

## Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasının (SKDM) Navlun Fiyatlarına Dolaylı Etkisi: Bir Operasyonel Maliyet Simülasyonu Modeli

Öyküm Yılmaz\*\*

### Öz

Avrupa Yeşil Mutabakatı ile birlikte küresel ticaret, rekabet gücünün sadece ekonomik değil, çevresel parametrelerle de ölçüldüğü yeni bir döneme girmiştir. Bu dönüşümün merkezinde yer alan Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM), doğrudan sanayi emisyonlarını hedeflemekle birlikte, tedarik zinciri süreçlerinde yarattığı 'dolaylı maliyet baskısıyla' lojistik sektörü için yeni bir ticari bariyer oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı, söz konusu dönüşümün Türk lojistik sektörü üzerindeki finansal etkilerini analiz etmektir. İzmir-Münih hattı özelinde 10.000 iterasyonluk Monte Carlo simülasyonu ile desteklenen araştırmada, gidiş-dönüş sefer maliyetleri ve sınır kapılarındaki verimsizlikler modele dahil edilmiştir. Simülasyonlar, SKDM kaynaklı maliyetlerin toplam navlun içerisinde %8,7 seviyelerine ulaşabileceğini işaret etmektedir. Intermodal taşıma alternatifinin ise karayoluna kıyasla %70 emisyon avantajı sağlayarak maliyet artışlarını minimize etmede en stratejik araç olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Karbon Düzenleme Mekanizmaları, Karbon Kaynaklı Lojistik Maliyetler, Intermodal Taşımacılık.

**JEL Kodları:** Q54, F18, R40.

## The Indirect Effect of Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) on Freight Prices: An Operational Cost Simulation Model

### Abstract

This study analyzes the financial impacts of this transformation on the Turkish logistics sector through the potential 'carbon premium' likely to be reflected in freight prices. A scenario-based descriptive case study was conducted specifically on the Izmir-Munich route, a strategic corridor for Turkish exports. Distinguishing itself from the idealized one-way models prevalent in existing literature, this study integrates round-trip operational costs and border-crossing inefficiencies into its framework. Monte Carlo simulations unveil that carbon-related costs can account for up to 8.7% of total freight pricing, representing a critical threshold. This finding underscores a significant operational risk for exporters, particularly in low-margin sectors. Furthermore, the study identifies Intermodal (Ro-Ro + Rail) transport as the most strategic structural tool, offering up to a 70% emission reduction compared to road transport.

**Keywords:** Carbon Border Adjustment Mechanisms, Carbon-Driven Logistics Costs, Intermodal Transportation.

**JEL Codes:** Q54, F18, R40.

\*\* Yüksek Lisans, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, [oykumyilmaz1@gmail.com](mailto:oykumyilmaz1@gmail.com), ORCID: 0009-0001-7962-5542

## 1. GİRİŞ

İklim değişikliği ile mücadele politikaları, sürdürülebilirliği uluslararası ticaretin devamlılığı için teknik bir zorunluluğa dönüştürmüştür (European Commission, 2019). Bu dönüşümün en somut aracı olan Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında kurgulanan Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM), AB pazarına girecek ürünlerin karbon içeriğine göre vergilendirilmesini öngörerek fiilen yeni bir 'yeşil duvar' niteliği taşımaktadır (European Parliament, 2023; Miteva, 2023). İhracatının yaklaşık %40'unu AB ülkelerine gerçekleştiren Türkiye ekonomisi için bu mekanizma, yönetilmesi gereken en stratejik dış ticaret riskidir (Ticaret Bakanlığı, 2024; TÜSİAD, 2020). Literatür incelendiğinde, SKDM tartışmalarının genellikle demir-çelik, çimento gibi enerji yoğun sektörlerin üretim süreçlerindeki emisyonlar üzerine yoğunlaştığı görülmektedir (Ulanov, 2023; Gracova, 2024). Ancak meselenin sıklıkla göz ardı edilen kritik boyutu, lojistik süreçlerdir. Her ne kadar SKDM'nin ilk fazı doğrudan taşıma faaliyetlerini vergilendirmese de; ürünün yaşam döngüsü analizi (LCA) boyunca oluşan "gömülü emisyonlar", ihracatçı için nihai maliyeti belirleyen temel unsurdur (World Economic Forum, 2023). SKDM'nin temel dayanağı olan 'Gömülü Emisyonlar' kavramı, taşıma süreçlerini ihracatçı için finansal bir risk haline getirmektedir. Bu durum, literatürde 'Dolaylı Maliyet Aktarım Mekanizması' olarak tanımlanabilir. İhracatçı firma, AB sınırında ödeyeceği karbon vergisini düşürmek adına, ürünün yaşam döngüsü boyunca oluşan emisyonları minimize etmekle yükümlüdür. Dolayısıyla lojistik kaynaklı karbon ayak izi, taşıyıcıdan ihracatçıya, oradan da nihai maliyete yansıyan bir 'Lojistik Karbon Primi' oluşturmaktadır. Özellikle Türkiye gibi karayolu taşımacılığına bağımlı ülkelerde, ürünün hedef pazara ulaştırılması sırasında oluşan yüksek karbon ayak izi, ihracatçının AB kapısındaki rekabet gücünü doğrudan aşındırma potansiyeline sahiptir (Cura ve Demir, 2022). Bu çalışmanın amacı, SKDM sürecinin ve buna paralel gelişen karbon fiyatlamalarının Türk lojistik sektörü üzerindeki olası maliyet etkilerini somut bir vaka üzerinden analiz etmektir. Çalışma kapsamında, Türkiye'nin en yoğun ihracat rotalarından biri olan İzmir-Münih hattı ele alınmış; navlun maliyetleri sadece tek yönlü değil, gidiş-dönüş sefer döngüsü ve sınır beklemeleri de dikkate alınarak senaryo bazlı bir analize tabi tutulmuştur. Amaç, belirsizliğin baskın olduğu bu geçiş sürecinde sektör paydaşlarına, maliyet artışlarını öngörebilecekleri veriye dayalı bir projeksiyon sunabilmektir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

