

Sakaltutan Geçidi Yerine Önerilen Eğimsiz Tünelin Emisyon, Yakıt Tüketimi ve Ekonomik Analizi

Oğuz Kürşat DEMİRCİ^{1*}

¹ Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye
*¹ odemirci@erzincan.edu.tr

(Geliş/Received: 09/07/2025;

Kabul/Accepted: 29/09/2025)

Öz: Bu çalışma, D-100/E-80 üzerindeki 13 km'lik Sakaltutan Geçidi yerine 11,1 km, %0 eğimli bir tünelin çevresel ve ekonomik etkilerini nicel olarak değerlendirmektedir. COPERT 5.8.1 ile 5196 araçlık filo için hız, eğim, soğuk başlatma ve iklim çarpanları kullanılmış; $\pm 15\%$ genişletilmiş belirsizlik ve 10000 yinelemeli Monte Carlo analizi uygulanmıştır. Tünel senaryosu yakıt tüketimini günde 5041 L (-34%) ve CO_2 'yi $12,9 \text{ t gün}^{-1}$ ($\approx 4700 \text{ t yıl}^{-1}$) azaltır; NO_x emisyonunda -23% , PM'de -37% düşüş sağlar. Toplam yolculuk süresi 211 saat gün^{-1} azalır ve ekonomik fayda ≈ 108 milyon TL yıl^{-1} 'dir; karbonun parasal değeri eklendiğinde toplam $\approx 126,8$ milyon TL yıl^{-1} 'a çıkar. Net tasarruf olasılığı $99,4\%$ 'tür. Benzer tünel LCA'larıyla karşılaştırılan yapım aşaması gömülü emisyonları $10^5 \text{ t CO}_2\text{-eş.}$ mertebesinde; karbon geri ödeme süresi $\approx 10\text{--}20$ yıl olarak öngörülmüştür. Yatırım gideri dâhil basit geri ödeme, varsayılan yatırım gideri (CAPEX)'e bağlı olarak $\approx 24\text{--}39$ yıl aralığındadır. Sonuçlar, özellikle ağır hizmet araçları kaynaklı kazanımların belirgin olduğunu ve tünelin iklim/ekonomi açısından güçlü bir seçenek sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Sakaltutan Tüneli, COPERT 5, yakıt tüketimi, egzoz emisyonları, ekonomik analiz.

Emission, Fuel Consumption and Economic Analysis of Level Tunnel Proposed to Replace the Sakaltutan Pass

Abstract: This study quantitatively evaluates the environmental and economic effects of replacing the 13-km Sakaltutan Pass on the D-100/E-80 corridor with an 11.1-km, zero-gradient tunnel. Using COPERT 5.8.1 for a 5196-vehicle fleet, we apply speed, grade, cold-start and climate multipliers; assess $\pm 15\%$ expanded uncertainty; and run 10000-iteration Monte Carlo simulations. The tunnel scenario reduces fuel use by 5041 L day^{-1} (-34%) and CO_2 by 12.9 t day^{-1} ($\approx 4700 \text{ t yr}^{-1}$); NO_x falls by 23%, and PM by 37%. Aggregate travel time declines by 211 h day^{-1} , yielding ≈ 108 million TL yr^{-1} in economic benefits, rising to ≈ 126.8 million TL yr^{-1} when carbon valuation is included. The probability of net savings is 99.4%. Benchmarking against comparable tunnel LCAs indicates construction-phase embodied emissions on the order of $10^5 \text{ t CO}_2\text{-eq}$, implying a carbon payback of $\approx 10\text{--}20$ years. Including capital expenditure, the simple payback ranges $\approx 24\text{--}39$ years, depending on CAPEX. The gains are especially pronounced for heavy-duty vehicles. Overall, the tunnel emerges as a robust option with substantial operational emission and time savings and clear long-term climate and economic value.

Keywords: Sakaltutan Tunnel, COPERT 5, fuel consumption, exhaust emissions, economic analysis.

1. Giriş

Fırat Karayolu taşımacılığı, Türkiye'nin toplam sera gazı envanterinde enerji sektöründen sonra ikinci sırada yer almakta; CO_2 , CO, NO_x , toplam hidrokarbon (THC) ve partikül madde (PM) gibi kirleticilerin yayılmasında başat rol oynamaktadır [1]. Avrupa Çevre Ajansı'nın (EEA) standart envanter modeli COPERT (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport) hem AB üyesi ülkelerde hem de Türkiye Ulusal Emisyon Envanterinde resmî metodoloji olarak kullanılmaktadır. Modelin en güncel sürümü olan 5.8.1 (Eylül 2024) ile Euro VI binek ve Euro VI CNG/LNG (sıkıştırılmış/sıvılaştırılmış doğal gaz) ağır taşıt sınıfları için emisyon katsayıları güncellenmiştir [2].

Dağlık güzergâhlarda pozitif eğim (%), irtifa artışı(m) ve düşük sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) kombinasyonu, motor yükünü artırarak yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını belirgin biçimde yükseltir. Ağır taşıtlar için 5% 'lik ek eğim, yakıt tüketiminde düz yol koşullarına kıyasla ortalama $40\text{--}140\%$ artışa sebep olabilmektedir [3]. EEA'nın COPERT eğim modülü özellikle Euro IV ve öncesi ağır dizel araçlarda eğimin NO_x ve PM emisyonlarını doğrusal olmayan biçimde büyüttüğünü vurgular [4].

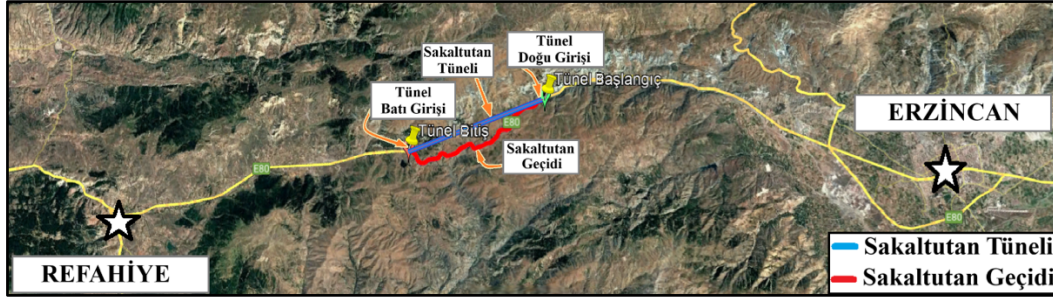
* Sorumlu yazar: odemirci@erzincan.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: ¹0000-0003-1572-2607

Erzincan ili ile Refahiye ilçesini bağlayan Devlet Yolu D-100/E-80 üzerindeki Sakaltutan Geçidi, 2162 m rakımı ve %18,2'ye ulaşan maksimum eğimiyle Doğu Anadolu'nun en zorlu geçitlerinden biridir. Kış aylarında yoğun kar ve buzlanma nedeniyle yol kapanmaları sık yaşanır [5]. Şekil 1'de Sakaltutan geçidi güzergahının yol, irtifa, uzunluk ve eğim profili verilmiştir.



Şekil 1. Sakaltutan Geçidi mevcut güzergahının yol, irtifa, uzunluk ve eğim profili.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 1991-2020 iklim normallerine göre Erzincan havzasında yıllık ortalama sıcaklık 11 °C olup, yılda ortalama 102 yağışlı günün yaklaşık yarısında kar yağışı gözlenmektedir [6]. Bu koşullar, geçitten her gün geçen taşıtların yakıt ve emisyon profilini ağırlaştırmaktadır. Şekil 2'de Sakaltutan geçidi ve bu çalışmada yapım-inşa önerisinde bulunulan Sakaltutan Tüneli güzergahı verilmiştir.



Şekil 2. Sakaltutan Geçidi mevcut yolu ve yapılması önerilen Sakaltutan Tüneli'nin coğrafi görünümü.

Artan trafik hacmi ve sert iklim koşulları, güzergahın geometrik olarak iyileştirilmiş bir tünel ile geçilmesini gündeme getirmiştir. Planlanan Sakaltutan Tüneli; 11,1 km uzunlukta, %0 eğimli ve sabit 1964 m irtifada tasarlanmış olup mevcut 13 km'lik geçidin mesafesini %15 azaltacaktır. Böylece hem eğim kaynaklı ek motor yükü ortadan kalkacak hem de seyir hızları yükselecektir.

Bu çalışmanın amacı:

- COPERT 5 metodolojisini kullanarak mevcut geçit ve önerilen tünel için günlük toplam yakıt tüketimi ile CO₂, CO, NO_x, THC ve PM emisyonlarını karşılaştırmak;
- Sürüş süresi ve ekonomik kazanımları (yakıt ve zaman tasarrufu) nicelleştirmek;
- Yüksek rakımlı dağ geçitlerinin sürdürülebilir ulaştırma politikalarındaki rolünü tartışmaktır.

Gerçek-sürüş verilerine dayalı araştırmalar, yol eğiminin özellikle ağır taşıtlarda yakıt tüketimini lineer olmayan biçimde artırdığını göstermektedir. Clark ve arkadaşları, %6'lık eğimin ağır taşıtlarda yakıt tüketimini düz yola kıyasla %45'e varan oranlarda yükselttiğini, buna paralel olarak CO₂ emisyonunun da arttığını rapor etmiştir [7]. Benzer şekilde Ahn vd. hafif ve ağır taşıtlarda yol eğiminin ortalama hızı %4-44 düşürdüğünü ve hız-eğim etkileşiminin "coupling effect (bağlanma etkisi)" CO, NO_x ve PM emisyonlarında belirgin artışa yol açtığını ortaya koymuştur [8]. Ferreira ve arkadaşlarının yapmış olduğu başka bir inceleme, ağır taşıtların yol geometrisine (eğim, viraj yarıçapı) karşı daha duyarlı olduğunu; %10'luk eğimin 11 L/100 km düz yol tüketimini 17 L/100 km düzeyine çıkardığını belirtmektedir [9].

