



Yol Geometrik Standartlarının Karayolu İşletme Maliyetleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi¹

Soner CANVER^{1*} , Halit ÖZEN² , Abdulsamet SARAÇOĞLU³ ,
Abdullah MALTAŞ⁴ 

¹Harita Mühendisi, Yıldız Teknik University, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, İstanbul, Turkey

²Assoc. Prof. Dr., Yıldız Teknik University, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, İstanbul, Turkey

³Research Asst., Yıldız Teknik University, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, İstanbul, Turkey

⁴Research Asst., Yıldız Teknik University, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, İstanbul, Turkey

Geliş Tarihi/Received: 05.01.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 04.03.2020

Doi: doi.org/10.31200/makuubd.508625
Araştırma Makalesi/Research Article

ÖZET

Ulaştırmanın üç temel bileşeni; insan, taşıt ve altyapı şeklindedir. Ulaştırma sisteminin işletimi sırasında, bu bileşenlerin hem kendileri hem de birbirleri ile olan ilişkilerinde ortaya çıkan sorunlar “maliyet” olarak tanımlanmaktadır. Ulaştırma sisteminin planlanması aşamasında, işletim sırasında karşılaşılabilecek maliyetlerin tanımlanması ve analiz edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, ülkemizde yoğun olarak kullanılan karayolu ulaşımı için de işletme maliyetlerinin ayrı ayrı belirlenmesi ve bunların etkilerinin değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Karayolu ulaşımında işletme maliyetleri; taşıt işletme maliyeti, emisyon maliyeti, zaman kaybı maliyeti ve yol güvenliği maliyeti olmak üzere 4 ana başlıkta toplanmaktadır. Bunlar arasında taşıt işletme maliyeti, en büyük maliyet oranına sahiptir. Yakıt tüketimi, bakım-onarım gibi doğrudan kullanıcıya yansıyan bu maliyetleri azaltmada yolun karakteristik özellikleri büyük önem arz etmektedir.

¹ Bu çalışma ‘‘II. International Scientific and Vocational Studies Congress (BILMES 2018)’’ kongresinde bildiri sunulmuştur.

Bu çalışmada, karayolu işletme maliyetlerinin neler olduğu ve maliyet hesaplamalarına ilişkin yöntemler detaylı olarak incelenmiştir. Dünya Bankası tarafından yol proje maliyetlerinin hesaplanması için geliştirilen HDM-4 yazılımı kullanılarak, yazılım parametrelerindeki değişimin işletme maliyetine etkisi analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, parametre değişiminin etkisi projelendirilen bir yol güzergahı için belirlenmiştir. Sonuç olarak; taşıt işletme, çevresel etkiler ve yol geometrik özelliklerine ilişkin kullanılan parametrelerin yol işletme maliyetine olan etkisi ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Karayolu İşletme Maliyetleri, Yol Geometrik Standartları, HDM-4 Yazılımı.

Investigation of the Effects of Road Geometric Standards on Highway Operating Costs

ABSTRACT

The three main components of transportation are human, vehicle, and infrastructure. During the operation of the transportation system, the problems of these components both in themselves and in their relations with each other are defined as “cost”. In the planning stage of the transportation system, the costs to be encountered during operation must be identified and analyzed. In this context, it is very important to determine the operating costs separately and to evaluate their effects on the highway transportation that is heavily used in Turkey. Operating costs in the highway transportation are divided into four main categories; vehicle operation cost, emission cost, time loss cost, and road safety cost. Among them, the vehicle operation cost has the greatest cost value. Characteristic features of the highway are of great importance to reduce these costs that directly affect the user, such as fuel consumption, maintenance, and repair.

In this study, highway operating costs and methods for calculating costs are examined in detail. The effect of the change in software parameters on the project cost is analyzed by using the HDM-4 software developed by the World Bank to calculate highway operating costs. In this study, the effect of the change in software parameters is determined for a specific highway. Consequently, effects of the parameters that are used for vehicle operation, environmental effects and the geometric properties of the highway are exposed.

Keywords: Highway Operation Costs, Highway Geometrical Standards, HDM-4 Software.

1. GİRİŞ

Ulaştırmanın üç temel bileşenini taşıt, altyapı ve insan oluşturmaktadır. Bu bileşenlerin kendisi ve birbirleri ile olan ilişkilerinde birçok problem ortaya çıkmakta ve bunlar maliyet olarak tanımlanmaktadır. Yani, “trafik sıkışıklığı büyük bir problemdir” ifadesi, ulaştırma otoriteleri ve ekonomistler tarafından “trafik sıkışıklığı önemli bir maliyettir” şeklinde ifade edilmektedir (Bakırcı, 2005).

Karayolu işletme maliyetleri değişken ve sabit maliyetler olarak sınıflandırılabilir. Değişken maliyetler, tüketimdeki artıştan kaynaklanan artan maliyetler olarak kabul edilebilirler. Bu yüzden, örneğin değişken maliyetler araç kullanıcılarının yıllık araç kullanım mesafelerini düşürmeleri gibi tüketimdeki azalmayla azalabilecek maliyetleri yansıtırlar. Sabit maliyetler, ekipman, bina ya da arazi maliyetleri gibi kaçınılmaz maliyetler olup tüketim miktarından etkilenmezler (Bakırcı, 2005).

Ulaştırma sisteminin planlanması aşamasında, işletim sırasında karşılaşılabilecek maliyetlerin tanımlanması ve analiz edilmesi gerekmektedir. Karayolu ulaşımında işletme maliyetleri; taşıt işletme maliyeti, emisyon maliyeti, zaman kaybı maliyeti ve yol güvenliği maliyeti şeklindedir. Bu işletme maliyetlerinin ayrı ayrı belirlenmesi ve bunların etkilerinin değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Dünya Bankası tarafından yol projelerinin yapım ve işletim maliyetlerinin değerlendirilmesi amacıyla HDM-4 yazılımı geliştirilmiştir ve bu yazılım birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yazılımın Dünya Bankası tarafından tanıtılması sonucunda, projelerin ömür döngü maliyet analizi ile değerlendirilmesi uluslararası düzeyde önemli hale gelmiştir. Ömür döngü maliyet analizi gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yaygın olarak kabul görmektedir (Ozbay vd., 2004). Ömür döngü maliyet analizi genel tanımıyla, bir projenin ekonomik verimliliğini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir değerlendirme yöntemidir. Bu yöntemde önemli olan bu maliyetlerin en aza indirilebilmesine yönelik değerlendirmeler yapılmasıdır (Yüksekli, 2006). HDM-4 yazılımı; gelişmiş ve gelişmekte olan 100’den fazla ülkede kullanılmaktadır. Güney Afrika’da 2005 yılında tüm ulaştırma projeleri için ömür döngü maliyet analizlerini içermesi gerektiği konusunda bir politika kararı alınmıştır. Ayrıca, HDM-4 yazılımının ömür döngü maliyet analizi için kullanılması gerektiğine de karar verilmiştir (Burger vd., 2008).