İklim değişikliği ile mücadele politikalarının uluslararası ticaret üzerindeki etkileri, son yıllarda akademik yazının en dinamik tartışma alanlarından birini oluşturmaktadır. Mevcut çalışmalar Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması'nı (SKDM) ağırlıklı olarak üretim ve ticaret maliyetleri bağlamında ele alırken; bu çalışma SKDM'nin lojistik süreçler üzerindeki dolaylı maliyet etkilerini analiz ederek literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

SKDM'nin Ekonomi Politikası ve Küresel Ticaret başlığında konunun küresel boyutu ele alındığında; Keen, Parry ve Roaf (2022), SKDM'yi üretim kaymasını engelleyen mali bir araç

olarak tanımlanmaktadır. Miteva (2023) ise mekanizmanın AB ile ticaret yapan ülkeler için uyum sağlanması zorunlu yeni bir gümrük standardı oluşturduğunu belirtmektedir. Bu durumun jeopolitik etkilerine değinen Ulanov'un (2023) analizi, SKDM'nin küresel tedarik zinciri haritasını yeniden çizen stratejik bir araç olduğunu kanıtlar niteliktedir.

Küresel ölçekteki bu dönüşümün Türkiye Ekonomisi ve İhracat Pazarına Yansımaları incelendiğinde, yerel literatürde lojistik süreçlerin önemi ön plana çıkmaktadır. Cura ve Demir (2022), lojistik sektörünün bu dönüşümden en çok etkilenecek "hizmet ihracatçısı" konumunda olduğunu vurgulamaktadır. Eken ve Yazıcı (2024), maliyet baskısının sadece üretimle sınırlı kalmayacağını, taşıma süreçlerinin de dahil edilmesiyle rekabet gücünün ciddi oranda aşınabileceğini öngörmektedir. Sürecin ekonomik sürdürülebilirliği açısından Saraçoğlu ve Kutlu (2025), ulusal bir Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) kurulmazsa, vergi gelirinin AB'ye transfer edileceğine dikkat çekmektedir.

Söz konusu maliyet artışlarını anlamlandırmak için kullanılan Lojistik Maliyet Modelleri ve Karbon Fiyatlandırması yöntemleri, operasyonel tercihlerde belirleyici olmaktadır. Linton, Grant-Muller ve Gale (2015), karayolu taşımacılığında yakıt tüketimi temelli hesaplamaların en güvenilir sonuçları verdiğini belirtmiştir. Laakso (2022) ise SKDM'nin yöneticileri "karbon odaklı" rotalara geçmeye zorladığını savunmaktadır. Bu değişimin finansal yansıması olarak LTM (2025) raporları, "Karbon Primi" kavramının standart bir maliyet kalemi haline geleceğini öngörmektedir.

Tüm bu değişkenlerin ışığında, Yeşil Lojistikte Karar Verme Süreçleri ve Maliyet-Süre Dengesi ihracatçılar için kritik bir yol ayrımını temsil etmektedir. İntermodal taşımacılık emisyon avantajı sunsa da, transit süreleri uzattığı için ihracatçıyı "düşük karbon maliyeti" ile "yüksek stok/zaman maliyeti" arasında bir seçim yapmaya zorlamaktadır. Bu nedenle, güncel literatür ışığında sadece taşıma fiyatına değil, "Toplam Lojistik Maliyeti'ne" odaklanılması gerekmektedir.

### 3. YÖNTEM VE VERİ SETİ

Bu çalışmada senaryo bazlı durum analizi yöntemi kullanılmıştır. Analiz için Türkiye'nin AB ile ticaretinde stratejik öneme sahip olan İzmir (TR) - Münih (DE) rotası seçilmiştir. Mesafe yaklaşık 2.300 km olup, Kapıkule gibi kritik sınır kapılarındaki bekleme süreleri modele dahil edilmiştir. Model, tek yönlü (2.285 km) değil, toplam sefer döngüsü (yaklaşık 4.570 km) üzerinden yapılandırılmıştır.