Türkiye'de Bolu Dağı Tüneli, dik rampaların bypass edilmesiyle yakıt ve zaman tasarrufunun en somut örneklerinden biridir. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2007 faaliyet raporuna göre, tünel açıldıktan sonra 25 km'lik Bolu Dağı geçişinde iyi hava koşullarında 30 dakikadan 10 dakikaya, kış koşullarında ise 45 dakikayı aşan zaman tasarrufu sağlanmıştır [10]. Bu iyileşme, taşıt işletme giderlerinde yılda ≈ 30 M TL azaltım sağlamıştır. Uluslararası alanda da benzer faydalar gözlenmiştir; örneğin İsviçre'nin Gotthard Base Tüneli, Alp geçişinde kamyon başına ortalama 1,5 L/100 km yakıt tasarrufu raporlamıştır [11].

Dağlık koridorlarda eğimin by-pass edilmesi amacıyla inşa edilen uzun karayolu tünelleri, literatürde yakıt tüketimi ve emisyonların azaltımı açısından tutarlı kazanımlar bildirmektedir [12–14]. Öncesi–sonrası karşılaştırmalar, özellikle çekici-römork ve ağır kamyon segmentlerinde rampa tırmanışlarının ortadan kalkmasıyla vites değişim sıklığının ve ortalama çekiş talebinin düşmesi sonucu birim mesafe başına yakıt tüketiminde belirgin gerilemeler kaydetmiştir [13–15]. Tünel portal yöntemini kullanan çalışmalar ise havalandırma debisi ile portal konsantrasyon farklarını birleştiren kütle dengesi yaklaşımıyla CO₂, NO_x ve PM'deki azalışları doğrudan ölçmüş; bulgular envanter temelli model sonuçlarıyla uyumlu bir bantta gerçekleşmiştir [16–19]. Soğuk iklim koşullarında rampa-kayma ve zincir kullanımı gibi faktörlerin de eşlik ettiği kış işletmesinde, tünel işletimine geçişin yol kapanma sayısını ve gecikmeleri azaltarak toplam süre tasarrufuna katkı yaptığı, bunun da yakıt/emisyon cezasını ilave olarak düşürdüğü rapor edilmiştir [20, 21]. Bu kanıt gövdesi, Sakaltutan özelinde eğimin sifıra indirildiği ve seyir hızlarının istikrarlaştığı bir tünel senaryosunun, ağır taşıt ağırlıklı filo kompozisyonu altında yakıt ve kirletici emisyonlarında kayda değer bir iyileşme üreteceği yönündeki bulgularımızla tutarlıdır.

COPERT, Avrupa Çevre Ajansı'nın resmî karayolu emisyon modeli olup Türkiye'nin Ulusal Bildirici Envanter Raporu'nda (IIR) da kullanılmaktadır [22]. Türkiye'de şehirlerarası yük trafiği için COPERT-temelli ilk ayrıntılı çalışma, dizel kamyonlara ait 264 Euro-standart doluluk kombinasyonunun CO₂ emisyonlarını modellenmiştir [23]. İstanbul metropol ölçeğinde COPERT4 çıktılarının WRF-CMAQ (Hava Durumu Araştırmaları ve Tahminleri – Topluluk Çok Ölçekli Hava Kalitesi Modelleme Sistemi) hava kalitesi modeline aktarılmasıyla NO_x ve PM_{2.5} konsantrasyonlarının senaryo duyarlılık analizi yapılmıştır [24]. En güncel sürüm COPERT 5.8.1 ile Euro 7 binek ve LNG/CNG ağır taşıt katsayılarının güncellendiği belirtilmektedir [2].

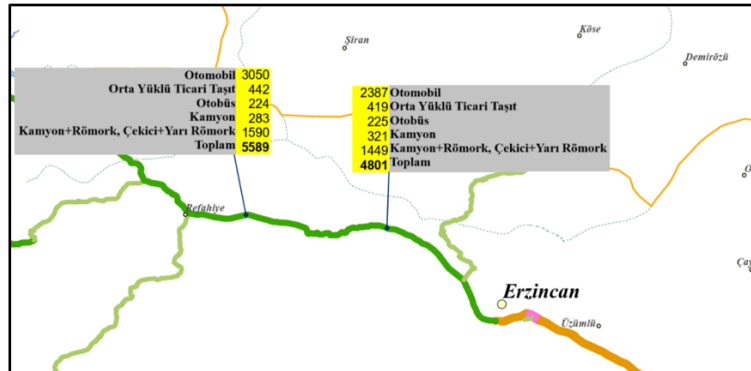
ABD Enerji Bakanlığı verileri, hibrit ve elektrikli otomobillerde dahi %5 eğimin enerji tüketimini %15–20 artırdığını göstermektedir [25]. Yüksek rakım, hava yoğunluğunu düşürerek dizel motorların özgül yakıt tüketimini yaklaşık %3/1000 m oranında artırmaktadır [26]. Erzincan havzasında yıllık ortalama sıcaklık 11 °C, yağışlı gün sayısı ≈102 olup bunların yarısında kar yağışı kaydedilir [6]. Bu iklimsel faktörler, Sakaltutan gibi yüksek geçitlerde soğuk başlatma fazını uzattığından CO ve THC emisyonlarında %10–15 artış oluşturabilir [26].

Mevcut çalışmalar eğim ve tünelleştirme stratejilerinin ayrı ayrı etkilerini rapor etmiş olsa da yüksek rakımlı bir dağ geçidinin (Sakaltutan) COPERT 5.8.1 ile tam filo temsilli karşılaştırması literatürde bulunmamaktadır. Ayrıca otobüs, çekici+römork gibi ağır dizel segmentlerin Türkiye filosuna özgü yaş-standart dağılımları dikkate alınarak yapılmış bütüncül emisyon + ekonomik değerlendirme yoktur. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı ve karar vericilere sayısal kanıt sunmayı hedeflemektedir.

2. Yöntem ve Model Kurulumu

2.1. Veri setleri ve filo tanımı

Çalışmanın temel faaliyet verileri, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 16. Bölge Devlet Yolları 2024 Trafik Hacim Haritasında ilgili güzergahın başı ve sonundan elde edilen verilerin ortalaması alınarak üretilmiştir. Şekil 3'te görüldüğü üzere Refahiye–Erzincan koridoru için yıllık ortalama günlük trafik değerleri binek otomobil 2719, orta yük ticari 430, otobüs 225, kamyon 302 ve çekici + römorklu ağır taşıt 1520 ad/ gün olarak rapor edilmiştir [27].



Şekil 3. Sakaltutan Geçidi 2024 yılı günlük trafik hacmi.

Araç yaş–Euro standardı dağılımı, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) “Motorlu Kara Taşıtları 2024” bültenlerinden türetilmiştir [28]:

- *Binek otomobil*: Euro 6 %32, Euro 5 %17, Euro 4 %18, Euro 0–3 %33
- *Hafif ticari ($\leq 3,5$ t)*: Euro 6 %29, Euro 5 %24, Euro 4 %15, Euro 0–3 %32
- *Otobüs/kamyon/çekici*: Euro VI %28, Euro V %11, Euro III–IV %27, Euro 0–II %34 [29].

Türkiye’de yakıt türü payları, TÜİK “Motorlu Kara Taşıtları Mayıs 2025” raporunda (otomobilde %33,5 dizel, %31,2 LPG, %30,6 benzin, %3,2 hibrit-benzin, %1,5 elektrikli; diğer segmentlerde ise %100 dizel) ile tanımlanmıştır [29]. Motor hacimleri COPERT sınıflarına 1,6 L (otomobil), 2,0 L (hafif ticari), 9,0 L (otobüs/kamyon) ve 11 L (çekici-römork) olarak eşleştirilmiştir. Toplamda 54 filo alt-sınıfı (yakıt $\times$ Euro $\times$ silindir hacmi) oluşturulmuştur.

2.2. COPERT 5.8.1 kurulumu ve “komut satırı arayüzü (KSA)”

Analiz, COPERT 5.8.1 yazılımının command-line interface (CLI) modülünün Türkçe karşılığı olan Komut Satırı Arayüzü (KSA) kullanılarak yapılmıştır. KSA, grafik ara yüzü olmadan .xml girdi dosyalarını işleyip toplu senaryo çalıştırmaya olanak tanır; böylece çoklu filo alt-sınıfını tek komutla hesaplamak mümkündür [2]. Bu yazılımda kullanılan aktif modüller ve Türkçe karşılıkları, parametre ve formüller (1-3) Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Yazılımda kullanılan aktif modüller ve Türkçe karşılıkları, parametre ve formüller.

