlü temel tabakaları için km'de gerekli asfalt üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> miktarının hesaplanması yapılmıştır. 1 km uzunluğunda 4 m genişliğinde ve 23 cm kalınlığında tüketilen bitüm üretilmesindeki CO<sub>2</sub> emisyonu ve taşınmasındaki CO<sub>2</sub> emisyonu miktarı Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada ilk olarak ilgili yol kesimi için ihtiyaç duyulan uygun değer bitüm miktarı Denklem 3.1 kullanılarak 2208 ton asfalt ihtiyacı bulunmuş, %95 oranında agrega miktarı 2097,6 ton, %5 oranında bitüm 110,4 ton olarak belirlenmiş ve daha sonrasında ihtiyaç duyulan bitümün üretilmesi esnasında ortaya çıkan CO<sub>2</sub> miktarı esnek üstyapı için birim emisyon miktarı 190 kg/ton (EUPAVE, 2009) CO<sub>2</sub> alınarak 20,98 ton CO<sub>2</sub> karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır.

Malzeme taşınması esnasında esnek asfalt üstyapı da bulunan Aşınma, binder ve bitümlü temel tabaka malzemesi taşınması için karbondioksit emisyonu birim miktarı 3,39 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 2208 ton asfalt taşınmasında 7,48 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır. Üstyapı tabakalarının yapımında ısıtılarak kurutma esnasında karbondioksit emisyonu birim miktarı 12,88 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 2208 ton asfalt ısıtılmasında 28,44 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır. Burada malzemelerin düzgün karıştırılabilmesi amacıyla

ısıtma, daha sonra karıştırma esnasındaki ısıtma, kurutma esnasında tüketilen enerji dikkate alınmıştır. Karıştırma, esnek üstyapı kaplama tabakası için karbondioksit emisyonu birim miktarı 2,78 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 2208 ton asfalt karıştırılmasında 6,14 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

Esnek asfalt kaplama tabakasında km'de 10000 araç için yıllık ortalama günlük trafikten kaynaklanan CO<sub>2</sub> salınım miktarı hesaplanabilmesi için ilgili yol kesiminden bir yıl içinde geçen taşıt miktarı dikkate alınmıştır. İş günlerinde her 100 km'de 35 L yakıt tüketimi ile 10000 araç varsayımı yapılmıştır. 1 litre yakıtın yanmasıyla ortalama 2,5 kg'lık CO<sub>2</sub> salınım meydana gelmektedir. Yıllık CO<sub>2</sub> salınımı: karayollarında tüketilen 770000 ton benzin, 2366,66 Gg CO<sub>2</sub> emisyonu vermektedir. Bu da 2366 ton CO<sub>2</sub> emisyonuna eşittir. Geri kazanım, esnek üstyapı kaplama tabakası için karbondioksit geri kazanımı birim miktarı 3,37 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 2208 ton asfalt geri kazanımında 7,44 ton karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır.

Rijit beton kaplama tabakası için km'de gerekli çimento üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> miktarının hesaplanmıştır. Genelde inlemelerde 1 ton çimento üretim sonucunda ortaya çıkan karbondioksit miktarına bakılır. Çimento üretimi sırasındaki CO<sub>2</sub> salınımları 400 kg/L (EUPAVE, 2009) olarak belirlenmiş ve hesaplamalar yapılmıştır. 1 km uzunluğunda tek şeritli 4 m genişliğinde ve 15 cm kalınlığında 350 kg/m<sup>3</sup> çimento kullanımında Denklem 3.1 yardımıyla 210 ton çimento ihtiyacı olduğu hesaplanmıştır, karbondioksit emisyonu miktarı 84 ton olarak hesaplanmıştır.

Malzeme taşınması esnasında esnek üstyapı kaplama tabakası bir metreküp için 1833,48 kg/m<sup>3</sup> agrega ihtiyacına göre Denklem 3.1 yardımıyla 1100 ton agrega ihtiyacı tespit edilir. Bu agrega taşınmasında karbondioksit emisyonu birim miktarı 5,1 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 6,68 ton karbondioksit emisyonu hesaplanmıştır.