Bu çalışmada HDM-4 yazılımı kullanılarak, yazılım parametrelerindeki değişimin işletme maliyetine etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, parametre değişiminin etkisi projelendirilmiş bir yol güzergahı için belirlenerek, taşıt işletme, çevresel

etkiler ve yol geometrik özelliklerine ilişkin kullanılan parametrelerin karayolu işletme maliyetine olan etkisi ortaya konulmuştur.

2. KARAYOLU İŞLETME MALİYETLERİ

HDM-4 yazılımında karayolu işletme maliyetleri; taşıt işletme maliyetleri, emisyon maliyetleri, yol güvenliği maliyetleri ve zaman kaybı maliyetleri olmak üzere dört ana başlıkta incelenebilir. Zaniwski vd, 1982 yılında Dünya Bankası ve Brezilya hükümeti için yaptığı çalışmada karayolu yapımı ve işletimine ilişkin maliyetleri incelemiştir (Zaniwski vd., 1982).

2.1. Taşıt İşletme Maliyetleri

Bir taşıtın işletme maliyeti, seyirden bağımsız olan sabit harcamaların yanısıra yakıt, yağ, lastik, bakım-onarım gibi taşıtın hareketi ile ortaya çıkan bazı harcamalardan oluşur. Taşıtın hareketi sonucu ortaya çıkan harcamalar ile yolun fiziki ve geometrik özellikleri arasında çok yakın bir ilişki vardır. Bir yolun ekonomik şekilde planlandığını öne sürebilmek için yolu kullanan taşıtların seyir ile ilgili işletme maliyetlerinin de mümkün olduğunca düşük olması gerekmektedir. Taşıt işletme maliyetleri genel olarak 4 başlıkta incelenebilir; yakıt maliyeti, yağ maliyeti, lastik maliyeti ve bakım-onarım maliyeti.

Bir aracın yakıt maliyeti; boyuna eğim, kaplama cinsi ve durumu, yatay kurbalar ve yoldaki trafik durumu gibi faktörlere bağlıdır. Yapılan çalışmalarda, rijit üst yapının esnek üst yapıya oranla yakıt tüketimi açısından daha ekonomik olduğu gözlemlenmiştir.

Motor yağı, şanzıman yağı, fren hidrolik yağı gibi bileşimler araç motorunun ve aktarma organlarının problemsiz çalışmasını sağlamaktadır. Bu yağların tüketimi; aracın kullanımına, trafik özelliklerine (akışkan, sıkışık vs.) ve yol karakteristik özelliklerine (boyuna eğim, kurp sayısı vs.) bağlı olarak değişmektedir.

Lastik maliyeti; lastiğin teknolojisi, taşıtın hızı, yol kaplamasının cinsi ve bakım standartları, yükleme durumu, ani ve aşırı düzensiz frenleme, küçük yatay kurp yarıçapları gibi faktörler nedeniyle lastiğin deforme olmasından kaynaklanan maliyettir. Örneğin kaplama cinsine göre, yuvarlanma direnci bakımından rijit üst yapının esnek üst yapıya oranla daha uygun bir kaplama olduğu gözlemlenmiştir. Gelişen teknoloji ve lastik tasarımlarındaki gelişmeler lastik maliyetini azaltmaya yönelik süregelmektedir.

Bakım ve onarım maliyeti; taşıt işletme maliyetleri arasında önemli bir kısmı oluşturmaktayken, hassas bir şekilde hesaplanması zor olmaktadır. Bireysel araçlarda masraflar

araç sahibine ve araç ruhsat koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. Genel taşıt sınıfları için güncel bakım ve onarım masraflarını tahmin edebilmek için araç parçaları ve işçilik maliyetleri gibi bazı bilgi ve yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2. Emisyon Maliyetleri

Geçmiş yıllarda emisyon salınımı konusunda yapılan çalışmalarda hafif ve ağır taşıtlar arasında önemli farklılıklar olduğu görülmüştür. Hafif taşıtlar için en iyi emisyon modellemesi Kunselman ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Model, 18 farklı hafif taşıt grubu ve düşük rakımlı kentler için tasarlanmıştır. Ağır taşıtlar için emisyon modellemesine ilişkin tatmin edici pek fazla çalışma bulunmamakla beraber iki çalışma ön plana çıkmaktadır. Güney Batı Araştırma Enstitüsü emisyonla alakalı önemli miktarda veri elde etmiş ama bunlar daha çok emisyon sertifika prosedürlerinin gelişimi ve test edilmesi için elde edilmiştir (Zaniewski vd., 1982).

Emisyon salınımının modellenmesinde ortalama hız, tekil emisyon faktörleri, yakıt tüketimi gibi yaklaşımlardan faydalanılmaktadır. Ortalama hız yaklaşımında taşıt tipi ve emisyon bileşimi için ortalama hız ve emisyon düzeyi (gr/taşıt-km) arasındaki ilişkiyi değerlendirmektedir. Toplam emisyon seviyesi hız ve toplam yolculuk uzunluğu ile çarpılarak elde edilir. Tekil emisyon faktörleri yaklaşımında sürüş etkileri göz ardı edilmektedir. Emisyon miktarının hesaplanmasında farklı taşıt tiplerinin yolculuk miktarları kullanılmaktadır. Yakıt tüketimi yaklaşımında ise emisyon miktarı yol koşulları, geometrik tasarım ve motor fonksiyonlarının değişimine bağlı olarak hesaplanmaktadır (Narwal, 2016). Çalışmada kullanılan HDM-4 programı emisyon hesabında yakıt tüketimi yaklaşımına dayanarak hesap yapmaktadır.

2.3. Yol Güvenliği Maliyetleri

Yol güvenliği maliyetleri, karayolunda meydana gelen kazaların neden olduğu maddi ve manevi maliyetler olarak ifade edilebilir. Yol güvenliği maliyetinin hesabı, kullanılan yolun tabaka koşulları ve meydana gelen kaza sayıları arasında ilişki kurulabilmesi açısından önemlidir. Günümüzde gerçekleşen kazaların büyük çoğunluğu aşırı hızdan kaynaklanmaktadır. Sürücüler çeşitli unsurlara bağlı olarak kendilerini güvende hissettikleri hızlarda araç kullanmaktadırlar. Hız ile trafik kazaları arasında üç farklı ilişki bulunmaktadır. Birincisi; hızın yol üzerindeki kullanıcılara tepki vermek için ihtiyaç duyduğu süreyi doğrudan etkilemesidir. İkincisi; yol üzerindeki taşıtlar arasında veya bu taşıtlar ile yol kenarındaki

nesneler arasındaki hız farklılıklarının çarpışma olasılığını etkilemesidir. Üçüncüsü; çarpışma olduğunda yüksek hızın ciddi manada maddi ve manevi hasarlara yol açmasıdır. Kısacası karayolu trafiğindeki kayıplarda hız, hem kaza olma ihtimalini arttırmakta hem de bunlardan kaynaklanan kayıpların derecesini etkileyen kilit etmenlerden biri olarak tanımlanmaktadır (KGM, 2014).