#### 3.1. Araştırma Örnekleme ve Rota Varsayımları

Analiz için Türkiye'nin Avrupa kara koridorunu temsil eden İzmir (TR) – Münih (DE) hattı araştırma örnekleme olarak belirlenmiştir. Bu rotanın seçilmesi tesadüfi olmayıp; yaklaşık \$2.300\$ km'lik mesafesiyle ortalama AB içi sevkiyat menzillerini yansıması ve Kapıkule gibi kritik sınır kapılarındaki operasyonel 'belirsizlik' parametrelerini modele dahil etme imkanı

sunması bakımından stratejik bir öneme sahiptir. Bu sayede elde edilen bulgular, benzer mesafeli tüm Türkiye-AB karayolu sevkiyatları için kapsayıcı bir projeksiyon niteliği taşımaktadır.

Modelde kullanılan temel operasyonel parametreler şu şekilde yapılandırılmıştır:

**Araç Tipi ve Tüketim:** Uluslararası taşımacılık standartlarına uygun, 40 tonluk ve Euro 6 motor standartlarına sahip bir çekicinin ortalama yakıt tüketimi 32 Litre/100 km olarak temel alınmıştır.

**Operasyonel Verimsizlik ve Rölanti Faktörü:** Çalışmanın en kritik veri girdilerinden birini oluşturan % 5'lik operasyonel verimsizlik payı, sadece teorik bir yakıt hesabının ötesine geçerek saha gerçeklerini yansıtmayı amaçlamaktadır. Bu katsayı; sınır geçişlerindeki zorunlu dur-kalk döngülerinin, düşük devirde çalışma sırasındaki spesifik yakıt tüketim artışlarının ve Kapıkule gibi yoğun gümrük noktalarındaki beklenmedik gecikmelerin modele yansımalarıdır. Söz konusu oran belirlenirken, karayolu taşımacılığında emisyon modelleme teknikleri üzerine yapılan güncel saha çalışmaları (Linton vd., 2015) ve rota verimlilik analizleri referans alınmıştır.

**Sefer Döngüsü ve Doluluk:** Lojistik maliyetlerin doğası gereği, analiz sadece gidiş yönüyle sınırlı tutulmamış; aracın dönüş yükü veya boş dönüş riskini de kapsayacak şekilde toplam \$4.570\$ km'lik sefer döngüsü üzerinden kurgulanmıştır. Aracın gidiş yönünde, dönüş yönünde ise % 70 doluluk oranıyla çalıştığı varsayılmıştır.

### 3.2. Hesaplama Metodolojisi

Çalışmada Monte Carlo simülasyonu; karbon fiyatlarındaki volatilité ve sınır kapılarındaki bekleme süreleri gibi lojistik maliyetleri etkileyen operasyonel belirsizliklerin, olasılık temelli ve senaryo bazlı olarak analiz edilmesine imkan tanınması nedeniyle tercih edilmiştir. Monte Carlo simülasyonu Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelde, sınır kapılarındaki operasyonel verimsizlik arttıkça yakıt tüketiminin de yükseldiği pozitif bir korelasyon varsayılmış, böylece sahadaki rastsallık matematiksel olarak simüle edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan %5'lik rölanti ve operasyonel verimsizlik payı, çalışmayı salt bir yakıt hesabından çıkarıp bir 'Operasyonel Risk Simülasyonu' na dönüştürmektedir. Emisyon hesaplamaları, Global Logistics Emissions Council (GLEC) v3.0 çerçevesiyle uyumlu şekilde, mesafe bazlı yaklaşımların aksine yakıt bazlı bir yöntemle gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, İzmir-Münih rotasındaki 4.570 km'lik sefer döngüsünde kullanılan Euro 6 motor standartlarındaki çekiciler için dizel yakıt emisyon faktörü 2,68 kg CO<sub>2</sub>/Litre olarak baz alınmıştır. Emisyonlar, GLEC v3.0 standartlarına uygun olarak şu formül üzerinden modellenmiştir:

$$E_{Toplam} = (Mesafe_{Gidiş-Dönüş} \times Yakıt_{Ort}) + (Emisyon_{Rölanti})$$

Simülasyon modelinin tekrar edilebilirliğini sağlamak amacıyla, 10.000 iterasyonluk Monte Carlo analizinde kullanılan girdi değişkenleri ve bu değişkenlere atanan olasılık dağılımları Tablo 1'de özetlenmiştir:

**Tablo 1:** Monte Carlo Simülasyonu Girdi Değişkenleri ve Olasılık Dağılımları

Değişken Adı	Sembol	Dağılım Türü	Parametreler	Seçim Gerekçesi
Karbon Fiyatı	$C_p$	Üçgensel	Min: 60€, Mod: 85€, Maks: 130€	Piyasadaki fiyat dalgalanmaları ve gelecek projeksiyonları.
Operasyonel Verimsizlik	$I_{ops}$	Normal	Ort: %6, S.S: %2	Sınır kapısı beklentilerindeki rastsallık ve beklenmedik gecikmeler.
Yakıt Tüketimi	$F_c$	Uniform	30 - 35 L/100 km	Yük ve yol koşullarına bağlı olarak değişen standart aralık.