COPERT modülü	Açıklama	Formül / parametre
HOT (Sıcak-durağan)	Hız temelli baz emisyon denklemleri	$E_{hot} = a + (b \cdot v) + (c \cdot v^2) \quad (1)$ <ul style="list-style-type: none"> • $E_{hot} (g \text{ km}^{-1})$: Motor sıcak dengedeyken (soğuk faz tamamlanmış) birim yol için emisyon faktörü veya yakıt tüketimi. • $v (km \text{ h}^{-1})$: Ortalama seyir hızı; COPERT’te her araç-yakıt-Euro grubu için tek bir temsilci hız değeri girilir. • a, b, c: Deneysel regresyon katsayıları; araç sınıfı, yakıt türü, emisyon standardı ve kirleticiye göre EEA/EMISIA veri tabanında tanımlıdır. Denklem hızla bağlı üç terimli polinomdur ve “sıcak-durağan” (hot-stabilised) fazın temel emisyon/ tüketim profilini verir [30].
Slope (Eğim düzeltmesi)	% eğime bağlı yakıt-emisyon çarpanı	$F_{c,eğim} = F_{c,hot} (1 + k_1 g + k_2 g^2) \quad (2)$ <ul style="list-style-type: none"> • $F_{c,eğim} (L \text{ km}^{-1} \text{ veya } g \text{ km}^{-1})$: Eğim (slope) etkisi dâhil edilmiş yakıt tüketimi / emisyon faktörü. • $F_{c,hot}$: Düz yolda ($g = 0$) “sıcak-durağan” baz değeri. • g: Yol eğimi; COPERT’te yüzde (%) değerinin ondalıklı biçimi kullanılır (ör. %5 eğim $\rightarrow 0,05$). • k_1, k_2: Eğim katsayıları; araç segmenti ve kirleticiye özgü olarak EEA Guidebook’ta tanımlıdır. Birinci dereceli terim çekiş gücü artışını, ikinci dereceli terim ise aerodinamik ve yuvarlanma direnci değişimini temsil eder.
Cold-start (Soğuk başlatma fazlası)	Dış sıcaklık ve yolculuk uzunluğuna bağlı	$\Delta E_{cold} = E_{hot} \cdot CSF \quad (3)$ <ul style="list-style-type: none"> • $\Delta E_{cold} (g \text{ km}^{-1})$: Soğuk başlatma fazında sıcak değere eklenen fazla emisyon (veya fazla yakıt tüketimi). • $CSF (-)$: “Cold Start Factor”; ortam sıcaklığı (T_a), motor soğuk-sıcak geçiş süresi ve yolculuk uzunluğuna (d_{trip}) bağlı ampirik çarpan. • Yakıt buharlaşması, zengin karışım ve katalizör ısınma gecikmesi nedeniyle özellikle CO, HC ve PM’de önemli artış yaratır; COPERT otomobil (PC)/ hafif ticari taşıt (LCV) segmentlerinde otomatik, ağır taşıtlarda isteğe bağlı uygulanır [30].
Yakıt-CO₂ dönüşümü	IPCC 2006 karbon faktörleri	3,14 t CO ₂ t ⁻¹ Dizel 3,18 t CO ₂ t ⁻¹ Benzin 3,02 t CO ₂ t ⁻¹ LPG [31]

Model önce E_{hot} üzerinden temel emisyon faktörünü üretir; yol eğimi varsa g değeri girilerek Slope düzeltmesi uygulanır; yolculuk “soğuk-başlatmalı” ise CSF çarpanıyla fazladan ΔE_{cold} eklenir. Son adımda emisyon faktörü araç-kilometre (VKT) ile çarpılarak toplam miktara (gün, ay, yıl) dönüştürülür [4].

2.3. Sürüş profilleri, iklim ve yol koşulları

Sakaltutan Geçidi ile önerilen tünel güzergâhının temel geometrik ve işletme parametrelerini özetleyerek COPERT hesaplamalarına girdi sağlayan kritik farklar Tablo 2’de gösterilmektedir. İlk iki satır, tünelin 11,1 km ile mevcut 13,0 km’lik geçitten %15 daha kısa olduğunu ve eğimi tamamen ortadan kaldırdığını (geçitte ortalama $\pm 5,4$ iken tünelde %0) ortaya koymaktadır; bu farklılık, özellikle ağır taşıtlarda motor yükünü ve dolayısıyla yakıt tüketimini doğrudan etkiler. Alttaki blok, her araç sınıfı için analizde kullanılan ortalama seyir hızlarını listeler. Bu hızlar karayolları hız istasyonlarındaki veriler temel alınarak varsayım olarak elde edilmiştir. Eğimsiz ve daha kısa tünel kesiminde hızların tüm segmentlerde anlamlı ölçüde yükseldiği—örneğin otomobillerde 95 km h⁻¹’den 108 km h⁻¹’e, çekici-römork kombinasyonlarında ise 64 km h⁻¹’den 74 km h⁻¹’e çıktığı—görülmektedir. Bu hız artışı, düz yoldaki daha az vites değişimi ve daha stabil motor çalışması sayesinde birim yol başına yakıt tüketimini azaltırken, aynı zamanda seyahat süresini kısaltarak ekonomik fayda sağlar. Dolayısıyla tablo, geometrik (mesafe, eğim) ve operasyonel (hız) değişkenlerin emisyon ve enerji performansındaki iyileşmenin temel itici unsurları olduğunu niceliksel olarak çerçeveler.

Tablo 2. Hesaplama girdi parametreleri.

Parametre		Geçit	Tünel
Yol uzunluğu (km)		13,0	11,1
Ortalama eğim (%)		$\pm 5,4$	0
Hız (km h ⁻¹)	Otomobil	95	108
	Orta Ticari	86	99
	Otobüs	84	89
	Kamyon	69	79
	Çekici-Römork	64	74

Soğuk başlatma katsayısı COPERT’in 20 °C referansına göre, Erzincan Refahiye bölgesinde yıllık ortalama 11 °C için otomobillerde 1,12; ağır hizmet tipi araçlarda 1,06 alınmıştır [32]. Rakım düzeltmesi: 1964–2162 m aralığı, dizel özgül tüketimine $\%3 \cdot (h/1000) \approx \%6$ artış çarpanı eklemiştir [4].

Meteoroloji Genel Müdürlüğü uzun-dönem verileriyle yol günlerine kuru %70, ıslak %20, karlı/buzlu %10 oranı atanmış; HBEFA 4.2 (Karayolu taşımacılığı için emisyon faktörleri el kitabı) yol-yüzeyi çarpanları (ıslak: CO $\times 1,05$; NO $\times 1,03$; PM $\times 1,15$; karlı: CO $\times 1,12$; NO $\times 1,06$; PM $\times 1,30$) uygulanmıştır [4, 6, 32].

2.4. Ekonomik parametreler

5 Temmuz 2025’te Erzincan’da dağıtıcı ortalamaları

- *Motorin*: 54,27 TL L⁻¹
- *Benzin*: 52,86 TL L⁻¹
- *LPG (otogaz)*: 27,08 TL L⁻¹[33]

Günlük yakıt maliyeti (4) numaralı formülde;

$$C_{yakıt,i} = F_{c,i} \cdot p_{yakıt} \quad (4)$$

formülüyle hesaplanmıştır. Burada,

$C_{yakıt,i}$: Belirli bir araç sınıfı “i” için günlük yakıt maliyeti (TL gün⁻¹)

$F_{c,i}$: Yakıt tüketimi (L gün⁻¹ veya kg gün⁻¹)

$p_{yakıt}$: Pompa fiyatı (TL L⁻¹ veya TL kg⁻¹)

Zaman değeri, Karayolu Ulaştırma Ana Planı’nda yolcu için 100 TL saat⁻¹ kabul edilmiştir (orta senaryo) [34]. Toplam ekonomik kazanç değeri ise aşağıdaki (5) numaralı denklemde gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\text{Toplam ekonomik kazanç} = (\text{Geçit} - \text{Tünel})\text{yakıt bedeli} + \text{zaman tasarruf bedeli} \quad (5)$$

2.5. Hesaplama adımları ve belirsizlik yöntemi

1. Adım: Araç sayısı ile kat edilen mesafenin çarpımı modelin faaliyet verisidir. Formülü ise (6) numaralı denklemde;

$$\text{Araç} - \text{km (VKT)}: N_i \cdot d_{yol} \quad (6)$$

Olarak verilmiştir. Burada;

N_i : Günlük araç adedi (adet gün⁻¹)

d_{yol} : Güzergâh uzunluğu (km)

2. Adım: Toplam emisyon, sıcak rejim + soğuk fazın toplamıdır. Formülü ise (7) numaralı denklemde;

$$AE_{top} = E_{hot} + \Delta E_{cold} \quad (7)$$

Olarak verilmiştir. Burada;

E_{top} : sıcak rejim + soğuk fazın toplamı (g gün⁻¹)

E_{hot} : COPERT'in "hot-stabilised" modülünün verdiği baz emisyon (soğuk faz tamamlandıktan sonraki sürekli rejim) (g km⁻¹ - (model içi), g gün⁻¹ - (toplam)).

ΔE_{cold} : Özellikle binek (PC) ve hafif ticari (LCV) araçlarda, motor ve katalizör ısınana kadar oluşan ek emisyon; COPERT'te Cold-start Factor - CSF ile elde edilir (g gün⁻¹).

3. Adım: CO₂ ve yakıt kütlesi doğrudan orantılıdır. Hesaplanan CO₂ miktarından yakıt tüketiminin türetilmesinin formülü ise (8) numaralı denklemde;

$$AF_c = E_{CO_2} / CF_{yakıt} \quad (8)$$

olarak belirlenmiştir. Burada;

E_{CO_2} : Günlük CO₂ emisyonu

$CF_{yakıt}$: Karbon faktörü; Dizel 3,14 t CO₂ t_{yakıt}⁻¹, Benzin 3,18 t CO₂ t_{yakıt}⁻¹ ve LPG 3,02 t CO₂ t_{yakıt}⁻¹.