2.4. Zaman Kaybı Maliyetleri

Trafik tıkanıkları gibi nedenlerden kaynaklanan zaman kayıpları, yol kullanıcılarına tünel, köprü ve otoyol gibi yapılarda geçiş ücreti olarak yansımaktadır. Fiyatlandırmayı etkilemekte ve genellikle trafik sıkışıklığı maliyetlerinin vergilendirilmesi yoluyla yönetilmektedir (Zaniewski vd., 1982).

Zaman kaybı maliyeti ulaştırmanın işletme maliyetleri içerisindeki en büyük maliyetlerden biri olup zaman kaybı maliyetinden tasarruf etmek altyapı yatırımlarının hayata geçirilmesindeki en önemli gerekçelerden biridir. Seyahat süresi, seyahat konforu ve seyahat güvenilirliği zaman kaybı maliyetini belirleyen niceliklerdir (VTPI, 2018).

Seyahat süresi değerleri, ulaştırma planlaması ve proje değerlendirmesi açısından önemli bir faktördür. Bu değerler seyahat sistemi değişikliğine sebep olan seyahat davranışları üzerindeki etkileri tahmin edebilmek için kullanılır. Seyahat süresi tasarrufları, yeni otoyol yapımı ya da yol genişletmesi gibi ulaşım gelişim projelerinin uygulanmasıyla elde edilen büyük kazançtır. Sonuç olarak seyahat süresi değerlendirmesi sonuçlara etki eden önemli bir faktördür. Seyahat süresinin tek bir yöntemle tek bir değişkenle ölçülmesi bazı durumlarda projenin uygun maliyetli olduğu sonucunu ortaya çıkarsa da farklı yöntemlerle ve farklı bakış açılarıyla yeniden ölçülerek yapılan çalışmada bu proje uygun maliyetli olmayabilir. Ulaşım planlama ve değerlendirme modellerle geliştirilen seyahat süresi değerleri, daha hassas analizler yapabilmeyi ve daha uygun maliyetli çözümler üretmeyi sağlayabilir. Seyahat süresi birim maliyetleri genellikle ortalama ücretlere dayanarak hesaplanmaktadır. Kişisel seyahat süresi değerleri, çalışma ücretinin %25 ila %50'si arasında değişmektedir (Tranter, 2004).

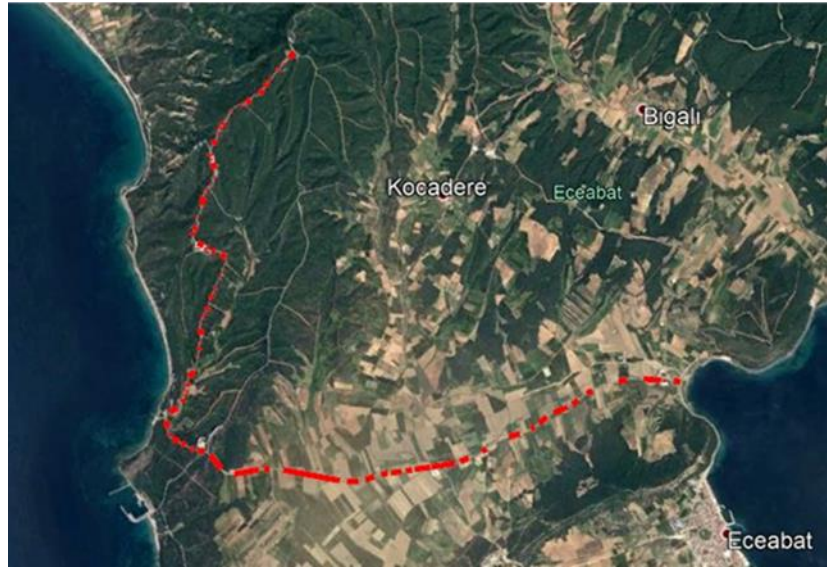
3. KARAYOLU İŞLETME MALİYETİ HESABI: GELİBOLU-ECEABAT-ABİDE VE ANIT DEVLET YOLU ÖRNEĞİ

Bu çalışmada, “Gelibolu-Eceabat-Abide ve Anıt Devlet Yolu-3. Kısım” projesi örneğinde taşıt işletme, çevresel etkiler ve yol geometrik özelliklerine ilişkin kullanılan parametrelerin yol işletme maliyetine olan etkileri incelenmiştir.

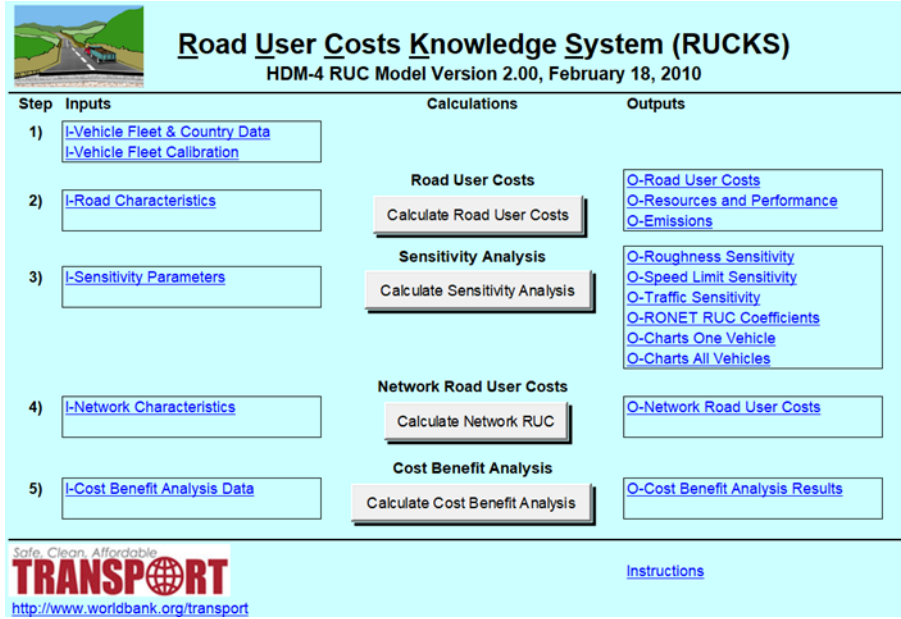
Tablo 1. Proje bilgileri

Km	0+000,00 – 13+594,15
Yolun sınıfı	2x1 bölünmemiş yol
Platform genişliği	5,00 – 8,00 m
Şerit sayısı	2x1
Şerit genişliği	3,00 m
Orta refüj genişliği	Yok
Tretuvar	Yok
Banket genişliği	1,00 m
Geçiş eğrisi (klotoid)	Var
Proje hızı	Ortalama 50 km/saat
Maksimum boyuna eğim	%8,00
Kamulaştırma genişliği	Projenin gerektirdiği kadar
Üst yapı cinsi	Bitümlü Sıcak Karışım
Tırmanma şeridi	Yok

Bu devlet yolunun uzunluğu 13,59 km olup 2x1 şeritli bölünmemiş yol olarak projelendirilmiştir. Proje ile ilgili geometrik standartlar Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 1’de projenin konumu hava fotoğrafında gösterilmiştir.