Rijit beton yol üstyapı tabakası yapımında 1100 ton agrega ve 210 ton çimento kullanılmıştır. Toplam karıştırma sırasında 1310 ton malzeme vardır.

Karıştırma, esnek üstyapı kaplama tabakası için 1 km uzunluğunda 4 m genişliğinde ve 15 cm kalınlığında tabaka 1310 ton malzeme karıştırması için karbondioksit emisyonu birim miktarı 3,9 kg alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 5,1 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır. Beton yollar tarafından tekrar karbonlaşmanın sonucu ile geri kazanım, rijit üstyapı kaplama tabakası için 1 km uzunluğunda 4 m genişliğinde ve 15 cm kalınlığında tabaka için geri kazanım karbondioksit emisyonu birim miktarı 0,15 kg/m<sup>3</sup> alınarak (Temren ve Sönmez, 2013) 31,5 ton CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

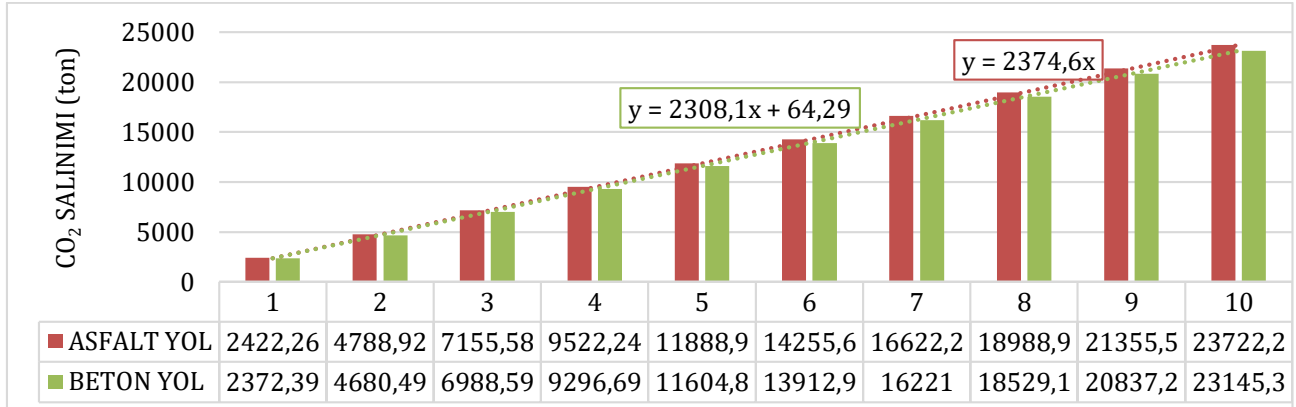
Trafik yoğunluğunu kullanan kaplamayı asfalttan betona değiştirelim. Burada beton yolun asfalt yola oranla yakıt tasarrufu %2.35 (EUPAVE, 2009) ile yıllık CO<sub>2</sub> salınımındaki azalma için beton yolda tüketilen 751905 ton benzin, 2308,1 Gg CO<sub>2</sub> emisyonu vermektedir. Bu da 2308,1 ton CO<sub>2</sub> emisyonuna eşittir.

Tablo 2'de, 1'inci, 2'nci ve 10'uncu yıl için karbon salınım miktarlarını göstermektedir. Salınım 1'inci yıl sonunda günde 10000 araç ile salınan CO<sub>2</sub> miktarları hesaplanmıştır. Yıllık gün sayısı 220 gün çalışma günü olarak belirlenmiştir. Bu miktar 2.Yıl ve sonraki yıllarda devam ettiği için ilk yılsonundaki toplam CO<sub>2</sub> salınımına eklenerek 2'nci, 10'uncu, 20'nci ve 40'uncü yıl içinde salınımlar hesaplanmıştır.

