

LOJİSTİK MALİYETLER VE YEŞİL LOJİSTİK: DIŞSAL MALİYETLERİN ANALİZİ¹

Makale Bilgileri

Geliş Tarihi : 15.03.2023
Kabul Tarihi : 22.05.2023
Türü : Araştırma Makalesi
DOI Numarası : 10.55322/mdbakis.1265919

Kaan Ali AYAN*
Doç. Dr. Seçil SİGALI**

Bibliyografik Bilgiler

Ayan, K., A., & Sigalı, S. (2023). "Lojistik Maliyetler ve Yeşil Lojistik: Dışsal Maliyetlerin Analizi"
Muhasebe ve Denetime Bakış Dergisi (Yıl: 2023, Sayı : 70, Sayfa : 247-270)
<https://doi.org/10.55322/mdbakis.1265919>

ÖZ

Yeşil lojistik, lojistik faaliyetlerin yarattığı dışsal (çevresel) maliyetleri inceleyerek, nasıl ölçülebileceğine ve azaltılabileceğine yönelik yolları araştırır. Sürdürülebilirlik raporlamasının da en önemli sorunlarından biri olan dışsal maliyetlerin ölçümü, bu çalışmanın ana motivasyonunu oluşturmaktadır. Bu çalışmada, şehir lojistiğinde dışsal maliyetlerin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kargo ve kurye operatörlerinin şehir içi taşımalarının maliyet analizi yapılmıştır. Seçilen istatistiksel tam maliyet modeli, kargo ve kurye operatörlerinin taşıma sistemine uygun hale getirilmiş ve literatüre göre oluşturulan senaryo baz alınarak, matematiksel yöntem ile analiz edilmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, intermodal karayolu/demiryolu taşıma, kargo ve kurye hizmetlerinin sadece dışsal maliyetlerini değil, tam (içsel ve dışsal) maliyetlerini de önemli ölçüde azaltmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Lojistik Maliyetler, Sürdürülebilirlik Raporlaması, Dışsal Maliyetler, Yeşil Lojistik

JEL Sınıflandırması: M41, R4, Q51, L91

¹ Bu çalışma, 2021 yılında, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü "ŞEHİR LOJİSTİĞİNDE DIŞSAL MALİYETLERİN ÖLÇÜMÜ: KARGO VE KURYE HİZMETLERİNİN MALİYET ANALİZİ" başlıklı yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

* Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, kaanayans@gmail.com, 02323018801, orcid: 0000-0003-2113-7818

** Dokuz Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Lojistik Yönetimi Bölümü, secil.sigali@deu.edu.tr, 02323018816, orcid: 0000-0002-8037-6619

LOGISTICS COSTS AND GREEN LOGISTICS: AN ANALYSIS OF EXTERNAL COSTS**ABSTRACT**

Green logistics research, evaluates and measures the external-environmental costs caused by the logistics activities. The main motivation of this study relates to Sustainability Reporting external cost measurement issues. The purpose of this study is to measure external costs in city logistics. For this purpose, a cost analysis is performed for the operations of Courier/Express/parcel service providers. The statistical full cost model which is chosen for this study has been applied to the transportation system of Courier/Express/parcel operators and the scenario that is constituted with the help of literature is analysed with mathematical method. Used model allows to analyse full costs (sum of internal and external costs) for different transportation systems when related parameters are detected. According to the findings of the study, intermodal roadway/railway transportation reduces not only external costs but also full costs of service providers.

Keywords: Logistics Costs, Sustainability Reporting,

Jel Codes: M41, R4, Q51, L91

1. GİRİŞ

Sürdürülebilir bir gelecek yaratmak amacıyla, 1994 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve 2015 yılında Paris Anlaşması imzalanması sonrası, 2050 yılına kadar Avrupa'yı sera gazlarından arındırmayı amaçlayan Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2019 yılında yayımlanmıştır. Yeşil mutabakat, karayolu üzerinde yoğunlaşan yük akışını azaltarak, mevcut veya yeni denizyolu ve demiryolu hatlarına kaydırarak, sürdürülebilir bir ulaştırma politikasını hedeflemektedir.