Şekil 1. Gelibolu-Eceabat-Abide ve Anıt Devlet Yolu konumu



Şekil 2. HDM-4 yazılımı arayüzü

Şekil 2’de arayüzü gösterilen HDM-4 yazılımı ile yol kullanıcı maliyetleri analizi 5 adımda tamamlanmaktadır. Bu adımlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. “Vehicle Fleet & Country Data” hücrelerine araç filo birim maliyetleri ve araç karakteristik özellikleri girilir. Değerlendirme yapılması istenilmeyen araç tipinin “New Vehicle” hücrelerine sıfır yazılır.

2. “Vehicle Fleet Calibration” hücrelerinde tüm araç filolarının parametreleri ayarlanır.

3. “Road Characteristics” hücreleri içerisinde yolun karakteristik özellikleri belirlenir.

4. “Calculate Road User Costs” butonuna tıklanıldığında Yol Kullanıcı Maliyetleri ve emisyonları hesaplatılır.

5. “Road User Costs” sekmesi kullanılarak birim yol kullanıcı maliyetleri ve hızlar görüntülenebilir. “Resources and Performance” sekmesinde ise kaynak tüketimi ve araç performansını gözlemlenmektedir. Son olarak “Emissions” sekmesi de hesaplanan emisyon değerlerini göstermektedir.

HDM-4 yazılımı; ekonomik, teknolojik ve iklimsel olarak farklı olan 100’den fazla ülkede kullanılmaktadır. Yazılım gelecekteki değişimleri simüle etme imkânı sağladığından dolayı sonuçların güvenilirliği iki temel hususa bağlıdır. Bunlar:

- Model girdilerinin mevcut durumdaki gerçek koşulları iyi derecede yansıtabilir olması ve,
- Model tahminlerinin çeşitli koşullar altında gerçek davranışlara iyi derecede uyumlu olmasıdır.

Bu nedenle, analiz yapılmadan önce ilgili bölgenin mevcut durum koşullarına göre yazılımın kalibre edilmesi gerekmektedir (Das vd, 2013).

3.1. Uygulama Girdileri

“Gelibolu-Eceabat-Abide ve Anıt Devlet Yolu-3. Kısım” projesi için Çanakkale il sınırlarında yer alan bölge ile ilgili bilgiler uygulama girdileri olarak kullanılmıştır. Uygulama girdileri, seyahat süresi, emisyon değerleri, yol güvenliği, yol geometrisi gibi verileri içermektedir. Yol kullanıcı maliyetlerinin tam olarak hesaplanabilmesi için öncelikle seyahat süresi maliyetlerinin belirlenebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Çanakkale bölgesi için otobüs ile seyahat bazında seyahat süresi değerleri hesaplanmıştır.

TÜİK’den elde edilen bilgilere göre; Türkiye genelinde 15 ve üzeri yaşındakiler arasında 2015 yılı Haziran döneminde işsiz sayısı 2 milyon 880 bin kişi ve işsizlik oranı ise %9,6 seviyesinde gerçekleşmiştir. Aynı dönemde işgücü sayısı 30 milyon 141 bin kişi, işgücüne katılma oranı ise %52,1 olarak belirlenmiştir. Buna göre, Türkiye’deki çalışan sayısı;

$$\text{Çalışan Sayısı} = \text{Nüfus} * \text{İş gücüne katılım oranı} * (1 - \text{İşsizlik oranı})$$

Çalışan sayısı = $78.741.053 * (\%52,1) * (1 - \%9,6) = 37.085.776$ kişi olarak hesaplanmıştır.

Çanakkale şehri Balıkesir şehri ile birlikte, TÜİK İstatistik Bölge Birimleri Sınıflaması 2. Düzey TR22 bölgesinde yer almaktadır. Bu bölge için çalışan sayılarının Türkiye toplamı içindeki payı 2011 yılında %1,77 olarak belirlenmiştir. Bu durumda bölgedeki toplam çalışan nüfusu $37.085.776 * 0,0177 = 656.418$ olarak bulunmaktadır. Bölgedeki toplam nüfus ise 1.665.089’dur. Buna göre, ortalama çalışan yüzdesi $656.418/1.665.089 = \%39,4$ olarak hesaplanmaktadır.

TÜİK verilerine göre TR22 istatistik bölgesinde kişi başına gayri safi katma değer 2011 yılında 8.954 \$ olarak gerçekleşmiştir. Buna göre bölgenin toplam gayri safi katma değeri $8.954 * 1.665.089 = 14.909.206.000$ \$ olarak bulunmaktadır. 2011 yılı döviz kuru için 1 Amerikan

doları ortalama 1,678 Türk Lirası olarak alınır, bölgenin toplam gayri safi katma değeri $14.909.206.000 * 1,678 = 25.017.647.668$ TL olmaktadır.

Tablo 2’de TR22 istatistiki bölgesi için otobüsle seyahat süresi değerinin belirlenmesine yönelik işlemler adım adım gösterilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi, otobüs ile seyahat süresi değeri, çalışma saatleri içinde 9,85 TL/saat ve dışında 2,22 TL/saat olarak bulunmuştur. Bu değerler kullanılarak Tablo 3’de diğer taşıt türleri için seyahat süresi değerleri belirlenmiştir.