**Tablo 2.** Rijit ve esnek üstyapıların 10000 araç için yaşam dönemi değerlendirilmesine göre karbon ayak izinin karşılaştırılması (Comparison of the carbon foodprint of rigid and flexible pavements based on life cycle for 1000 vehicles)

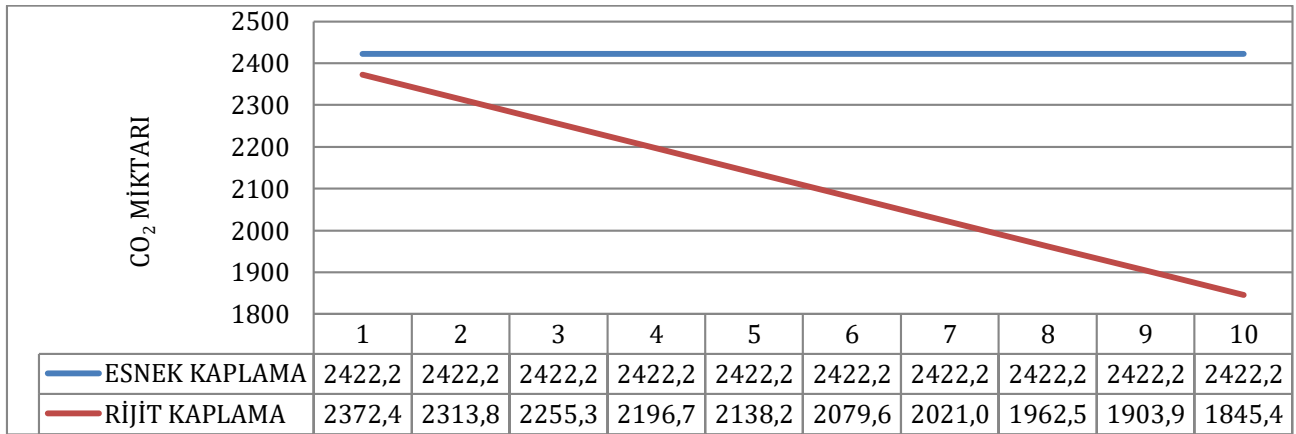
KARBON AYAK İZİ-1 Km'lik YOL İÇİN		YILLIK CO <sub>2</sub> SALINIMI(×10 <sup>3</sup> )	
		ASFALT CO <sub>2</sub> / ton	BETON CO <sub>2</sub> / ton
Malzeme temini	Bitüm Üretimi	20,98	
	Çimento Üretimi		84
İnşaat aşaması	Malzemenin Taşınması	7.48	6.681
	Karıştırma	6.14	5.109
	Isıtma ve Kurutma	28.44	
Rutin bakım ve ömür döngüsü	Malzeme Geri Kazanım	-7.44	
	CO <sub>2</sub> depolaması %15		-31.5
	10000 araç ile ömür döngüsü	2366.6	2308.1
SALINIM 1.YIL		2422.26	2372.39
SALINIM 2.YIL		4788.92	4680.49
SALINIM 10.YIL		23722.2	23145.29
SALINIM 20.YIL		47388.8	46226.29
SALINIM 40.YIL		94722	92388.29

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında yakıt tasarrufunun ömür döngüsü içerisinde etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir. Bu ulaşılan sonucun önemini anlatabilmek için yakıt tasarrufunun 10 yıllık kümülatif karbondioksit salınımı grafiği çizilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Karbon ayak izi karşılaştırılmasında zamana göre durum grafiği - 10000 araç durumu (State of the carbon foodprint comparison by time - 10000 vehicle sample)

Yıllık yakıt tasarrufundan dolayı beton yollarda, asfalt yola oranla CO<sub>2</sub> salınımında azalma Şekil 4'de gösterilmiştir. Karbon salınımı karşılaştırıldığında Asfalt yol için eğilim çizgisi  $y=2374.6x$  rijit üstyapı için eğilim çizgisi  $y=2308.1x+64,29$  olarak bulunmuştur. Eğilim çizgileri denklem eşitliği yapıldığında  $x=0,966$  olarak bulunmuştur. Burada 1'inci yıldan itibaren beton yola göre karbon salınımı artmıştır.