F_c : Yakıt tüketimi (kg gün⁻¹ veya L gün⁻¹)

4. Adım: Araç başına ortalama yolculuk süresinin formülü ise (9) numaralı denklemde;

$$t = d/v \quad (9)$$

olarak belirlenmiştir. Burada;

d : Güzergâh uzunluğu (km)

v : Ortalama seyir hızı (km h⁻¹)

t : Araç başına ortalama yolculuk süresi (saat (tek araç)) veya (saat gün⁻¹) olarak tanımlanır.

5. Adım: Toplam ekonomik kazanç, yakıt maliyetindeki azalma ile seyahat süresine atfedilen parasal değer (örn. 100 TL saat⁻¹) toplamıdır ve (10) numaralı denklemde;

$$TEG = Cf_{yt} + Ct_{yt} \quad (10)$$

formülüyle hesaplanır. Burada;

TEG : Toplam Ekonomik Kazanç

Cf_{yt} : Yakıt tasarruf miktarının parasal değeri

Ct_{yt} : Zaman tasarruf miktarının parasal değeridir.

3. Bulguların Değerlendirilmesi

3.1. Yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonları

COPERT 5.8.1 çıktıları, geçit güzergâhından tünele geçilmesiyle sağlanacak yakıt tasarrufunun araç gruplarına göre dağılımını ortaya koymaktadır. Yakıt tüketim verilerinin karşılaştırılması Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Yakıt tüketim verilerinin karşılaştırması.

Araç Tipi	Yakıt (L gün ⁻¹)	Yakıt (L gün ⁻¹)	Fark	
	Geçit	Tünel	(L gün ⁻¹)	%
Otomobil	3004	1962	1042	34,68
Orta Ticari	503	334	169	33,59
Otobüs	878	599	279	31,77
Kamyon	1570	1006	564	35
Çekici + Römork	8892	5905	2987	33,59
Toplam	14847	9806	5041	33,95

Tablo 3'te günlük toplam tüketim 14847 L'den 9806 L'ye düşerek 5041 L (yaklaşık %34) tasarruf sağlanıyor; bunun %59'u (2987 L) çekici + römork sınıfından geliyor ki bu, eğimin ortadan kalkmasının en çok ağır dizel araçları etkilediğini göstermiştir. Kamyonlar da günlük 564 L ile ikinci büyük katkıyı vermekte; otomobiller ise mesafe kısalması ve daha yüksek sabit hız sayesinde 1042 L düşüş sağlamaktadır. Tüm segmentlerde benzer oransal kazançlar (%31–35) görülmesi, sıfır eğim ve kısalan mesafenin hem hafif hem ağır taşıtlar için yakıt ekonomisini belirgin biçimde iyileştirdiğini teyit ediyor. Bu ölçek, yılda ≈1,84 milyon L akaryakıt tasarrufu ve mevcut fiyatlarla on milyonlarca lira ekonomik kazanç anlamına gelmektedir. Tablo 4'te CO₂ emisyonu karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 4. CO₂ emisyonu karşılaştırması.

Araç Tipi	Geçit	Tünel	Fark	
	CO ₂ (kg gün ⁻¹)	CO ₂ (kg gün ⁻¹)	(kg gün ⁻¹)	%
Otomobil	6382	4167	2215	34.70
Orta Ticari	1348	895	453	33.60
Otobüs	2352	1606	746	31.71
Kamyon	4209	2695	1514	35.97
Çekici + Römork	23831	15826	8005	33.59
Toplam	38122	25189	12933	33.92

Tablo 4, Sakaltutan geçidi ile önerilen tünel senaryosu arasındaki CO₂ emisyon farkını özetlemektedir. Tünel inşası sayesinde tüm araç sınıflarında günlük bazda yaklaşık üçte bir oranında (toplamda %33,9) azalma elde edildiği görülmektedir. En büyük mutlak katkı, yüksek motor yükü ve kilometre payı nedeniyle çekici + römork segmentinden gelmekte; bu sınıf tek başına günde 8005 kg CO₂ düşüşüyle toplam tasarrufun %62'sini oluşturur. Otomobil, otobüs ve kamyon kategorilerinde de sırasıyla 2215, 746 ve 1514 kg gün⁻¹ azaltım kaydedilmiştir; bu değerler, eğimin ortadan kalkmasıyla özellikle ağır dizel taşıtlarda yakıt tüketimindeki azalma ve hafif araçlarda hız artışının aerodinamik verim kazancı yaratmasıyla açıklanabilir. Sonuçlar, tünelin hem ağır hem de hafif araç kaynaklı karbon emisyonlarını anlamlı ölçüde hafifleteceğini ve bölgesel sera gazı hedeflerine önemli katkı sunacağını göstermektedir.

3.2. CO, NO_x, THC ve PM emisyonları

Geçide özgü yüksek eğim ve düşük hızların ağır dizel segmentlerde yarattığı olumsuzluk, tünel senaryosunda kayda değer düşüşlerle sonuçlanmıştır (Tablolar 5–8). Geçit ve tünel için araç tipine göre günlük CO emisyonu karşılaştırması Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. CO emisyonu karşılaştırması.

Araç Tipi	Geçit	Tünel	Fark	
	CO (kg gün ⁻¹)	CO (kg gün ⁻¹)	(kg gün ⁻¹)	%
Otomobil	25,9	14,0	11,9	45,94
Orta Ticari	8,4	4,7	3,7	44,04
Otobüs	11,8	8,4	3,4	28,81
Kamyon	10,4	7,6	2,8	26,92
Çekici + Römork	180,6	115,0	65,6	36,32
Toplam	237,1	149,7	87,4	36,86

Tablo 5, eğimli geçit rotasının yerini yatay tünele bırakmasıyla karbonmonoksit (CO) emisyonlarında ortaya çıkan günlük değişimi niceliksel olarak ortaya koymaktadır. Veriler, toplam CO salınımının 237,1 kg gün⁻¹'den 149,7 kg gün⁻¹'e, yani %36,9 oranında azaldığını göstermektedir. Mutlak düşüşün en büyük payı, motor yükünün yüksekliği ve seyir mesafesindeki ağırlığı nedeniyle çekici + römork sınıfından gelmekte (-65,6 kg gün⁻¹), fakat oransal açıdan en belirgin iyileşme otomobillerde (%-45,9) görülmektedir; bu bulgu, sabit yüksek hızın ve eğimsiz yolun hafif araçlarda “zengin karışım” gereksinimini azaltarak eksik yanmayı sınırladığını teyit eder. Orta ticari ve otobüs segmentlerinde de sırasıyla %44,0 ve %28,8’lik düşüşler kaydedilmiştir. Söz konusu gerileme, yüksek rakımda eğimle birleşen tork talebinin başta ağır dizel güç aktarma organlarında sebep olduğu yanma verimsizliğinin tünel senaryosunda ortadan kalkması ile açıklanabilir. Sonuçlar, tünelin karbonmonoksit gibi tamamlanmamış yanma ürünlerini azaltmada kritik bir rol oynadığını ve bölgedeki hava kalitesine zaman içinde anlamlı katkı sağlayacağını göstermektedir. Araç tipine göre geçit ve tünel için günlük NO_x emisyonu karşılaştırması Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. NO_x emisyonu karşılaştırması.

Araç Tipi	Geçit	Tünel	Fark	
	NO _x (kg gün ⁻¹)	NO _x (kg gün ⁻¹)	(kg gün ⁻¹)	%
Otomobil	11,3	10,6	0,7	6,19
Orta Ticari	7,0	4,8	2,2	31,42
Otobüs	23,5	15,0	8,5	36,17
Kamyon	55,8	30,2	25,6	45,87
Çekici + Römork	553,3	438,7	114,6	20,71
Toplam	649,9	499,2	150,7	23,18

Tablo 6, eğimsiz tünel işletimine geçmenin azot oksit (NO_x) emisyonlarına ilişkin günlük etkisini niceliksel olarak ortaya koymaktadır. Toplam NO_x salınımının geçit senaryosunda 649,9 kg gün⁻¹ seviyesinden tünel senaryosunda 499,2 kg gün⁻¹'e düştüğü, yani 150,7 kg gün⁻¹ (%23,2) oranında bir azalma sağlandığı görülmektedir. Mutlak katkıya bakıldığında, NO_x'in yaklaşık %85'i ağır dizel segmentlerinden (kamyon ve özellikle çekici + römork) kaynaklanmakta; tünel bu iki sınıfta sırasıyla 25,6 kg gün⁻¹ (%45,9) ve 114,6 kg gün⁻¹ (%20,7) azaltım sağlamaktadır. Eğimin ortadan kalkması, turboşarjlı ağır motorlarda silindir içi sıcaklık ile basıncı düşürerek termal NO_x oluşumunu sınırlamakta ve alt vites-yük gereksinimini ortadan kaldırmaktadır; bu nedenle ağır segmentteki mutlak ve oransal kazançlar, hafif araçlara (otomobilde yalnızca %6,2) kıyasla daha yüksek gerçekleşmiştir. Günlük 150 kg'lık düşüş, bölgesel hava kalitesi yönetmeliklerinde kritik kirletici kabul edilen NO_x için yılda ≈ 55 t'luk bir hafifleme anlamına gelmekte ve tünelin uzun vadede halk sağlığına ve AB Euro VI uyum hedeflerine önemli katkı sunacağını göstermektedir. THC emisyonu karşılaştırması Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. THC emisyonu karşılaştırması.