Tablo 2. Otobüsle seyahat süresi değerinin belirlenmesi

Parametre	Formül	Birim	Miktar
Haneye düşen G.S.K.D (%70) (D)	$D = A * 0,70$	TL	17.512.352.000
Çalışan Ortalama Geliri (E)	$E = (D/B)/C$	TL/Yıl	26.693
Çalışan Ortalama Geliri (saat) (F)	$F = E/3120$	TL/Saat	7,41
Seyahat süresi değeri (G) (Çalışma saatleri içindeki değer)	$G = F * 1,33$	TL/Saat	9,85
Seyahat süresi değeri (G) (Çalışma saatleri dışındaki değer)	$G = F * 0,30$	TL/Saat	2,22
<i>A = Gayri Safi Katma Değer (G.S.K.D); B = Bölge nüfusu; C = Çalışan yüzdesi</i>			

Tablo 3. Diğer taşıt türleri için seyahat süresi değerleri

		Çalışma Saatleri İçinde (TL/saat)	Çalışma Saatleri Dışında (TL/saat)
Otobüs	Otobüs * 1,00	9,85	2,22
Mini Otobüs	Otobüs * 1,20	11,82	2,66
İki Tekerlekli	Otobüs * 1,40	13,79	3,11
Araba	Otobüs * 1,75	17,24	3,88
Üç Tekerlekli	Araba * 0,70	12,07	4,07

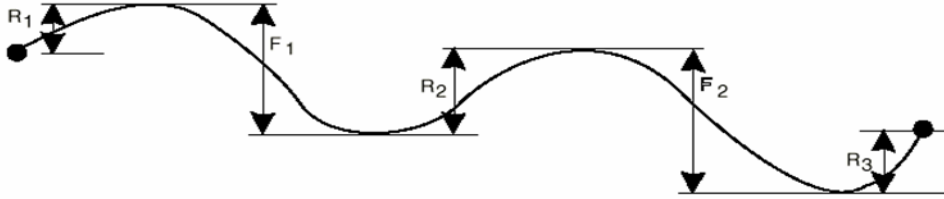
Seyahat süresi maliyetinin yanı sıra emisyon maliyeti de hesaplanmalıdır. Yakıt tüketimine bağlı olarak değişen zararlı bileşenlerin insan sağlığı için zararları belli bir maliyet ile ifade edilmektedir. Bu çalışmada girdi olarak CO2 salınım maliyeti kullanılmıştır. Her bir kilo CO2 salınımının insan sağlığına etkisi 0,02 \$ olarak alınmıştır. Buna göre, ülkemiz için CO2 emisyonunun birim fiyatı $20 \text{ \$/ton} * 1,678 \text{ (2011 kuru)} = 33,56 \text{ TL/ton}$ olarak hesaplanmıştır.

Yol güvenliği maliyeti girdisi yine 2011 yılı TÜİK verilerine göre ülkemizde 1.228.928 tane trafik kazası gerçekleşmiştir. Bu kazalarda 238.074 kişi yaralanırken 3.835 kişi ise hayatını kaybetmiştir. Buna göre, yaralanma ve ölüm oranları 1/62 olarak elde edilmiştir. Kişi başına gayri safi katma değer $8.954 * 1,678 = 15.025 \text{ TL}$ ve bir insanın ortalama yaşam süresi 75 yıl alınarak yol güvenliği maliyeti girdileri Tablo 4’de hesaplanmıştır.

Tablo 4. Yol güvenliği maliyeti girdileri

Gayri Safi Katma Değer (TL/kişi)	15.025
Yaşam süresi (yıl)	75
Yaralanma maliyetinin ölüm maliyetine oranı	%25
Ölüm maliyeti (TL/ölüm)	1.126.875
Ciddi yaralanma maliyeti (TL/yaralanma)	281.718

Yol karakteristikleri kısmındaki yol geometrisi ile ilgili bilgileri girebilmek için ilgili projenin yatay ve düşey planlarından faydalanılmıştır. Öncelikle projedeki toplam düşey kot artışlarının ve azalmalarının toplamını ifade eden “Rise&Fall (m/km)” değeri hesaplanmıştır. Şekil 3’de düşey kot artış ve azalmaları şematik olarak gösterilmiştir. Buna göre “Rise & Fall (m/km)” değeri; $Rise\&Fall = (R_1+R_2+R_3+F_1+F_2)/Uzunluk$ (m/km) bağıntısıyla elde edilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan proje için, “Rise&Fall” değeri 22,21 (m/km) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Rise&Fall şematik gösterimi

Diğer taraftan, yatay kurpların eğrilik açıları toplamının toplam yol uzunluğuna bölünmesiyle elde edilen “Horizontal Curvature (derece/km)” değeri de yol geometrisi girdisi olarak kullanılmaktadır. Şekil 4’de yatay kurpların geometrisi şematik olarak gösterilmiştir. Buna göre “Horizontal Curvature (derece/km)” değeri; $Horizontal\ Curvature = (C_1+C_2+C_3+C_4) / Uzunluk$ (derece/km) bağıntısıyla elde edilmektedir. İlgili proje için, “Horizontal Curvature” değeri ise 63,23 (derece/km) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Horizontal Curvature şematik gösterimi

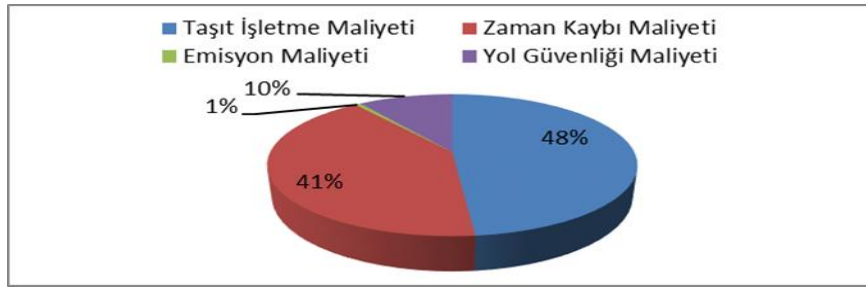
Son olarak, ilgili projeye ait yol trafik bilgileri girilmiştir. Belirlenen Yıllık Ortalama Günlük Trafik (YOGT) değerleri; 1 treyler, 81 kamyon, 130 otobüs, 1 orta yüklü ticari taşıt ve

445 otomobil şeklindedir. Gelecek yıllar için öngörülen trafik artış oranları, treyler ve kamyon için %4, otobüs, orta yüklü ticari taşıt ve otomobil için %5 olarak kabul edilmiştir. Taşıt eşdeğerlik faktörü olarak treyler için 4,10, kamyon için 2,90, otobüs için 3,20, orta yüklü ticari taşıt için 0,60 ve otomobil için 0,0006 olarak kabul edilmiştir.

3.2. Uygulama Çıktıları

Program girdilerini belirledikten sonra programın arayüzünde de gösterilen "Calculate Road User" butonuna basılarak maliyetler elde edilmiştir. Bu maliyetler; yol kullanıcı maliyetleri, kaynaklar ve taşıt performansları ve emisyon miktarları olmak üzere üç başlıkta analiz edilmiştir.