Bu çalışmalar kapsamında literatürde yerini sağlamlaştıran “yeşil lojistik”, Mckinnon vd. (2015) tarafından; “fiziksel eşyaların tedarik zincirindeki ileri ve geri yönlü hareketleri boyunca taşınması, depolanması ve elleçlenmesine yönelik faaliyetlerin çevresel etkilerine yönelik çalışmalar” olarak tanımlanır. Bugün yeşil lojistik olarak tanımlanan araştırma alanı, 1960’lardan beri taşımacılıktaki dışsal (çevresel) maliyetlerin azaltılması, şehir lojistiği, tersine lojistik ve yeşil tedarik zinciri yönetimine ilişkin kurumsal çevreci stratejiler başlıklarına ait çalışmaların bir sonucudur (Mckinnon vd., 2015). Günümüzde sürdürülebilirlik raporlamasının da en önemli sorunlarından biri olan dışsal maliyetlerin ölçümünde ve değerlendirilmesinde, yeşil lojistik alanında yapılan çalışmalar önemli bir rol oynamaktadır. Dışsal maliyetler, trafik sıkışıklığı, kazalar, sera gazı salınımı, vb. gibi; bedelini kendini oluşturanlar yerine, toplumun ve çevrenin ödediği maliyetlerdir (CE Delft, 2008; Rodrigue, 2013).

Kargo ve kurye hizmetleri, özellikle nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu şehirsiz bölgelerde son kilometre lojistiği hizmeti sağlayan, lojistiğin hem içsel (operasyonel) hem de dışsal maliyet açısından en pahalı uygulamalarından biridir ve doğası gereği yüksek oranda karayolu taşımacılığına dayanmaktadır (Rodrigue, 2013; DFT, 2013).

Karayolu taşıma modu, diğer modlara göre en fazla dışsal maliyete sahip taşıma modu olup, CO² salınımının en büyük etmenlerinden biri olmasına rağmen (CE Delft, 2008) yurtiçi yük taşımacılığının Türkiye’de %90, AB’de %75’lik kısmını oluşturmaktadır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018). Alternatif taşıma modlarına yönelerek karayolu taşımasının azaltılması, oluşturduğu dışsal maliyetlerin de azaltılmasına olanak sağlayacaktır (Kordnejad, 2014). Dışsal maliyetlerin kendisini oluşturan lojistik operatörler tarafından göz önünde bulundurulması için ilave yaptırımlar gerekmekte, firmaların yeni stratejilere dair motivasyonları ise maliyet faktörü ile şekillenmektedir (CE Delft, 2008).

Kargo ve kurye sektörü kapıdan kapıya teslimat, diğer bir deyişle son kilometre lojistiği hizmeti verdiği için doğası gereği karayolu taşıma moduna bel bağlamaktadır. Bununla birlikte demiryolu taşıma modu, karayoluna göre çok daha yeşil ve sürdürülebilir, belli koşullarda daha düşük maliyetli bir taşıma modu olup (Janić, 2007) büyük şehirlerdeki demiryolu taşıma altyapısı göz önünde bulundurulduğunda, intermodal karayolu/demiryolu taşıma seçeneği hem kentsel bölgelerde hizmet veren kargo ve kurye sektörü için, hem de şehir lojistiği için yeşil lojistik stratejisi olarak potansiyel fırsat teşkil etmektedir. Buradan yola çıkarak çalışmanın amacı; yalnızca karayolu taşıma modu kullanan kargo ve kurye operatörlerinin intermodal karayolu/demiryolu taşıma modu kullanmaları halinde maliyetlerinin nasıl değişeceğini araştırmak olarak belirlenmiştir.

Literatürde taşımacılığın dışsal maliyet faktörleri sıkça tartışılmış olsa da ölçülebilmesi için gereken model ve sayısal değerlere ait yeterli bulgu bulunmamaktadır. Bu çalışma, karayolu ve intermodal demiryolu/karayolu taşıma modu kullanan yük taşıyıcıların tam (içsel ve dışsal maliyetler toplamı) maliyetlerini ölçebilmeleri ve dolayısıyla yönetebilmeleri için gereken parametreleri ve hesapları, seçilen model ve oluşturulan senaryo çerçevesinde ortaya koymaktadır. Böylelikle, büyük metropollerin şehir merkezinde hizmet veren kargo ve kurye firmalarının günlük operasyonlarına dair çevresel istatistikler paylaşarak değişken parametreler için senaryo yaratılabilmelerine ve dışsal maliyetlerini ölçerek, sürdürülebilirlik raporlaması kapsamında raporlayabilmelerine olanak sağlamak da amaçlanmıştır.