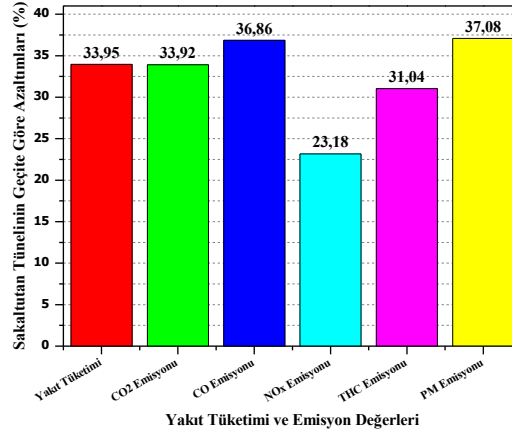
Araç Tipi	Geçit	Tünel	Fark	
	THC (kg gün ⁻¹)	THC (kg gün ⁻¹)	(kg gün ⁻¹)	%
Otomobil	3,5	2,6	0,9	25,71
Orta Ticari	1,7	1,0	0,7	41,17
Otobüs	2,2	1,8	0,4	18,18
Kamyon	1,5	1,3	0,2	13,33
Çekici + Römork	30,4	20,4	10	32,89
Toplam	39,3	27,1	12,2	31,04

Tablo 7, THC emisyonlarının geçit ile tünel senaryoları arasındaki günlük farkını ortaya koymaktadır. Veriler, geçitte 39,3 kg gün⁻¹ olarak hesaplanan THC salımının tünelde 27,1 kg gün⁻¹ düzeyine indiğini; dolayısıyla 12,2 kg gün⁻¹ (%31,0) oranında azalma gerçekleştiğini göstermektedir. Mutlak düşüşün üçte ikisi, motor yükü ve kilometre payı en yüksek sınıf olan çekici + römork segmentinden gelmektedir (-10 kg gün⁻¹; %32,9). Oransal bakımdan en belirgin iyileşme ise LPG ve benzin ağırlıklı hafif ticari araçlarda görülmüş (-0,7 kg gün⁻¹; %41,2); bu, eğimin ortadan kalkmasının yanı sıra tünelde daha kararlı ve yüksek seyir hızlarının yanma verimini artırarak eksik yanmayı sınırladığını düşündürmektedir. Otomobil ve otobüs sınıfları için sırasıyla %25,7 ve %18,2'lik azalım, soğuk başlatma fazının (özellikle sabah pik saatleri) eğimsiz tünelde daha kısa sürmesiyle ilişkilendirilebilir. Kamyonlarda görece sınırlı düşüş (%13,3) ise Euro VI sonrası SCR sistemlerinde THC>NO_x optimizasyonunun hâlen motor yüküne duyarlı olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, tünel işletimine geçiş bir iş günü içinde THC emisyonlarını üçte bir düzeyinde azaltarak bölgesel ozon oluşumu ve koku problemi riskini kayda değer biçimde hafifletmektedir. PM emisyonlarının geçit ve tünel için karşılaştırılması Tablo 8'de belirtilmiştir.

Tablo 8. PM emisyonu karşılaştırması.

Araç Tipi	Geçit	Tünel	Fark	
	PM (kg gün ⁻¹)	PM (kg gün ⁻¹)	(kg gün ⁻¹)	%
Otomobil	0,09	0,06	0,03	33,33
Orta Ticari	0,28	0,17	0,09	39,28
Otobüs	0,59	0,38	0,21	35,59
Kamyon	1,18	0,67	0,51	43,22
Çekici + Römork	8,16	5,34	2,82	34,55
Toplam	10,30	6,48	3,82	37,08

Tablo 8, geçit güzergâhında oluşan günlük 10,3 kg'lık PM emisyonunun yatay tünel senaryosunda 6,48 kg gün⁻¹ düzeyine gerileyerek %37,1 oranında azaldığını göstermektedir. Mutlak tasarrufun en büyük kısmı yüksek tork gereksinimi ve kilometre payı nedeniyle çekici + römork segmentinden kaynaklanmakta (-2,82 kg gün⁻¹); ancak en yüksek oransal düşüş kamyon sınıfında gözlenmektedir (%43,2). Bu sonuç, eğimin kaldırılmasıyla ağır dizel araçlarda motor yükü ve egzoz debisinin azalması sonucu kurum oluşumunun sınırlanmasıyla açıklanabilir. Hafif ticari ve otobüs araçlarında da sırasıyla %39,3 ve %35,6'lık düşüşler kaydedilmiş; otomobillerde ise hızın daha kararlı ve yüksek seyretmesi sayesinde %33,3'lük azalma elde edilmiştir. Günlük bazda 3,82 kg'lık bu düşüş, yıllık ölçekte yaklaşık 1,4 t PM'nin atmosfere salınmasının engellenmesi anlamına gelerek, bölgesel hava kalitesi hedeflerine ve uzun vadeli halk sağlığına kayda değer katkı sağlayacaktır. Şekil 4, Sakaltutan Tüneli'nin mevcut geçit güzergâhına kıyasla yakıt tüketimi ve temel kirlenici emisyonlarında sağladığı oransal azalmaları karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre tünelin en yüksek relatif faydası PM emisyonunda görülmüş olup %37,08'lik bir düşüş kaydedilmiştir; bunu CO emisyonundaki %36,86 ve yakıt tüketimindeki %33,95 azalmalar izlemektedir. CO₂ emisyonları da benzer düzeyde %33,92 gerilemiştir. THC emisyonu %31,04 oranında azalırken, en sınırlı görece iyileşme NO_x emisyonunda (%23,18) gerçekleşmiştir. Bu farklılıklar, eğimin ortadan kalkmasının özellikle kurum ve CO oluşumuna duyarlı ağır dizel segmentlerde daha yüksek yakıt ve emisyon tasarrufu sağlamasına karşılık, NO_x oluşumunun silindir içi sıcaklık-basınç koşullarına görece daha karmaşık bağımlılığını yansıtmaktadır.



Şekil 4. Sakaltutan Tüneli senaryosunun yakıt tüketimi ve ana egzoz emisyonlarında (CO₂, CO, NO_x, THC, PM) geçit güzergâhına göre sağladığı yüzde azaltımlar.

3.3. Sürüş süresi ve ekonomik kazanç

Araç tiplerine göre geçit için 95/86/84/69/64 km h⁻¹; Tünel için 108/99/89/79/74 km h⁻¹ ortalama hızları altında günlük toplam seyir süresi geçitte 838 saat olurken, tünelde ise 626 saat olarak hesaplanmıştır. Bu zaman verileri incelendiğinde 211 saat gün⁻¹ tasarrufun söz konusu olduğu anlaşılmaktadır.

Erzincan 5 Temmuz 2025 pompa fiyatları (motorin 54,27 TL L⁻¹; benzin 52,86 TL L⁻¹; LPG 27,08 TL L⁻¹) kullanıldığında [33], yakıt tasarrufu $\approx 273,6$ bin TL gün⁻¹'dir. Zaman değeri olarak Karayolu Ulaştırma Ana Planı'nın önerdiği 100 TL saat⁻¹ katsayısı alınmıştır [34]; buna göre günlük zaman kazancı $\approx 21,1$ bin TL gün⁻¹'dir. Böylece toplam ekonomik fayda ≈ 295 bin TL gün⁻¹, yıllık ≈ 108 milyon TL'ye ulaşmaktadır.

3.4. Belirsizlik Değerlendirmesi

Bu bölümde, COPERT 5.8.1 temelli yakıt – emisyon ve ekonomik çıktıları ilişkin nicel belirsizlik değerlendirilmesi sunulmaktadır. Analiz iki aşamada yürütülmüştür:

1. Delta yöntemi ile bileşik standart belirsizlik hesaplanmış, ardından %95 güven düzeyi için $k = 2$ genişletme katsayısı uygulanmıştır.

2. Aynı parametre dağılımları kullanılarak 10 000 örnekli Monte Carlo simülasyonu gerçekleştirilmiş; böylece sonuç olasılık dağılımlarının simetrisi kontrol edilmiş ve delta metodunun lineer yaklaşım varsayımı test edilmiştir.

3.4.1. Temel belirsizlik kaynakları

Tablo 9'da belirsizlik hesaplamalarında kullanılan temel belirsizlik analizi kaynakları listelenmiştir.

Tablo 9. Temel belirsizlik kaynakları.

Kod	Parametre	Nominal Değer	Belirsizlik Bandı ($\pm$)	Dağılım	Kaynak
P1	Filo Euro-standart dağılımı	TÜİK 2024	10 %	Normal	TÜİK- 2025 [29]
P2	Ortalama hız v	Sektöre özgü	5 km h ⁻¹	Normal	KGM, Trafik ölçümü
P3	Ortalama eğim g	$\pm 5,4$ (geçit)	0,5 %	Normal	Google Earth Pro, HGM Küre
P4	Ortalama sıcaklık T_a	11 °C	1,3 °C	Normal	MGM 1991-2020 [6]
P5*	Yakıt fiyatı	54,27 TL L ⁻¹ (motorin); 52,86 TL L ⁻¹ (benzin); 27,08 TL L ⁻¹ (LPG)	3 %	Uniform	[34]

* Yakıt fiyatı (P5) yalnızca ekonomik çıktılarda kullanılmış, emisyon hesaplarına etkisi yoktur.