Şekil 5'e göre toplam yol kullanıcı maliyetlerinin %48,4'ünü taşıt işletme maliyetlerinin %41,2'sinin zaman kaybı maliyetinin %9,9'nun yol güvenliği maliyetinin ve %0,6'nın emisyon maliyetinin oluşturduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. Toplam yol kullanıcı maliyetleri yüzdeleri

Yol kullanıcı maliyetleri; taşıt işletme maliyetleri, zaman kaybı maliyeti emisyon maliyeti ve yol güvenliği maliyetlerinin toplamı şeklinde gösterilmiştir. Taşıt filosundaki herhangi bir aracın 1 km'lik seyahati boyunca kullanıcıya yansıyan taşıt işletme giderleri 0,910 TL/taşıt-km, zaman kaybı maliyeti 0,774 TL/taşıt-km, emisyon maliyeti 0,011 TL/taşıt-km ve yol güvenliği maliyeti 0,186 TL/taşıt-km olarak hesaplanarak toplam taşıt filosunun yol kullanıcı maliyeti 1,881 olarak bulunmuştur (Tablo 5).

Tablo 5. Yol kullanıcı maliyetleri (HDM-4)

Maliyetler	Otomobil	Orta Yüklü Ticari Taşıt	Kamyon	Tır	Otobüs	Ortalama Taşıt Filosu
Yol Kullanıcı Maliyetleri (TL/taşıt-km)	1,159	1,130	1,718	2,893	4,451	1,881
Taşıt İşletme Maliyeti (TL/taşıt-km)	0,691	0,794	1,427	2,639	1,323	0,910
Yakıt (TL/taşıt-km)	0,495	0,529	0,871	1,710	0,757	0,595
Yağlar (TL/taşıt-km)	0,006	0,008	0,016	0,032	0,017	0,009
Tekerlek (TL/taşıt-km)	0,006	0,011	0,037	0,082	0,030	0,015
Bakım Parçaları (TL/taşıt-km)	0,052	0,055	0,177	0,415	0,141	0,086
Bakım İşi (TL/taşıt-km)	0,010	0,008	0,081	0,110	0,066	0,030
Ekip Zaman Maliyeti (TL/taşıt-km)	0,000	0,040	0,073	0,071	0,075	0,024
Amortisman (TL/taşıt-km)	0,095	0,105	0,108	0,139	0,156	0,108
Faiz (TL/taşıt-km)	0,027	0,027	0,035	0,057	0,055	0,034
Genel Masraflar (TL/taşıt-km)	0,000	0,011	0,029	0,024	0,026	0,009
Zaman Maliyetinin Değeri (TL/taşıt-km)	0,270	0,082	0,028	0,027	2,976	0,774
Yolcu Süresi (TL/taşıt-km)	0,270	0,082	0,027	0,026	2,976	0,774
Yük Süresi (TL/taşıt-km)	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000
Emisyon Maliyeti (TL/taşıt-km)	0,008	0,010	0,019	0,037	0,016	0,011
Yol Güvenliği Maliyeti (TL/taşıt-km)	0,190	0,244	0,244	0,190	0,136	0,186
Yol Kullanıcı Maliyetleri (%)	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Taşıt İşletme Maliyeti (%)	59,6%	70,3%	83,0%	91,2%	29,7%	48,4%
Zaman Maliyetinin Değeri (%)	23,3%	7,2%	1,7%	0,9%	66,9%	41,2%
Emisyon Maliyeti (%)	0,7%	0,9%	1,1%	1,3%	0,4%	0,6%
Yol Güvenliği Maliyeti (%)	16,4%	21,6%	14,2%	6,6%	3,0%	9,9%
Taşıt Hızı (km/sa)	103,2	99,4	81,6	84,6	80,1	99,8
Günlük Trafik (taşıt/gün)	445	1	81	1	130	658

Tablo 6. Taşıt işletme maliyetleri (HDM-4)

Maliyetler	Otomobil	Orta Yüklü Ticari Taşıt	Kamyon	Tır	Otobüs
Taşıt İşletme Maliyeti					
Yakıt (litre)	103,12	110,20	212,40	416,96	184,54
Yağlar (litre)	0,69	0,98	2,01	3,98	2,14
Tekerlek (yeni bir lastik fiyatının %'si)	1,44%	1,75%	1,15%	1,17%	1,10%
Bakım Parçaları (yeni araç maliyetinin %'si)	0,20%	0,14%	0,22%	0,26%	0,10%
Bakım İşi (saat)	2,58	2,10	10,13	13,72	8,27
Ekip Zaman Maliyeti (saat)		10,06	12,25	11,82	12,49
Amortisman (yeni araç maliyetinin %'si)	0,37%	0,27%	0,14%	0,09%	0,11%
Faiz (yeni araç maliyetinin %'si)	0,11%	0,07%	0,04%	0,04%	0,04%
Zaman Maliyetinin Değeri					
Yolcu Süresi (saat/yolcu)	9,7	10,1	12,2	11,8	12,5
Yük Süresi (saat/taşıt)	9,7	10,1	12,2	11,8	12,5
Yakıt Tüketimi (km/litre)	9,7	9,07	4,71	2,40	5,42
Yağ Tüketimi (km/litre)	1452	1022	498	252	468
Tekerlek Ömrü (km)	69224	57025	87054	85657	90813

Tablo 6’da yol kullanıcı maliyetlerinin büyük kısmını oluşturan taşıt işletme maliyetleri görülmektedir. Her 1000 taşıtın 1 km’lik seyahati boyunca tükettiği kaynaklar gösterilmiştir. Yakıt tüketimi bu maliyetler içerisindeki en önemli maliyettir. Ağır taşıtların taşıt işletme maliyetlerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 7’de salınım yapılan bileşenlerin miktarları görülmektedir. En fazla miktarda salınımı CO2 bileşeninin yaptığı ve diğer bileşenlerin ise göz ardı edilecek kadar az miktarda salınım yaptıkları tespit edilmiştir.