Şekil 5. Yakıt tasarrufu etkisi - 10000 araç durumu (Impact of fuel savings - 10000 vehicle sample)

Asfalt yolun 1'inci yıl CO<sub>2</sub> salınımı sabit olup beton yolun asfalt yola oranla %2,35'lik yakıt tasarrufundan kaynaklı her yıl 58,6 ton CO<sub>2</sub> salınımı rijit üstyapı tabakasından düşerek aradaki farkı göstermek için Şekil 5.'de gösterilen grafik hazırlanmıştır. Beton yol daha az salınım yapacak hale gelecektir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç (Discussion and Conclusion)

Yapılan çalışmada karayollarında karbon ayak izi araştırması ve karşılaştırılması hedeflenmiştir. Karayollarında karbon ayak izi karşılaştırması için yaşam dönemi değerlendirmesi (YDD) olarak bilinen kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır. Beton ve Asfalt yolların doğrudan (birincil ayak izi ve dolaylı (ikincil ayak izi) takip edilmiştir. IPCC metodolojisi ile teorik hesaplamalar yapılmıştır.

Yapılan ilk çalışmadaki hesaplamalarda esnek yolların yapımı ve 1.yılsunda betona oranla daha az karbon emisyonu olmuştur. Ancak yakıt tasarrufunun karayollarında karbon salınımlarında önemli bir etkisi olduğu anlaşılmıştır. Karbon salınımı yakıt tasarrufunun da etkisi ile yolların servis ömürleri boyunca asfalt yolda, beton yola oranla daha çok karbon salınımı olduğu görülmüştür. Beton yollar sabit hızla giden 1000 araç için yapmış olduğumuz çalışmaya göre 6.yılsunda asfalt yoldan daha az karbon salınımı meydana getirmiştir. Karbon ayak izi takibi ve Yaşam dönemi değerlendirmesi yaptığımızda beton yollar, asfalt yola göre karbon salınımında(emisyonunda) yüzde 2,35 yakıt tasarrufundan dolayı 4. yılda daha az salınım yapmaya başlamıştır.



İkinci çalışmada ise hesaplamalarda esnek yolların yapımı ve 1'inci yıl itibari ile beton yol tabakası için daha az karbon emisyonu olmuştur. Beton yollar sabit hızla giden 10000 araç için yapmış olduğumuz çalışmaya göre 1'inci yıl hesaplama sonucunda asfalt yoldan daha az karbon salınımı meydana getirmiştir.

Karbon ayak izimizi azaltmak için: Rutin bakımlarda çevre dostu ve daha verimli iş makineleri kullanma, taşınma mesafelerini minimum yapma, taşıma esnasında oluşan karbondioksit salınımını azaltmak için çevreci ve yakıt tasarrufu yapan araçlar tercih edilmelidir. Seyahatlerde toplu taşıma araçları kullanılmalıdır.

Yol yapım çalışmalarının ve dolayısı ile trafik aksamalarının azalmasını ve bunlara bağlı olarak yakıt tüketimin ve egzoz gazı salınımlarının da azalmasında sürdürülebilir üstyapı tabakası kıyaslamasında önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Yaşadığımız dünyada insan faaliyetleri sonucunda çevreyi kirletiyoruz bu durum için önlemler almazsak gelecek kuşaklara yaşanması zor ve tehlikeli bir dünyaya yaşamalarına sebep olacağız. Karbon salınımına sebep olan ülkelere bakıldığında gelişmiş ülkeler daha çok karbon salınımı yapmaktadır. Gelişmiş ülkeler yaşayışlarıyla da gereksiz enerji tüketimine neden olmaktadır. Dünyada kirlenmeye engel olabilmek için yenilebilir enerji ile daha az enerji tüketimi yapan sistemlere geçilmeli ve karbon salınımları azaltılmalıdır. Her insan bu konuda bilgili, duyarlı ve doğru olmak zorundadır çünkü ortak geleceğimiz tehlike altındadır.