### 3.3. Senaryo Matrisi ve Karbon Fiyat Referansları

Çalışmanın özgün tarafı, maliyet projeksiyonlarını rastgele değerler yerine uluslararası kuruluşların öngörülerine dayandırmasıdır. SKDM maliyetleri için üç farklı senaryo geliştirilmiştir:

- Senaryo A (Mevcut Piyasa - 65 €/ton): Avrupa Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS) piyasasının 2024-2025 geçiş dönemi ortalamasıdır.
- Senaryo B (Orta Vadeli Artış - 85 €/ton): Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) "Net Zero 2050" yol haritasında, 2030 yılına doğru gelişmekte olan piyasalar için öngördüğü karbon fiyat bandını temsil etmektedir.
- Senaryo C (Yüksek Maliyet - 120 €/ton): OECD ve Dünya Bankası raporlarında, Paris İklim Anlaşması hedeflerine ulaşabilmek (küresel ısınmayı 1.5°C ile sınırlamak) için uygulanması gereken teşvik edici "gölge karbon fiyatı seviyesidir.

### 3.4. Alternatif Taşıma Modu (Intermodal)

Karayolu taşımacılığının maliyet analizine kıyaslama oluşturması amacıyla, modele Intermodal (Ro-Ro + Demiryolu) seçeneği de eklenmiştir. Bu senaryoda yükün İzmir-Trieste arasını denizyoluyla (Ro-Ro), Trieste-Münih arasını ise demiryoluyla kat ettiği varsayılmış; GLEC verilerine göre bu kombinasyonun karayoluna kıyasla %70 oranında emisyon tasarrufu sağladığı kabul edilmiştir. Intermodal seçeneğinin sağladığı emisyon tasarrufu ile karayoluna kıyasla oluşturduğu 2-3 günlük ek transit sürenin finansal etkisini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla, stok taşıma maliyeti modele destekleyici bir parametre olarak dahil edilmiştir. Bu parametre; ortalama yük değeri (CIF bazında 50.000€) ve yıllık %8 finansman maliyeti esas alınarak hesaplanmış olup, başa baş noktası analiziyle Tartışma bölümünde ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

## 4. BULGULAR

Bu bölümde, İzmir-Münih rotası için karbon ayak izi hesaplanmış ve maliyetler iki farklı perspektiften (Teorik vs. Operasyonel) analiz edilmiştir.

### 4.1. Karbon Ayak İzi: Teorik ve Operasyonel Farklılıklar

Analiz kapsamında, 40 tonluk bir aracın emisyon değerleri iki aşamada hesaplanmıştır.

- Teorik Hesap (Tek Yön): Sadece İzmir'den Münih'e gidiş (2.285 km) ve ideal yol koşulları varsayıldığında, sefer başına emisyon 1,96 Ton  $CO_2$  olarak hesaplanmıştır.
- Operasyonel Hesap (Sefer Döngüsü): Lojistik gerçeklikte aracın geri dönüşü ve sınır kapılarındaki rölanti süreleri (%5 tolerans) eklendiğinde, toplam emisyon 4,11 Ton  $CO_2$  seviyesine çıkmaktadır.

Bu iki değer arasındaki fark, lojistik maliyetlerin sadece yakıt değil, bir süreç yönetimi meselesi olduğunu kanıtlamaktadır.

### 4.2. Senaryo Bazlı Maliyet Analizi

Hesaplanan emisyon miktarları, üç farklı fiyat senaryosuyla (65€, 85€, 120€) eşleştirilerek Tablo 2'de sunulmuştur. Tabloda, kâğıt üzerindeki maliyet ile ihracatçının cebinden çıkacak gerçek maliyet arasındaki makas net bir şekilde görülmektedir.

**Tablo 2:** SKDM Maliyet Senaryoları Karşılaştırması

Senaryo	Karbon Fiyatı	Teorik Maliyet (Tek Yön)*	Operasyonel Maliyet (Gidiş-Dönüş)**	Fark (Risk)
Senaryo A	65€	127,40€	267,15€	+139,75 €
Senaryo B	85€	166,60€	349,35€	+182,75 €
Senaryo C	120€	235,20€	493,20€	+258,00 €

\*Teorik Maliyet: Literatürdeki standart tek yönlü mesafe ve ideal akış varsayımlarını temsil etmektedir.

\*\*Operasyonel Maliyet: Gidiş-dönüş sefer döngüsü ve sınır kapısı beklemelerini içeren toplam maliyet yükünü temsil etmektedir.