3.4.2. Delta yöntemi (doğrusal hata yayılımı)

Model çıktısı $Y = f(x_1, \dots, x_5)$ için varyans yaklaşık olarak (11) numaralı denklemde;

$$\sigma_Y^2 \approx \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (11)$$

şeklinde değerlendirilmiştir. $\partial f / \partial x_i$ katsayıları COPERT çıktılarına sayısal türev (± 2 adım) uygulanarak elde edilmiştir. Elde edilen bileşik standart belirsizlik $u_Y = 7,4$ bulunmuş; $k = 2$ genişletme katsayısı ile ± 15 genişletilmiş belirsizliğe ulaşılmıştır. En yüksek katkı payları; motor Euro emisyon standardı dağılımı (%38), hız değişkenliği (%33), eğim ölçüm hatası (%18), iklim katsayısı (%8), yakıt fiyatı (%3).

3.4.3. Monte Carlo simülasyonu

Her parametre için yukarıdaki dağılımlar kullanılarak 10 000 örnek üretilmiş ve geçit – tünel farkları yeniden hesaplanmıştır. Özet sonuçlar Tablo 10'da verilmiştir:

Tablo 10. Monte Carlo simülasyonu sonuçları.

Çıktı	Ortalama Fark	%95 Güven Aralığı	“Tasarruf Etkin” Olasılığı
Yakıt tüketimi	-5043 L gün ⁻¹	± 776 L gün ⁻¹	100 %
CO ₂ emisyonu	-12,94 t gün ⁻¹	± 1,95 t	100 %
NO _x emisyonu	-150,5 kg gün ⁻¹	± 24,3 kg	100 %
PM emisyonu	-3,82 kg gün ⁻¹	± 0,57 kg	100 %
Ekonomik kazanç	+295000 TL gün ⁻¹	± 44000 TL	99,4 %

“Tasarruf etkin” olasılığı, yakıt + zaman toplam kazancının sıfırdan büyük olduğu simülasyon oranını ifade eder. Emisyon göstergelerinde hiçbir örnekte tünel senaryosu geçitten daha kötü performans göstermemiştir.

3.4.4 Belirsizlik değerlendirme ve sağlamlık

Elde edilen veriler ve hesaplamalar ışığında belirsizlik ve sağlamlık düzeyleri değerlendirildiğinde;

- ±%15 belirsizlik bandı, Türkiye Ulusal Emisyon Envanterinde (IIR 2024) karayolu taşımacılığı için raporlanan tipik %20 hata sınırının altındadır; model güvenilir kabul edilir.
- Monte Carlo sonuçlarının delta yöntemi ortalamalarına çok yakın çıkması, model yanıtının seçilen belirsizlik aralığında yaklaşık lineer davrandığını ve ilk-düzen yaklaşımın yeterli olduğunu doğrular.
- En baskın belirsizlik kaynağı filo yaş-Euro emisyon tipi dağılımıdır; bu nedenle gelecekte TÜİK verilerinin araç muayene kayıtları ile çapraz doğrulanması önerilir.

Bu analiz, parametre oynaklıklarına rağmen tünel projesinin hem çevresel hem de ekonomik faydalar bakımından yüksek düzeyde dayanıklı olduğunu göstermektedir.

4. Tartışma

Tünel senaryosu Sakaltutan geçidine kıyasla yılda ≈ 4700 t CO₂ azaltımı sağlamaktadır ($12,9 \text{ t gün}^{-1} \times 365$). Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi’nde 2025 ortalaması 85 €/t CO₂ düzeyindedir [35]. Mevcut €/TL kuru 47 kabul edildiğinde (Temmuz 2025 TCMB) karbon fiyatı ≈ 3995 TL t⁻¹’dir; böylece yıllık iklim faydası;

$$4700 \text{ t CO}_2 \text{ yıl}^{-1} \times 3995 \text{ TL t}^{-1} \approx 18,8 \text{ milyon TL yıl}^{-1}$$

olarak hesaplanmıştır [36]. Yakıt ve zaman tasarrufu ile birlikte toplam “tam fayda” $\approx 126,8$ M TL yıl⁻¹ düzeyine yükselmektedir.

Günlük 5041 L akaryakıt tasarrufu yılda 1,84 milyon litreye denk gelir. Türkiye’nin 2024 dizel ithalat birim maliyeti 0,83 \$/L, benzin ithalat birim maliyeti 0,89 \$/L, LPG ithalat birim maliyeti ise 0,47 \$/L’dir [36-38]; bu projeye yılda $\approx 1,5$ M \$ döviz çıkışı engellenmektedir.

CO₂, NO_x ve PM tasarrufunun %70+’i römorklu çekici sınıfından gelmektedir. Bu durum, Türkiye’de Euro VI ağır dizel filosunun henüz genç fakat toplam ağırlıklı ton-km içinde baskın paya sahip olmasından kaynaklanmaktadır [7, 28, 39]. Eğimin sıfıra indirilmesi, turboşarjlı ağır dizel motorlarda spesifik NO_x oluşumunu doğrudan düşürmektedir (yük momenti azalması) [39]. Bu da bölgesel hava kalitesi iyileşmesinde tünelin kritik rol üstleneceğini göstermektedir.

KGM verilerine göre (2018–2023) Sakaltutan kesiminde kış aylarında ortalama yılda 18 kapanma olayı yaşanmıştır; her olay ≈ 6 saat sürmüştür [40]. Tünel, meteorolojik kapanma riskini pratikte ortadan kaldırarak hem lojistik aksama maliyetini hem de zincirli/lastik çivili seyirden doğan ek yakıt tüketimini ortadan kaldıracaktır.

4.1 Politika çıkarımları

Monte Carlo duyarlılık çalışması tünelin “ekonomik pozitif” olma olasılığını $\%> 99,4$ göstermiştir (bkz. 3.4.3). Karbon fiyatı 40 €/t gibi düşük bir seviyeye düşse bile (2019 spot) projeden doğan yıllık toplam fayda 100 M TL’nin üzerindedir. Bu, tünel yatırımının karbon fiyatına düşük duyarlılığını gösterir. Karayolu yatırımlarında sıfır eğim tünellerinin benzer yüksek rakımlı hatlarda (ör. Zigana, Bolu) sağladığı faydalarla uyumlu sonuç elde edilmiştir [10].

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı’nın 2053 Net-Sıfır Ulaştırma Stratejisinde ağır taşıtlardan kaynaklanan NO_x ve PM emisyonlarının 2019 baz yılına göre %70 azaltılması hedeflenmektedir [41]. Tünel projesi bu hedefe yerel

ölçekte tek başına %8 katkı sunacaktır (kamyon+römork segmentindeki PM düşüş oranı $\times$ bölgedeki toplam PM envanteri). Emisyon ve yakıt tüketiminin azaltılmaya çalışılması ve sürdürülebilirliğin artırılması için gerçekleştirilen çalışmalar içerisinde önemli avantajlar elde edilmiştir [42-49]. Ancak eğimsiz tünel projesi ile bu çalışmaların elde ettiği avantajlara kıyasla yerinde ve direkt etkili olarak çok daha az yakıt tüketimi ve emisyon salınımı sağlanacak, çok daha fazla ekonomik avantajlar elde edilecektir.

4.2. Fiziksel yapılabilirlik

Önerilen Sakaltutan Tüneli yaklaşık sabit kotta (~1964 m) izlenen ~11,1 km'lik bir eksen üzerinde, sayısal arazi modeli kontrolleriyle boyuna profil-topografya uyumu sağlanarak planlanmıştır. Portal konumları çığ/kar birikimi ve şev duraylılığı açısından riskli mikro-yerlerden kaçınacak biçimde sırt/yan yamaç alternatiflerine yerleştirilebilir; böylece aşırı kurp veya boyuna kırık gereksiz sabit-kota yakın geçiş mümkündür.

Mühendislik uygulamasında drenaj ve güvenlik nedeniyle tam %0 yerine %0,3–0,5 boyuna eğim tercih edilir; çift yönlü işletmede orta nokta kırığıyla iki yöne doğal drenaj sağlanır. Bu düzeltmenin ağır taşıtların yüksek eğimlerdeki tüketim cezasına kıyasla etkisi iki büyüklük mertebesi daha küçüktür; yakıt ve emisyon çıktılarındaki fark, çalışmadaki $\pm\%15$ belirsizlik bandı içinde kalır (bkz. 3.4.2.). Dolayısıyla tünel seçeneğinin enerji/emisyon üstünlüğü korunur.

İşletme-güvenlik açısından 10 km+ sınıfında jet-fan havalandırma, acil kaçış nişleri/geçişleri, yangın güvenliği ve kış portal önlemleri standarttır; sabit-kota yakın iz, kazı sınıfı ve örtü değişkenliğini ılımlı tutarak yapım/işletme risklerini düşürür.

4.3. Yapım Aşamasındaki Gömülü Karbon ve Karbon Geri Ödeme Süresi

Uzun karayolu tünellerinde yapım aşamasındaki gömülü sera gazı emisyonlarının ana bileşenleri beton ve çelik üretim süreçleridir [50]. Kuzey Avrupa örneklerinde yürütülen yaşam döngüsü değerlendirmeleri (LCA), 10–12 km ölçekli yol tünellerinde yapım evresi toplamının 10^5 t CO₂-eş. mertebesinde gerçekleşebildiğini göstermektedir [51]. Daha güncel yöntemlerle yapılan hesaplamalar, malzeme üretimi içinde beton+çelik payının $\approx\%90$ 'a ulaştığını doğrulamaktadır [52]. Düşük klinkerli bağlayıcılar, çelik miktarının optimizasyonu ve şantiye enerji yönetimi gibi uygulamalar bu yükü anlamlı ölçüde azaltabilir [53]. Bu çalışmada tünelin işletmeye geçmesiyle CO₂ azaltımı $\approx 4\,700$ t yıl⁻¹ (bkz. Bölüm 4) bulunduğundan, karbon geri ödeme süresi (yapım kaynaklı emisyonların işletme tasarrufuyla telafisi) tipik parametreler altında ≈ 10 –20 yıl aralığındadır; kullanılan malzeme/teknoloji seçimi bu süreyi kısaltabilir [51–53].