Bu çalışmada, esnek üstyapı yapım yöntemlerinden ılık asfalt dikkate alınmamıştır. Ayrıca, katkı maddelerinin kullanımı ve bunların etkisi de değerlendirilmemiştir. Bunun yanında geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı (soğuk geri kazanım, sıcak geri kazanım, tam derinlikte geri kazanım vb.) da sonucu değiştirebilecektir. Benzer şekilde, rijit üstyapılar için de atık malzeme geri kazanımı ve katkı malzemelerinin kullanımı da önemli farklılık doğurabileceği gibi silindire sıkıştırılmış rijit üstyapı, sürekli (continuous) rijit üstyapı vb. imalat usullerinin etkisine de bakılmalıdır.

Son olarak aynı trafik verisi ve kompozisyonuna sahip kesimlerde, farklı zemin özellikleri de sonucu önemli oranda değiştirebilecektir. Bundan sonraki çalışmalarda bu konular da dikkate alınarak her bir kesim ve trafik için karbon ayak izi değerlendirmesinin yapılması, sürdürülebilir bir dünya için gereklidir.

### Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

### Kaynakça (References)

- Akçansa, 2014. Geleceğe ulaşmak için yaşanabilir dünya – 2012-2013 Sürdürülebilirlik Raporu Erişim Tarihi 28.05.2019 [http://www.akcansa.com.tr/downloads/surdurebilirlik/surdurebilirlik\\_2014\\_tr.pdf](http://www.akcansa.com.tr/downloads/surdurebilirlik/surdurebilirlik_2014_tr.pdf)
- Alexander, B., 2009 Carbon Footprint of HMA and PCC Pavements. P Int Conference on Perpetual Pavements, Columbus, Ohio.
- Debroux, R., Kral, Z., Lemlin, M., Wansart, L., Degraeve, M., Haesen, G., & Di Mascio, P. (2007). Bituminous and continuously reinforced concrete pavements for motorways. an economic comparison (part II). [Pavimentazioni Bituminose ed in Calcestruzzo ad Armatura Continua per Autostrade. un Confronto Economico (II Parte)] Industria Italiana Del Cemento, 77(830), 288-299.
- Anonim, 2009, Highways Agency Carbon Calculation Tool, December, – Instruction Manual – Version 5c,
- Çimsa, 2013. Sürdürülebilirlik Raporu Erişim Tarihi 28.05.2019 <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/A91AF70B800B4FD0AF5DA989D7A39534.pdf>
- Diler 2006, Şehir İçi Toplu Taşımacılıkta Kullanılan Otobüslerde Doğal Gaz Kullanımının Karbon Dioksit Emisyonlarına Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Eupave, 2009, Concrete Roads: a Smart and Sustainable Choice. September
- Haines, A., Kovats R.S., Campbell-Lendrum D., Corvalan C., 2006. Climate Change and Human Health: Impacts, Vulnerability and Public Health, The Lancet, 9528, 2101-2109
- IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- Karaçor, E. K., Yerli, Ö., Gültekin, P. G., & Özdede, S.,2010, peyzaj tasarımında kullanılan yapısal elemanların karbon ayak izlerinin değerlendirilmesi.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara
- Kjellsen, K.O., Guimaraes, M. and Nilsson, A., 2005. The CO<sub>2</sub> balance of concrete in a life cycle perspective. Danish Technological-DTI.
- Pekin, M. A., 2006. Ulaştırma Sektöründen Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Tektanıl 2008, Toplu Taşımadaki Doğalgazlı Otobüslerin Karbondioksit Emisyonlarına Etkileri Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Temren Z., Sönmez İ., 2013, Asfalt ve Beton Karışımların İmalatında Enerji Tüketimi ve Karbon Ayak İzi İle İlgili Bir Çalışma, 6.Ulusal Asfalt Sempozyum ve Sergisi, 27-28 Kasım, Ankara.
- TUİK 2015. TUİK Sera Gazı Emisyon İstatistikleri. Erişim Tarihi 28.05.2019 [www.tuik.gov.tr/PdfGetir.do?id=24588](http://www.tuik.gov.tr/PdfGetir.do?id=24588)
- TUİK 2018. TUİK Sera Gazı Envanteri. Erişim Tarihi 28.05.2019 <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=21582>