Tablo 7. Emisyon maliyetleri (HDM-4)

	Otomobil	Orta Yüklü Ticari Taşıt	Kamyon	Tır	Otobüs	
Taşıt Hızı (km/sa)	103,2	99,4	81,6	84,6	80,1	
Taşıt Hızı (m/sn)	28,7	27,6	22,7	23,5	22,2	
Taşıt Ömrü (yıl)	10	10	11	11	10	
Yakıt Tüketimi (km/litre)	9,70	9,07	4,71	2,40	5,42	
Yakıt Tüketimi (mil/galon)	22,81	21,34	11,07	5,64	12,75	Emisyon Maliyetleri (TL/ton)
Yakıt Tüketimi (litre/100km)	10,31	11,02	21,24	41,70	18,45	
Yakıt Tüketimi (ml/sn)	2,96	3,04	4,82	9,80	4,10	
Karbondioksit - CO ₂ (g/km)	243,646	290,929	560,087	1099,489	487,183	33,6
Karbonmonoksit - CO (g/km)	1,211	1,122	2,233	4,383	1,879	0,0
Hidrokarbon - HC (g/km)	0,182	1,137	2,338	4,590	1,904	0,0
Nitrözoksit - NO _x (g/km)	1,551	4,030	8,175	16,048	6,749	0,0
Partiküller - Par (g/km)	0,011	0,224	0,447	0,877	0,376	0,0
Sülfürdioksit- SO ₂ (g/km)	0,077	0,948	1,827	3,586	1,587	0,0
Kurşun - Pb (g/km)	0,031	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0
Emisyon Maliyeti (TL/ton-km)	0,008	0,010	0,019	0,037	0,016	

3.3. Duyarlılık Analizleri

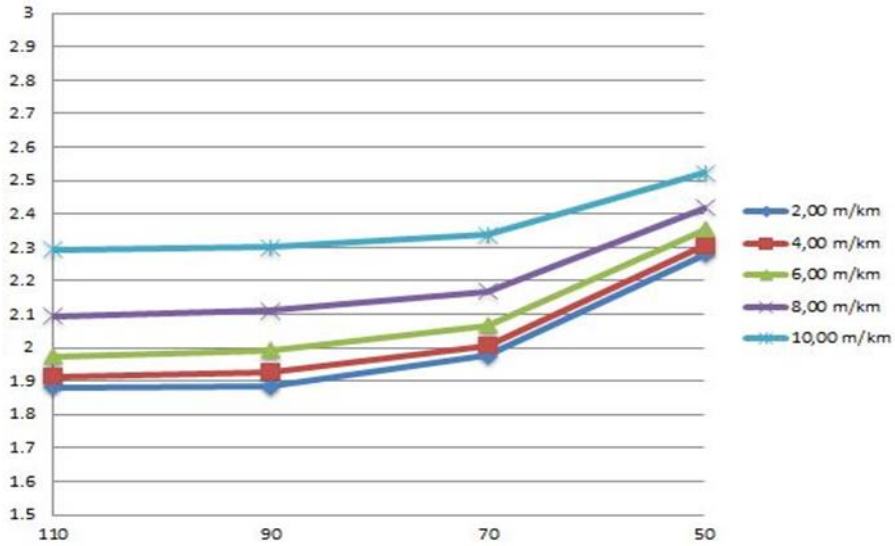
Bu bölümde kaplama pürüzlülüğü, trafik hacmi ve yol geometrik özellikleri parametrelerine bağlı olarak karayolu işletme maliyetlerinin değişimleri incelenmiştir. Bu parametrelerin taşıt hızları üzerindeki etkileri çok önemlidir. Taşıt hızları; emisyon düzeyi, trafik hacmi, yakıt tüketimi gibi faktörleri etkilemektedir. Dolayısıyla karayolu işletme maliyetlerinin hesaplanmasında belirleyici rol oynamaktadırlar.

Yol pürüzlülüğü yolun kaplama yüzeyinin karakteristik özelliklerini, kullanılan kaplamanın sürüş kalitesine etkilerini ve buna bağlı olarak yolun servis indeksini belirleyen bir parametredir. Yol pürüzlülüğü taşıt hızına etki eden önemli bir faktördür. Ayrıca fiziksel olarak taşıta doğrudan etkisi olduğu için bakım ve onarım maliyetini önemli ölçüde etki etmektedir. Tablo 8’de yol pürüzlülüğüne bağlı olarak yol kullanıcı maliyetleri görülmektedir. Uygulama

örneğinde pürüzlülük değeri 2.0 (m/km) kabul edilmiştir. Buna göre kullanıcı maliyeti 1,881 (\$/taşıt-km) olarak hesaplanmıştır. Plansız ve standartlara uygun olmayan yollarda kullanıma geçtiği yıldan itibaren çevresel etkilerden ve kapasitenin artmasıyla pürüzlülük değerinde artış görülmektedir.

Tablo 8. Farklı yol pürüzlülüğüne göre birim maliyetler (HDM-4) (TL/taşıt-km)

Yol Pürüzlülüğü (IRI, m/km)	Otomobil	Orta Yüklü Ticari Taşıt	Kamyon	Tır	Otobüs	Ortalama Taşıt Filosu
2,0	1,159	1,130	1,718	2,893	4,451	1,881
4,0	1,171	1,145	1,766	2,996	4,543	1,913
6,0	1,182	1,152	1,819	3,104	4,776	1,974
8,0	1,227	1,168	1,851	3,096	5,209	2,093
10,0	1,323	1,226	1,909	3,198	5,843	2,291
12,0	1,447	1,311	1,991	3,385	6,609	2,537
14,0	1,584	1,409	2,092	3,616	7,445	2,807
16,0	1,728	1,513	2,206	3,870	8,315	3,091
18,0	1,875	1,620	2,326	4,138	9,204	3,381
20,0	2,023	1,725	2,447	4,408	10,096	3,673



Şekil 6. Farklı hız ve pürüzlülük değerlerine göre yol kullanıcı maliyetleri

Şekil 6’da yol pürüzlülüğünün taşıt işletme maliyetine olan etkisi hedeflenen proje hızlarına göre incelenmiş olup yol pürüzlülüğünün artmasıyla ortalama taşıt filusunun yol kullanıcı maliyetlerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

Trafik hacmi, taşıt işletme hızlarına etki eden en büyük faktördür. Düşük hacim değerlerinde, taşıtların hızları da düşmektedir. Yoğun trafik hacminde taşıtların sürekli dur kalk yapması ya da düşük hızlarda seyir halinde olması taşıt işletme maliyetini arttırmaktadır. Ayrıca

trafik esnasında beklenen süre kaybedilen zaman olarak kullanıcıya zaman kaybı maliyeti olarak yansımaktadır. Tablo 9’da taşıt türlerinin YOGT değeri artışıyla birlikte değişen kullanıcı maliyetleri görülmektedir.

Tablo 9. Farklı YOGT değerlerinde birim maliyetler (HDM-4) (TL/taşıt-km)

Günlük Trafik (YOGT)	Otomobil	Orta Yüklü Ticari Taşıt	Kamyon	Tır	Otobüs	Ortalama Taşıt Filosu
5	1,159	1,130	1,718	2,893	4,451	1,881
20	1,159	1,130	1,718	2,893	4,451	1,881
65	1,159	1,130	1,718	2,893	4,451	1,881
200	1,159	1,130	1,718	2,893	4,451	1,881
650	1,159	1,130	1,718	2,893	4,451	1,881
2000	1,159	1,129	1,717	2,891	4,453	1,881
6500	1,152	1,106	1,693	2,834	4,539	1,890
20000	2,633	1,892	2,198	3,817	13,833	4,793
65000	2,633	1,892	2,198	3,817	13,833	4,793

Genel olarak taşıt sürücüleri yatay kurplarda yavaşlama eğiliminde bulunurlar. Kurp boyunca meydana gelen hız değişimleri sürücünün davranışına, taşıta ve yol standartlarına bağlıdır. Ayrıca yatay kurpların yuvarlanma direnci üzerinde etkisi olduğundan dolayı taşıt işletme maliyetini belirlemede bu standartların belirlenmesi önemlidir. Düşey kurp tasarımında ise yüksek eğimler taşıtın daha yüksek performansta çalışmasını ve hız değişimlerine sebep olduğundan yakıt tüketimini arttırmaktadır.