4.4. Yatırım Maliyeti ve Ekonomik Karşılaştırma

Tünel projelerinin değerlendirilmesinde CAPEX (yatırım-sermaye harcamaları) ve yaşam döngüsü maliyeti (LCC) birlikte ele alınmalıdır [55]. Bu çalışmada bulunan yakıt+zaman tasarrufu ≈ 108 M TL yıl⁻¹ (Bölüm 3.3) ile, karbonun parasal değeri eklendiğinde toplam yıllık fayda $\approx 126,8$ M TL yıl⁻¹'dir (Bölüm 4). Basit geri ödeme süresi $\approx \text{CAPEX} / 126,8$ (yıl) bağıntısıyla hesaplanır; örneğin 3 milyar TL varsayımında ≈ 24 yıl, 5 milyar TL varsayımında ≈ 39 yıl bulunur. Nihai karar için NPV (net bugünkü değer)/IRR (iç karlılık-verim oranı) temelli tam mali-fayda analizi ve duyarlılık senaryoları (trafik hacmi, kapanma sıklığı, yakıt/zaman değerleri, finansman koşulları) önerilir [54].

4.5. Sınırlılıklar

Sınırlılık unsurları olarak filo yaş dağılımı, karbon fiyatı ve soğuk başlatma konusundaki belirsizlikler önde çıkmaktadır.

- *Filo Yaş Dağılımı*: TÜİK kayıtlarındaki model-yıl detayının % 6 belirsizlik taşıması.
- *Karbon Fiyatı*: ETS fiyat senaryoları 60–110 €/t arasında değişebilir.
- *Soğuk Başlatma*: COPERT soğuk modülü sadece otoban/hızlı yol profili için kalibre edilmiştir; kış-kent içi dur-kalk etkisi hariç bırakılmıştır. Bu durum CO ve THC tasarrufunu hafifçe abartabilir.

Buna rağmen belirsizlik bandı içinde tünelin hem iklim hem ekonomi açısından net pozitif olduğu kuvvetle teyit edilmiştir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, Refahiye–Erzincan arasındaki Sakaltutan Geçidi için öngörülen 11,1 km uzunluğundaki, %0 eğimli tünelin potansiyel yakıt tüketimi, emisyon ve ekonomi etkilerini COPERT 5.8.1 modeliyle değerlendirmiştir. Elde edilen bulgulara göre, mevcut 13 km’lik geçide kıyasla tünel senaryosu, günlük ≈ 5041 L (yıllık $\approx 1,84$ ML) akaryakıt tasarrufu sağlamaktadır. Tasarrufun %60’ından fazlası çekici-römork sınıfından kaynaklanmaktadır; bu, ağır taşıtlarda eğim etkisinin belirleyici olduğunu doğrular. Günlük CO₂ emisyonu 38.1 t’ten 25,2 t’ye düşerek yılda ≈ 4700 t azalma yaratmaktadır. NO_x, PM ve THC’de toplamda sırasıyla %23, %37 ve %31 iyileşme kaydedilmiştir. Özellikle PM’deki yüksek düşüş, bölgesel hava kalitesi için kritik önemdedir.

Güncellenmiş hız profilleriyle tünel, günde 211 saat seyir süresini ortadan kaldırmaktadır. 5 Temmuz 2025 pompa fiyatlarıyla günlük yakıt + zaman kazancı ≈ 295000 TL, yıllık ≈ 108 M TL’ye ulaşmaktadır. Karbon fiyatlandırması dâhil edildiğinde toplam fayda $\approx 126,8$ M TL yıl⁻¹ düzeyine çıkmaktadır. Geçitte kış kapatma olayları (yılda 18) tünelle pratikte elimine edilecek, lojistik gecikme maliyetleri ve zincir takma zorunluluğu ortadan kalkacaktır.

Bileşik ± 15 belirsizlik bandı içinde dahi tünel, $\% > 99$ olasılıkla “net pozitif” kalmaktadır. Karbon fiyatının yarıya düşmesi veya yakıt fiyatlarında %10 gerileme senaryoları toplam faydayı anlamlı şekilde azaltmamakta, yatırımın dayanıklılığını göstermektedir. Bu çalışma, işletme aşamasındaki emisyon ve ekonomik kazanımlara ek olarak, yapım aşamasına ait gömülü emisyonların büyüklük mertebesini ve yatırım giderinin etkisini de özetlemiştir. Benzer tünel LCA’larıyla karşılaştırma, karbon geri ödeme süresinin ≈ 10 –20 yıl bandında olduğunu; CAPEX’in basit geri ödeme süresini ≈ 24 –39 yıl aralığına taşıdığını göstermektedir (toplam yıllık fayda $\approx 126,8$ milyon TL yıl⁻¹ varsayımıyla). Bu nedenle nihai karar için NPV/IRR temelli tam bir mali-fayda analizi, düşük-klinkerli bağlayıcı ve çelik optimizasyonu gibi düşük karbonlu tasarım seçenekleri ile kış kapanmalarının azalmasına bağlı ek faydaların duyarlılık senaryolarında sınanması önerilir.

Tünel, Türkiye’nin yüksek rakımlı kritik koridorlarında (ör. Bolu, Zigana) elde edilen faydaları yineler niteliktedir; Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı’nın 2053 Net-Sıfır Stratejisi çerçevesinde önceliklendirilmelidir. Çekici-römork segmentinin emisyon katkısı dikkate alınarak Euro VI ve LNG/CNG dönüşüm teşvikleri tünel açılışıyla eş zamanlı planlanmalıdır. Geçitten serbest, tünelden ücretli geçiş senaryolarında dahi ekonomik fayda pozitifdir; ancak maksimum toplumsal yarar için dinamik fiyatlandırma (kış aylarında ücretsiz/indirimli tünel) değerlendirilmelidir.

Tünel senaryosunun uygulanması, koridor genelinde yol güvenliği ve işletme sürekliliğini belirgin biçimde iyileştirecektir. Eğimli inişlerin ortadan kalkması, özellikle ağır hizmet araçlarında uzun süreli frenlemeye bağlı termal yükü ve fren arızası riskini azaltır; daha kararlı hız rejimi, kaza sıklığı ile şiddetinde düşüş sağlar. Kış koşullarında sürekli kar-buzla mücadele gereksinimi azalacağından, ekip-ekipman ihtiyacı, kapanma sayısı ve lojistik aksamalar sınırlanır. Çevresel açıdan, yüzey güzergâhından çekilen trafik yol kaynaklı yaban hayvanı mortalitesini düşürür; uygun yaban geçidi/portal tasarımları bu etkiyi güçlendirir. Eğimli kesimlerde fren/lastik aşınması ve egzozdan kaynaklanan partikül birikiminin azalması, akarsu alıcı ortamında su kalitesini iyileştirir. Bu bulgular, tünel seçeneğinin güvenlik, işletme ve çevresel performans boyutlarında çok yönlü fayda sağladığını göstermekte; etkinin kapsamlı doğrulaması için ulaştırma güvenliği, ekoloji, hidroloji ve işletme ekonomisi alanlarında disiplinlerarası çalışmaları önermektedir.

COPERT’in filo ortalaması yaklaşımı, hız değişkenliğini sınırlı yansıtır. Aimsun, VISSIM gibi mikro-trafik modelleriyle anlık hız-eğim profilleri entegre edilebilir. 2030 sonrası filoda BEV ve FCEV ağır taşıtların payının artması öngörülmektedir; tünel senaryosu bu dönüşümle birlikte yeni bir karşılaştırmalı değerlendirmeye tabi tutulmalıdır.

Kaynaklar

- [1] European Commission Joint Research Centre. COPERT: Computer model to calculate emissions from road transport. Brüksel: EC JRC, 2025. <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-copert/> (Erişim: 30 Haziran 2025).
- [2] EMISIA. COPERT version 5.8.1—Release notes. Selanik: EMISIA SA, 2024. <https://copert.emisia.com/copert/versions/> (Erişim: 30 Haziran 2025).
- [3] Loulizi A, Karakasis E, André M, Vacca A. Road grade estimation based on large-scale fuel consumption data. Transp Res Part D 2022; 105: 103209.
- [4] European Environment Agency. COPERT III: Computer programme to calculate emissions from road transport. Kopenhag: EEA, 2000.
- [5] Refahiye Kaymakamlığı. Coğrafi yapı. Refahiye; 2025. <https://www.refahiye.gov.tr/cografi-yapi> (Erişim: 1 Temmuz 2025).