Tablo 2 incelendiğinde; eğer lojistik planlama sadece "tek yön" üzerinden yapılırsa (166€), ihracatçının gerçek maliyeti (349€) öngöremediği ve sefer başına yaklaşık 183€'luk bir bütçe sapması yaşayacağı görülmektedir. Bu bulgu, SKDM sürecinde "boş dönüşlerin" maliyetinin artık sadece yakıt değil, ciddi bir karbon vergisi yükü getireceğini göstermektedir.

**Tablo 3:** Karbon Maliyetinin Navlun Üzerindeki Hassasiyet ve Risk Analizi

Senaryo	Karbon Fiyatı	Karbonun Navlun İçindeki Payı (%)	Risk Seviyesi
Senaryo A	65€	~%4,2	Düşük
Senaryo B	85€	~%5,5	Orta
Senaryo C	120€	~%7,8	Yüksek

Tablo 3'de sunulan hassasiyet analizi, lojistik operasyonların karbon fiyatlarına karşı olan finansal kırılganlığını temsil etmektedir. Karbon fiyatının 120€ seviyesine çıktığı yüksek maliyet senaryosunda (Senaryo C), karbon vergisinin toplam navlun içerisindeki payının yaklaşık %8 seviyesine ulaşması, özellikle düşük kar marjı ile çalışan Türk lojistik firmaları için lojistik işletmelerin mevcut maliyet yapıları üzerinde yoğun bir baskı oluşturabileceğine ve kâr marjlarının yönetimi açısından ek operasyonel zorluklar doğurabileceğine işaret etmektedir.

Sabit senaryolara ek olarak, karbon fiyatları ve operasyonel belirsizliklerin birleşik etkisini ölçmek amacıyla gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyon sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur.

**Tablo 4:** SKDM Navlun Karbon Primi - Monte Carlo Risk Projeksiyonu

Parametre	Alt Sınır (%5 Olasılık)	Beklenen (Ortalama)	Üst Sınır (%95 Risk)
Toplam Sefer Emisyonu (CO2 Ton)	3,85 Ton	4,15 Ton	4,48 Ton
Sefer Başı Karbon Maliyeti (€)	245,50€	372,20€	545,80€
Karbonun Navlun İçindeki Payı (%)	%3,8	%5,9	%8,7

Simülasyon sonuçları, İzmir-Münih rotasında SKDM kaynaklı ek maliyet yükünün sadece tek yönlü mesafe üzerinden hesaplanamayacağını kanıtlamaktadır. Beklenen değerlere göre, karbon maliyetinin navlun içindeki payı yaklaşık %5,9 iken, operasyonel verimsizliklerin ve karbon fiyatlarındaki artışın eşleştiği en kötü senaryoda bu oran %8,7 seviyesine fırlamaktadır. Bu durum, düşük kâr marjlı ihracat kalemlerinde maliyet yönetimi süreçlerinin yeniden yapılandırılmasını gerektiren ve operasyonel verimlilik üzerinde ek bir baskı unsuru oluşturabilecek kritik bir eşik olarak değerlendirilmektedir.

### 4.3. Yapısal Çözüm: Intermodal

Benzer bir karşılaştırma Intermodal taşıma için yapıldığında, operasyonel maliyet avantajı daha belirgin hale gelmektedir. En yüksek senaryoda (120€) karayolu operasyonel maliyeti 493€ iken, Intermodal seçeneği bu maliyeti ~148€ seviyesinde tutmaktadır.

**Tablo 5:** Karayolu ve Intermodal Taşımacılık Karşılaştırması (Senaryo C, 120€/ton)

Taşıma Türü	Toplam Emisyon (ton CO <sub>2</sub> )	Karbon Maliyeti (€)	Emisyon Azaltımı (%)
Karayolu	4,11	493€	—
Intermodal (Ro-Ro + Demiryolu)	~1,23	~148€	%70

\*Emisyon hesabı:  $4,11 \text{ ton} \times (1 - 0,70) = \sim 1,23 \text{ ton CO}_2$ . Karbon maliyeti:  $1,23 \text{ ton} \times 120\text{€} = \sim 148\text{€}$ . Kaynak: GLEC v3.0