Yol kullanıcı maliyetlerinin yol geometrisi değişimlerine göre analizi için yatay kurp ve düşey kurp girdileri tüm değerler minimize edilerek tekrardan hesap yapılmıştır. Yeni durumda, 1 yıllık maliyet 4.546.000 TL olarak hesaplanmıştır. Yolun geometrik analizi yapılmadan önceki maliyetini ise aynı bağıntı kullanılarak 5.873.000 TL olarak hesaplanmıştır. Geometrik standartların iyileştirilmesiyle işletme maliyetinde yaklaşık 1,5 milyon TL azalma gözlemlenmiştir.

4. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Ülkemiz karayolu ağırlıklı, dengesiz bir ulaştırma sistemine sahiptir. İleride bu dengesizliği düzeltmek amacıyla planlar ve stratejiler belirlenmelidir. Bugün için ise, yapılacak en önemli çalışma, mevcut sistemin bilincinde olmak ve bu sistem içinde maliyetleri en aza indirebilme gayretini göstermektir. Bu da ancak sistemi kullanırken karşılanacak maliyetleri bilmekten geçmektedir. Bu da bunun gerekliliğine inanmak, hukuki ve mühendislik bağlamında sıkı tedbirler almak insan faktörünü de bu amaçtan haberdar etmekten geçmektedir.

Dolayısıyla, ülkemiz açısından karayolu maliyetlerinin analiz edilmesi ve azaltılmasına yönelik çalışmalar önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında; karayolu işletme maliyetleri incelenerek, bunları etkileyen faktörler örnek proje üzerinde değerlendirilmiştir. Buna göre; ağır taşıtların yakıt tüketimi, dolayısıyla taşıt işletme maliyetlerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. En fazla miktarda salınımı CO2 bileşeninin yaptığı ve diğer bileşenlerin ise göz ardı edilecek kadar az miktarda salınım yaptıkları tespit edilmiştir. Yol pürüzlülüğü taşıt hızına olumsuz olarak etki eden bir faktördür. Dolayısıyla, yol pürüzlülüğü arttıkça işletme maliyetleri artmaktadır. YOGT değerlerinin artması taşıt işletme maliyetlerini arttırmaktadır. Geometrik standartların iyileştirilmesi, karayolu işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Karayolu işletme maliyetleri açısından bakıldığında, mevcut ulaştırma altyapısının bakımı ve onarımının düzenli ve zamanında yapılması ülkemiz açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle, ülkemizde ulaştırma altyapı yönetim sistemi kurulması çalışmaları başlatılarak, bakım ve onarım için gerekli olan gerçekçi bütçenin belirlenmesi gerekmektedir. Mevcut ulaştırma altyapısının yeterli seviyede korunması sonucu taşıt işletme maliyetlerinin en aza indirgenebilmesi beklenmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada kaplama pürüzlülüğü, işletme hızı ve geometrik standartlara bağlı olarak karayolu işletme maliyetlerinin değişimleri incelenmiştir. Bu etkiler, düşük trafik hacmine sahip yol örneğinde değerlendirilirken, özellikle trafik hacminin yüksek olduğu yollarda geometrik standartların ve kaplama koşullarının iyileştirilmesiyle yol kullanıcı maliyetlerinde ciddi tasarrufların elde edilmesi kaçınılmazdır. Yol geometrik standartlarının iyileştirilmesiyle taşıt filosunun yol kullanıcı maliyeti 1,882 TL/taşıtkm'den 1,822 TL/taşıtkm'ye azalmıştır. Hızın artmasıyla taşıt işletme maliyetinde artış, zaman kaybı maliyetinde ise azalma gözlemlenmiştir. Taşıt işletme maliyeti 0,93 TL/taşıtkm, zaman kaybı maliyeti 0,69 TL/taşıtkm, emisyon maliyeti 0,01 TL/taşıtkm ve yol güvenliği maliyeti 0,18 TL/taşıtkm hesaplanmıştır. Yol geometrik standartlarının iyileştirilmeden önceki durumla karşılaştırıldığında, yol geometrik standartlarının değişiminin zaman kaybı maliyetine etkisinin en fazla olduğu tespit edilmiştir.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- Bakırcı, E. (2005). Taşıt işletme maliyetleri bileşenlerinin irdelenmesi tasarruf bakımının yerleştirilmesi. 6. *Ulaştırma Kongresi Bildiriler Kitabı*, 395-404.
- Burger, A. F. & Gryp, A. V. D. (2008). Implementing hdm-4 version 2 for project level life cycle cost analysis. *In Proceedings of 7th International Conference on Managing Pavement Assets*, Alberta, Canada.
- Das A., Bino, I. K. & Pradeep, J. (2013). Road user effects model calibration in hdm4 – a case study. *Proceedings of International Conference on Energy and Environment*, Kottayam, India.
- Karayolları Genel Müdürlüğü. (2014). *Karayollarında hız*. Ankara: Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı Ulaşım Etütleri Şubesi Müdürlüğü.
- Narwal, A. (2016). Review on vehicular emission models (hdm4). *International Journal of All Research Education and Scientific Methods*, 4(6), 44-49.
- Ozbay, K., Jawad, D., Parker, N. & Hussain, S. (2004). Life-cycle cost analysis: state of the practice versus state of the art. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1864(1), 62-70.
- Tranter, P. (2004). Effective speeds: Car costs are slowing us down. *Canberra, Australian Greenhouse Office, Department of the Environment and Heritage*, 1-18.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). <http://www.tuik.gov.tr/>
- Victoria Transport Policy Institute (2018). *Transportation cost and benefit analysis II – travel time costs*. Erişim Tarihi: 10 Eylül 2018, www.vtpi.org/tca/tca0502.pdf
- Yüksekli, A. U. (2006). *Trafik ve değişkenlerinin üstyapı maliyetlerine etkisinin ömür döngü maliyet analizi yöntemi ile incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). YTÜ, İstanbul.
- Zaniewski, J. P., Butler, B. G., Cunningham, G. & Machemehl, R. (1982). *Vehicle operating costs, fuel consumption, and pavement type condition factors* (Report No: FHWA-PL-82-001). United States: Federal Highway Administration.