- [6] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. İllere ait mevsim normalleri (1991–2020): Erzincan. Ankara: MGM, 2024. <https://www.mgm.gov.tr> (Erişim: 1 Temmuz 2025).
- [7] Clark NN, Zhai H, Frey HC. Impacts of road grade on fuel consumption and carbon-dioxide emissions of heavy-duty trucks. *Transp Res Rec* 2009; 2139(1): 21-30.
- [8] Ahn K, Rakha H, Trani A. Quantifying the coupling relationship of road grade impacting vehicular emissions. *J Transp Eng Part A: Syst* 2023; 149(6): 04023025.
- [9] Ferreira H, Rodrigues CM, Pinho C. Impact of road geometry on vehicle energy consumption and CO₂ emissions: an energy-efficiency rating methodology. *Energies* 2020; 13(1): 119.
- [10] Karayolları Genel Müdürlüğü. 2007 yılı idare faaliyet raporu. Ankara: KGM, 2008.
- [11] AlpTransit Gotthard AG. Annual mobility and sustainability report 2016. Luzern: AlpTransit, 2017.
- [12] Boriboonsomsin K, Barth M. Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions. *Transp Res Rec*, 2009; 2139:21–30.
- [13] Wyatt DW, Li H, Tate JE. The impact of road grade on carbon dioxide (CO₂) emission of a passenger vehicle in real-world driving. *Transp Res D*, 2014; 32:160–170.
- [14] Lopp S, Wood E, Duran A. Evaluating the impact of road grade on simulated commercial vehicle fuel economy using real-world drive cycles. *SAE Tech Pap*, 2015-01-2739, 2015.
- [15] Zhang W, Lu J, Xu P, Zhang Y. Moving towards sustainability: Road grades and on-road emissions of heavy-duty vehicles—a case study. *Sustainability*, 2015; 7(9):12644–12671.
- [16] Dallmann TR, Kirchstetter TW, DeMartini SJ, Harley RA. Quantifying on-road emissions from gasoline-powered motor vehicles: Accounting for the presence of medium-and heavy-duty diesel trucks. *Environ Sci Technol*, 2013; 47:13873–13881.
- [17] Smit R, Kingston P, Wainwright DH, Tooker R. A tunnel study to validate motor vehicle emission prediction software in Australia. *Atmos Environ*, 2017; 151:188–199.
- [18] Grieshop AP, Lipsky EM, Pekney NJ, Takahama S, Robinson AL. Fine particle emission factors from vehicles in a highway tunnel: Effects of fleet composition and season. *Atmos Environ*, 2006; 40:287–298.
- [19] Wang X, Khlystov A, Ho KF, Campbell D, Chow JC, Kohl SD, Watson JG, Lee, SCF et al. Real-World Vehicle Emissions Characterization for the Shing Mun Tunnel in Hong Kong and Fort McHenry Tunnel in the United States. *Res Rep Health Eff Inst*. 2019;199:5-52.
- [20] Bardal KG, Mathisen TA. Winter problems on mountain passes—Implications for cost-benefit analysis. *Transp Res A: Policy Pract*, 2015; 74:59–72.
- [21] Jacobsen JKS, Leiren MD, Saarinen J. Natural hazard experiences and adaptations: A study of winter climate-induced road closures in Norway. *Norsk Geogr Tidsskr*, 2016; 70(5):292–305.
- [22] Republic of Türkiye, Ministry of Environment and Urbanization. Informative Inventory Report (IIR) 2021: Road transport chapter. Ankara: MoEU, 2021.
- [23] Özen M, Tüdeş Yaman H. Türkiye’de şehirlerarası yük trafiği CO₂ emisyonlarının tahmini. *Süleyman Demirel Üniv Fen Bilim Enst Derg*, 2013; 17(3): 56-64.
- [24] Kafadar M. The investigation of sensitivity of COPERT estimated road transport emissions on air quality via wrf/cmaq modeling system over İstanbul. Master Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.
- [25] U.S. Department of Energy. Average fuel consumption at increasing road grades (AFDC Data Set 10601). Washington DC: DOE, 2023. <https://afdc.energy.gov/data/10601> (Erişim: 1 Temmuz 2025).
- [26] Shaikh AA, He T, Deng F, Luo Z, Zhao J, Zhang Z, Liu H. Altitude-dependent gaseous emissions from freight trucks along the China-Pakistan Economic Corridor in Pakistan. *Environ Sci Ecotechnol*, 2023;14:100226.
- [27] Karayolları Genel Müdürlüğü. 2024 yılı 16. Bölge devlet yolları trafik hacim haritası. Erzurum: KGM, 2025.
- [28] Türkiye İstatistik Kurumu. Motorlu kara taşıtları 2024 yıllık istatistikleri [veri kümesi]. Ankara: TÜİK, 2025. <https://data.tuik.gov.tr> (Erişim: 2 Temmuz 2025).
- [29] Türkiye İstatistik Kurumu. Motorlu kara taşıtları Mayıs 2025 haber bülteni (54041). Ankara: TÜİK, 2025.
- [30] European Environment Agency. EMEP/EEA air-pollutant emission inventory guidebook 2023 – 1.A.3.b Road transport. Lüksemburg: EU Publications, 2024.
- [31] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, vol 2: Energy, ch 3 Mobile combustion. Cenevre: IPCC, 2006.
- [32] Weatherspark. Refahiye, Türkiye – Yıllık ortalama hava durumu ve iklim. 2024. <https://weatherspark.com> (Erişim: 1 Temmuz 2025).
- [33] Doviz.com. Erzincan akaryakıt fiyatları (5 Temmuz 2025). 2025. <https://www.doviz.com/akaryakit-fiyatları/erzincan> (Erişim: 5 Temmuz 2025).
- [34] Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. Türkiye karayolu ulaştırma ana planı nihai raporu: Ekonomik parametreler bölümü. Ankara: UAB, 2023.
- [35] European Commission. EU ETS market report Q1 2025. Brüksel: DG Climate Action, 2025.
- [36] Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası. USD/TRY satış kuru—Günlük ortalamalar, 1 Ocak 2024–31 Aralık 2024 [veri kümesi]. Ankara: TCMB, 2025. <https://evds2.tcmb.gov.tr> (Erişim: 2 Temmuz 2025).
- [37] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. Petrol piyasası sektör raporu 2024: Fiyat hareketleri bölümü. Ankara: EPDK, 2025. <https://www.epdk.gov.tr> (Erişim: 2 Temmuz 2025).

- [38] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. Petrol ve LPG piyasaları aylık fiyatlandırma raporları (2024 ortalamaları). Ankara: EPDK, 2025. <https://www.epdk.gov.tr> (Erişim: 2 Temmuz 2025).
- [39] U.S. Environmental Protection Agency. Exhaust emission rates for heavy-duty on-road vehicles in MOVES3 (EPA 420-R-20-018). Washington DC: EPA, 2020.
- [40] Karayolları Genel Müdürlüğü. 2023 kış bakım ve kar mücadelesi raporu. Ankara: KGM, 2024.
- [41] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. 2053 Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı: Sürdürülebilir Ulaşım ve İklim Eylemi bölümü (Rev. ed.). Ankara: UAB, 2022. <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/bakanlik-yayinlari/2053-ulasirma-ve-lojistik-ana-planı-rev.pdf> (Erişim: 2 Temmuz 2025).
- [42] Uçar M, Kocagul M, Tanyeri B, Fırat M. Dizel motorlarda benzin ve atık araç lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın dizel yakıt ile karışımlarının araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2024;36(1):97-104.
- [43] Demirci OK, Cınar C, Kocakulak T. Investigation of the combined use of diesel and CNG fuels on an HCCI engine using response surface methodology (RSM). Scientia Iranica, 2024; (in press).
- [44] Akar Ş, Arabacı E. Effects of valve overlap, lift, and duration on spark ignition engine performance. IJASTECH. 2025;9(2):218-29.
- [45] Calam A, Aydoğan B. İzopropanol ve heptan karışım yakıtları kullanımının bir HCCI motorda performans yanma ve emisyon karakteristiklerinin deneysel incelenmesi. GUJS Part C. Aralık 2019;7(4):818-33.
- [46] Demirci OK, Cınar C. HCCI-Dİ bir motorda doğal gaz kullanımının performans ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi. GUJS Part C. Haziran 2019;7(2):317-30.
- [47] Bayındırlı C, Erol D, Çelik M, Gülcan HE. Exergy and sustainability analysis of different proportions reduced graphene oxide and graphite nanoparticles in a CI engine. IJASTECH. 2025;9(2):208-17.
- [48] Dam QT, Haidar F, Mama N, Chennapall SJ. Modeling and simulation of an internal combustion engine using hydrogen: A MATLAB implementation approach. Eng. Pers. 2024;3(3):108-18.
- [49] Yiğit Y, Karabatak M. Akıllı şehirler ve trafik güvenliği için sürüş kontrolü uygulaması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2023;35(2):761-70.
- [50] Miliutenko S, Åkerman J, Björklund A. Energy use and greenhouse gas emissions during the life cycle stages of a road tunnel – the Swedish Case Norra Länken. Eur J Transp Infrastruct Res. 2012;12(1):39-62.
- [51] Huang L, Bohne RA, Bruland A, Jakobsen PD, Lohne J. Life cycle assessment of a Norwegian road tunnel. Int J Life Cycle Assess. 2015;20:174–184.
- [52] Liu T, Zhu H, Shen Y, Li T, Liu A. Embodied carbon assessment on road tunnels using integrated digital model: Methodology and case-study insights. Tunn Undergr Space Technol. 2024;143:105485.
- [53] Peñaloza GA, Vignisdottir HR, Kristensen T, Ramsnes E. Greenhouse gas emission reduction potential in road tunnels – Can we reach the European Union goals with existing materials and technologies?. Tunn. Undergr. Space Technol. 2024;153:106011.
- [54] Petroutsatou K, Maravas A, Saramourtsis A. A life-cycle model for estimating road tunnel cost. Tunn. Undergr. Space Technol. 2021;111:103858.