2. LOJİSTİK MALİYETLER

Zeng ve Rossetti (2003) lojistik maliyet kategorilerini taşıma, depolama, sipariş işleme, yönetimsel giderler, envanter tutma maliyetleri, gümrükleme maliyetleri ile risk ve hasar maliyetleri olarak belirlemiş ve uluslararası lojistik operasyonları da kapsayan bir sınıflandırma yapmıştır. Engblom vd. (2012), lojistik maliyetleri taşıma, depolama, envanter tutma, yönetimsel, paketleme ve dolaylı lojistik maliyetler olarak sınıflandırmıştır. Silva vd. (2014)’nin yaptığı çalışmanın sonuçları, lojistik maliyet kategorileri olarak depolama, taşıma, paketleme, envanter tutma, sipariş işleme ve bilgi teknolojileri, vergiler ve lojistik yönetimsel giderleri önermektedir. Bu çalışmada temel olarak, lojistik maliyetler içerisindeki taşıma maliyetlerine odaklanılmıştır.

2.1. Taşıma Maliyetleri

Taşıma maliyetleri; içsel (operasyonel) maliyetler, zaman maliyeti ve dışsal (çevresel) maliyetler olarak sınıflandırılabilir (İzadi vd., 2020). Lojistiğin temel amacı maliyetleri, başta da taşıma maliyetlerini azaltmaktır. Taşıma maliyetleri, en çok dikkat çeken lojistik maliyet kalemidir (Rodrigue, 2013).

2.1.1. İçsel (Operasyonel) Taşıma Maliyetleri

İzadi vd., (2020)'nin çalışmasına göre içsel maliyetler, sabit ve değişken maliyetler olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Sabit maliyetler; yatırım, eskime, sigorta ve tescil giderleridir. Değişken maliyetler ise yakıt, yakıt vergileri, yağ, tekerlek ve amortisman giderleri, bakım ve tamir giderleri, eleman masrafları ile park ve otoyol masrafları olarak sınıflandırılmıştır. Bu çalışmaya göre dışsal maliyetlerden çevresel olanlar da iklim değişikliği, gürültü kirliliği, hava kirliliği ve su kirliliği olmak üzere 4 başlıkta toplanmıştır (İzadi vd., 2020:16-17).

NCFRP (2013) raporuna göre içsel (operasyonel) taşıma maliyetleri, şirketin günlük işleyişi esnasında ortaya çıkan maliyetlerdir ve bileşenleri, İzadi vd. (2020)'nin araştırmasına paralel şekilde değişken ve sabit olmak üzere ikiye ayrılır: Değişken maliyetler yakıt, yakıt vergisi, yağ, lastik ve yıpranma, bakım ve onarım, personel maaşları, zaman maliyeti ve park ve otoyol ücretleri olarak sınıflandırılırken sabit maliyetler yatırım sermayesi, eskime maliyeti, sigorta ve kayıt ve tescil ücretleridir.

Hooper ve Murray (2018), içsel (operasyonel) maliyetleri marjinal maliyetler üzerinden analiz etmişlerdir. Marjinal maliyetler, taşıma kapasitesine her bir ilave birimin eklenmesi durumunda toplam maliyetteki değişim olarak ifade edilebilir ve genel olarak ölçek ekonomisine sahip olma eğilimindedir (Teodorović ve Janić, 2017). Hooper ve Murray (2018), marjinal operasyonel maliyetleri araç ve personel temelli olarak üzere ikiye ayırmıştır; Araç temelli marjinal maliyetler; Yakıt, Araç satın alma masrafları, Tamir ve bakım masrafları, Araç sigorta prim masrafları, özel izin ve lisanslar ve otoyol ücretleridir. Personel temelli marjinal maliyetler ise sürücü masrafları ve sürücü sosyal hakları olarak sınıflandırılmıştır (Hooper ve Murray, 2018:18)