#### 4.4. Doluluk Oranı Duyarlılık Analizi

Temel modelde dönüş yönündeki doluluk oranı %70 olarak varsayılmıştır. Ancak Türkiye'nin ihracat-ithalat dengesizliği göz önünde bulundurulduğunda, bu oran mevsimsel ve ticari koşullara göre önemli döngüler gösterebilmektedir. Bu riskin boyutlarını nicelendirmek için üç farklı doluluk senaryosu analiz edilmiştir: düşük doluluk (%50), temel senaryo (%70) ve yüksek doluluk (%90). Hesaplamalar, Senaryo B (85€/ton karbon fiyatı) üzerinden gerçekleştirilmiştir. Doluluk oranı %50'ye düştüğünde, toplam sefer emisyonu 4,55 Ton CO<sub>2</sub>'ye yükselirken, sefer başı karbon maliyeti yaklaşık 387€'ye yükselmektedir; bu durum navlun içindeki karbon payını yaklaşık %6,1 düzeyine taşımaktadır. Temel senaryoda (%70 doluluk) karbon maliyeti yaklaşık 349€ ve navlun payı ~%5,5 olarak hesaplanmıştır. Yüksek doluluk senaryosunda (%90) ise dönüş yükünün artması sefer başına düşen emisyonu hafifçe düşürürken, toplam karbon maliyeti yaklaşık 321€ olarak gerçekleşmekte ve navlun içindeki pay %5,1'e gerilemektedir. Bu duyarlılık analizi, doluluk oranındaki %20'lik bir düşüşün (temel senaryodan boş dönüş doğru) karbon primini yaklaşık 38€ artırabileceğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, Türkiye'nin ihracat fazlasının yüksek olduğu güz-bahar dönemlerinde boş dönüş riskinin karbon maliyeti açısından da izlenmesi gerektiğine işaret etmekte; sektörel aktörler için doluluk oranı optimizasyonunun salt bir verimlilik aracı olmadığını, aynı zamanda karbon risk yönetiminin ayrılmaz bir bileşeni olduğunu göstermektedir.

### 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma, SKDM'nin Türk lojistik sektörü üzerindeki olası maliyet ve rekabet etkilerini uygulamalı bir örnek üzerinden analiz ederek tartışmaya açmaktadır. İzmir-Münih hattı özelinde yapılan analizler, lojistik maliyetlerin artık sadece yakıt ve mesafe üzerinden hesaplanamayacağını; "karbon maliyeti" ve sınır kapılarındaki beklentilerin de denkleme dahil edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

#### 5.1. Teorik ve Gerçekleşen Maliyet Farkı: Literatürle Karşılaştırmalı Bir Analiz

Bu çalışmada elde edilen bulgular, lojistik maliyetlerin artık sadece geleneksel parametrelerle ölçülemeyeceğini, karbon maliyetinin denklemini temelden değiştirdiğini göstermektedir. Literatürde yer alan mevcut çalışmaların büyük bir bölümü, SKDM ve lojistik etkilerini genellikle idealize edilmiş 'tek yönlü' rotalar üzerinden analiz etmektedir. Ancak bu

çalışma, lojistik sektörünün sahadaki gerçeği olan 'gidiş-dönüş sefer döngüsünü' ve sınır kapılarındaki operasyonel beklmeleri modele dahil ederek literatürdeki bu metodolojik boşluğu doldurmayı hedeflemiştir.

Analiz sonuçları göstermektedir ki; sadece tek yönlü mesafe baz alındığında ortaya çıkan karbon yükü yönetilebilir seviyelerde görünürken, operasyonel gerçeklikte bu maliyet yaklaşık iki katına (~350 €) çıkmaktadır. Bu bulgu, SKDM sürecinde 'boş dönüşlerin' sadece bir verimlilik sorunu değil, aynı zamanda ciddi bir emisyon maliyeti haline geleceğini kanıtlamaktadır. Navlun fiyatlarında %8,7 bandına ulaşan bu sapma, özellikle kâr marjı düşük sektörlerde rekabetçi fiyatlandırma yeteneğini kısıtlayabilecek stratejik bir engeldir. Bu yönüyle bu çalışma, karbon odaklı maliyetlerin sadece üretim aşamasında değil, taşıma süreçlerinde de bir 'Lojistik Karbon Primi' oluşturacağına dair literatürdeki öngörülerini ampirik verilerle desteklemektedir.

## 5.2. Sektörel ve Yönetimsel Öneriler

Bu çalışmada elde edilen bulgular ve gerçekleştirilen risk projeksiyonları, Türk lojistik sektörünün SKDM sürecinde geleneksel 'bekle-gör' yaklaşımı yerine, proaktif bir 'aktif uyum' stratejisine yönelmesinin önemine işaret etmektedir. Simülasyon analizlerinde tespit edilen %8,7'lik maliyet sapması, Türkiye'nin AB ile olan ticaretinde lojistik verimliliğinin artık sadece bir 'zaman' boyutuyla değil, doğrudan bir 'karbon maliyeti' perspektifiyle analiz edilmesinin gerekliliğini vurgular niteliktedir. Bu riskin etkin yönetimi adına, Türkiye'nin kendi ulusal Emisyon Ticaret Sistemi'ni (ETS) hayata geçirmesi ve buradan elde edilecek kaynağın yeşil lojistik altyapı projelerine (intermodal terminaller veya elektrikli filolar gibi) kanalize edilmesi, sektörün uzun vadeli rekabet gücü açısından kritik bir hamle olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, sınır kapılarındaki operasyonel beklmelerin karbon ayak izi üzerindeki doğrudan etkisi göz önüne alındığında; 'Yeşil Hat' uygulamalarının dijital gümrük süreçleriyle entegre edilmesinin ve rölanti sürelerinin minimize edilmesinin, sürecin sürdürülebilirliği açısından stratejik bir öncelik arz ettiği düşünülmektedir. Bu dönüşümün sistemli bir şekilde yönetilebilmesi için şu stratejik adımların atılması önerilmektedir:

"Sözleşmelerde "Karbon Maddesi" Dönemi: Mevcut navlun sözleşmelerinin, karbon fiyatlarındaki volatilitiyi yönetecek şekilde güncellenmesi gerekmektedir. Taşıyıcıların, yakıt farkı (BAF) uygulamasına benzer şekilde, karbon vergisi yükünü adil bir şekilde yansıtan "Karbon Maliyet Maddeleri" oluşturmaları, simülasyon sonuçlarında görülen %8,7'lik üst sınır riskine karşı finansal bir koruma sağlayacaktır.

Intermodal Taşımacılığın Rasyonelleştirilmesi: Karayoluna kıyasla %70 emisyon avantajı sağlayan intermodal (Ro-Ro + Demiryolu) taşımacılık, sadece çevresel bir tercih değil, rasyonel bir maliyet yönetimi aracı olarak görülmelidir. İhracatçıların, transit süredeki 2-3 günlük artışı

"zaman kaybı" olarak değil; karbon maliyetinden kaynaklanan %8-9'luk navlun artışını absorbe eden bir "maliyet avantajı" olarak değerlendirmeleri stratejik bir zorunluluktur.

Stok ve Zaman Yönetimi Dengesi: Lojistik yöneticileri için temel karar eşiği, karbon vergisi tasarrufu ile stok taşıma maliyeti arasındaki dengedir. Analizler, sefer başına yaklaşık 350€'ya ulaşan karbon maliyetinin, tekstil ve hammadde gibi katma değeri orta-düşük ürün gruplarında zaman maliyetinden çok daha ağır bastığını göstermektedir. Bu dengeyi somutlaştırmak amacıyla aşağıda başa baş noktası analizi sunulmaktadır: Intermodal taşımacılığın sağladığı karbon maliyeti tasarrufu, en yüksek senaryo (120€/ton) altında sefer başına yaklaşık 345€ (493€ – 148€) olarak hesaplanmıştır. Orta senaryo (85€/ton) altında ise bu tasarruf yaklaşık 201€ düzeyinde kalmaktadır. Stok taşıma maliyeti hesaplamalarında temel alınan yöntem şudur: Ortalama yük değeri (CIF bazında yaklaşık 50.000€), finansman maliyeti oranı olarak yıllık %8 ve 2-3 günlük ekstra transit süre baz alındığında, günlük stok taşıma maliyeti yaklaşık 11€ (50.000 × 0,08 / 365) olarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla 2 gün gecikme için stok maliyeti yaklaşık 22€, 3 gün için ise yaklaşık 33€ düzeyine ulaşmaktadır. Bu rakamlar, karbon tasarrufunun (201-345€ aralığı) stok taşıma maliyetinin (22-33€) çok üzerinde olduğunu göstermektedir. Başa baş noktası, stok taşıma maliyetinin karbon tasarrufuna eşitlendiği yük değeri olarak hesaplandığında, orta senaryo (85€/ton) altında bu eşik yaklaşık 915.000€'lik bir yük değerine karşılık gelmektedir. Bu eşiğin üzerindeki yük değerlerine sahip yüksek katma değerli ürünler (mücevher, elektronik gibi) için zaman maliyeti ağır basabilmekte; ancak Türkiye ihracatının büyük çoğunluğunu oluşturan tekstil, beyaz eşya ve kimyasal hammadde sektörlerinde bulgular intermodal seçeneğin finansal açıdan daha avantajlı olduğuna işaret etmektedir.

**Tablo 6.** Intermodal-Karayolu Karbon Tasarrufu ve Stok Taşıma Maliyeti Dengesi (Başa Baş Analizi)

Senaryo	Karbon Tasarrufu (€/Sefer)	Stok Maliyeti - 2 Gün (€)	Stok Maliyeti - 3 Gün (€)	Net Finansal Avantaj (€)
Senaryo B (85€/ton)	201	~22	~33	~168-179
Senaryo C (120€/ton)	345	~22	~33	~312-323

\*Stok taşıma maliyeti hesabı:  $Yük\ değeri\ (CIF \approx 50.000€) \times Yıllık\ finansman\ oranı\ (\%8) / 365 \approx 11€/gün$ . 2 günlük transit fark için  $\approx 22€$ ; 3 gün için  $\approx 33€$ .

Şeffaf Karbon Raporlaması ve Dijital Altyapı: Gelecekteki lojistik ihalelerinde belirleyici kriter sadece fiyat değil, "şeffaf emisyon raporlaması" olacaktır. Firmaların, emisyon verilerini dijital araçlarla izleyip ihracatçıya sunabilmesi, AB pazarındaki rekabet güçlerini doğrudan etkileyecektir.

Operasyonel Verimsizliklerin Giderilmesi: Sınır kapılarındaki beklentilerin karbon faturasına olan doğrudan etkisi, bu süreçlerin dijitalleşmesini ve "yeşil hat" uygulamalarının hızlandırılmasını gerektirmektedir. Sınırdaki geçen her saatin artık sadece zaman değil, aynı zamanda bir karbon maliyeti olduğu unutulmamalıdır.

Sonuç olarak bu çalışma, SKDM'nin lojistik sektörüne yansıyan dolaylı maliyet etkilerini operasyonel gerçeklikler çerçevesinde ele alarak, navlun fiyatlaması ve taşıma modu tercihleri üzerine veri temelli bir değerlendirme sunmaktadır. Bulguların, özellikle düşük kâr marjı ile faaliyet gösteren sektörler açısından maliyet yönetimi ve stratejik planlama süreçlerine katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

### 5.3. Kısıtlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu araştırma, Türkiye'nin Avrupa ile olan dış ticaret hacminde kritik bir ağırlığa sahip olan İzmir-Münih karayolu koridorunu merkeze almaktadır. Rotanın seçimi, mesafe ve sınır geçiş yoğunluğu bakımından 'temsili bir Avrupa kara koridoru' sunması açısından stratejik olsa da, elde edilen bulguların tüm lojistik ağlara genelleştirilmesi noktasında belirli kısıtlar barındırmaktadır. Özellikle farklı sınır kapısı karakteristikleri, %8,7 olarak tespit edilen maliyet sapmasının diğer hatlarda değişkenlik göstermesine neden olabilir. Dolayısıyla bu çalışma, bir 'temel projeksiyon' niteliği taşımakta olup, gelecek çalışmalarda elektrikli çekicilerin toplam sahip olma maliyetleri (TCO) ve farklı rota alternatiflerinin dahil edilmesi, literatüre daha geniş bir derinlik kazandıracaktır.

## KAYNAKLAR

Avrupa Komisyonu. (2019). *The European Green Deal* (COM(2019) 640 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>

Cura, F., & Demir, S. (2022). Possible impacts of the European Green Deal on Turkey's logistics industry. *Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, 33, 825–839.

Eken, A. A., & Yazıcı, D. (2024). Sınırdaki Karbon Düzenlemesi Mekanizmasının Türkiye'nin AB ihracatına olası etkileri. *Başkent Üniversitesi Ticari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(1), 1–15.

European Parliament. (2023). *Regulation (EU) 2023/956 establishing a carbon border adjustment mechanism*. Official Journal of the European Union.

GLEC. (2023). *Global Logistics Emissions Council framework for logistics emissions methodologies (v3.0)*. Smart Freight Centre.

Gracova, K. (2024). *Impact of Carbon Border Adjustment Mechanism on international trade* [Yayımlanmamış çalışma veya Rapor].

IEA. (2025). *World energy outlook 2025: Projections for global carbon markets*. International Energy Agency.

Keen, M., Parry, I., & Roaf, J. (2022). Border carbon adjustments: Rationale, design and impact. *Fiscal Studies*, 43(3), 205–227. <https://doi.org/10.1111/1475-5890.12297>

Laakso, O. (2022). *The impact of Carbon Border Adjustment Mechanism on supply chain decision making* [Yüksek lisans tezi, Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT]. LUTPub.

Linton, C., Grant-Muller, S., & Gale, W. F. (2015). Approaches and techniques for modelling CO2 emissions from road transport. *Transport Reviews*, 35(4), 533–553. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1030004>

LTM. (2025). *Logistics Trend Monitor: 2025 sektör raporu ve gelecek projeksiyonları* [Sektörel rapor].

Miteva, N. (2023). EU Carbon Border Adjustment Mechanism: Opportunities and challenges. *KNOWLEDGE – International Journal*, 58(1), 59–65.

Saraçoğlu, F., & Kutlu, M. (2025). Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması ve Türkiye'ye olası etkileri. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 27(1).

T.C. Ticaret Bakanlığı. (2024). *Avrupa Yeşil Mutabakatı eylem planı ve Türkiye etki analizi*. Ticaret Bakanlığı Yayınları.

Trading Economics. (2026, Ocak). *EU carbon permits market data*.  
<https://www.tradingeconomics.com>

TÜSİAD. (2020). *Ekonomik göstergeler merceğinden yeni iklim rejimi raporu*. Türk Sanayicileri ve İş İnsanları Derneği.

Ulanov, V. L. (2023). Impact of EU carbon border adjustment mechanism on the economic efficiency of Russian oil refining. *Journal of Mining Institute*, 260, 285–295.

World Economic Forum. (2023). *Emissions measurement in supply chains: Business realities and challenges*. World Economic Forum.