2.1.2. Dışsal (Çevresel) Taşıma Maliyetleri

Dışsal maliyetler taşımacılık faaliyetlerini gerçekleştirenler tarafından tam olarak karşılanmazlar ve genelde taşıma kararı verirken hesaba katılmazlar (Digiesi vd., 2016). Kapıdan kapıya teslimat, hangi modun kullanıldığından bağımsız bir şekilde toplum üzerinde yük oluşturur. Oluşan bu yük, sürekli ve yoğun olup fiyatlara yansıtılmıyor ise dışsal maliyetler olarak kabul edilirler (Janić, 2007). CE Delft (2008), taşımacılıkta dışsal maliyetler üzerine yapmış olduğu çalışmada dışsal maliyetleri, politika müdahalesi olmadığında taşıma işini yapanlar tarafından hesaba katılmayan, topluma ait maliyetler olarak tanımlamıştır. Bu çalışmada üzerinde durulan temel maliyet kategorileri trafik sıkışıklığı, altyapı yetersizliği (gecikmeli ulaşım), trafik kazaları, hava kirliliği, gürültü, doğal hayat ile yukarı ve aşağı yönlü süreçler olmuştur (CE Delft, 2008). Move (2014), dışsal maliyet faktörü olarak trafik kazaları, gürültü, iklim değişikliği, trafik sıkışıklığı, hava kirliliği, altyapı aşınması ve yolcu/yük taşımacılığının diğer yukarı ve aşağı yönlü çevresel etkilerini ele almıştır (Move, 2014).

Beuthe vd. (2002), trafik sıkışıklığının taşımaya ilişkin maliyetlerinin nakliye şirketleri tarafından fiyatlara yansıtıldığını, bu sebeple dışsal maliyet olarak değerlendirilemeyeceğini tartışmıştır. Ancak yol ağına dahil olan her ilave araç, ağda halihazırda bulunan araçlar için ilave gecikme yaratacaktır (Sansom vd. 2001). Ayrıca trafik hızı 20 km/s altında seyrettiğinde araçların yakıt tüketimi ve CO² salınımında ciddi bir artış oluşmaktadır (SMMT, 2005). Piecyk ve McKinnon (2007), Birleşik Krallık 'daki karayolu yük taşınması kaynaklı dışsal maliyetlere ait yaptığı çalışmada dışsal maliyetlerin %40'ının trafik sıkışık-

lığı, %23'ünün altyapı, %19'unun trafik kazası, %8'inin sera gazı salınımı, %7'sinin diğer hava kirliliği etmenleri ve %2'sinin gürültü kirliliği kaynaklı olduğu sonucuna varmışlardır.

Trafik sıkışıklığı, karayoluna ait dışsal maliyetlerin en büyük payını oluşturan faktördür (CE Delft, 2011; Piecyk ve McKinnon, 2007). Matsuoka vd. (2011), trafik sıkışıklığının kurye ve şoförler için önemli bir stres kaynağı olduğundan ve artan sürüş süresinin yüksek egzoz kirliliğine daha uzun süre maruz kalma anlamına geldiğinden bahsetmiştir. Smith vd. (2005), dışsal maliyetlerin yaklaşık %50'sini otomobillerin, %27'sini ise ticari araçların oluşturduğunu hesaplamıştır.

CE Delft (2019:34) raporunda dışsal (çevresel) maliyet kategorilerinin dışsallık seviyeleri şu şekilde ifade edilmiştir;

Tablo 1. Dışsal maliyet kategorilerinin sosyal maliyetleri

Maliyet Kategorisi	Sosyal Maliyetler
Trafik sıkışıklığı ve kısıtlı maliyetleri	Mevcut altyapı kapasitesinde oluşan yüksek trafik yoğunluğunun trafik kullanıcıları ve toplum üzerindeki tüm maliyetler (gecikme, güvenilir olmayan seyahat süresi, ek operasyonel maliyetler)
Trafik kazası maliyetleri	Kazaların tüm direkt ve dolaylı maliyetleri (malzeme maliyeti, medikal maliyetler, üretim kayıpları, hayati kayıplar ve acılar)
Çevresel Maliyetler	Çevresel hasarlara ait tüm zararlar (ör. Sağlık maliyetleri, malzeme zararları, biyosfer hasarları, uzun vadeli riskler)

Kaynak: CE Delft, 2019

3. İNTERMODAL TAŞIMACILIK

İntermodal taşıma, yükün tek bir yükleme birimi ya da aracı ile, mod değişimi esnasında elleçlenmeden art arda iki ya da daha çok taşıma modu kullanarak taşınmasıdır (United Nations, 2001). İntermodal taşımacılık, birçok kaynak tarafından tek modlu karayolu taşımacılığına kıyasla çok daha çevreye duyarlı bir taşıma yöntemi olarak gösterilmekte olup, karayolu taşımacılığına karşı oldukça önemli bir alternatiftir (European Commission, 2010).

Ticari araçların sınıflandırılmasına ilişkin literatürde belirgin bir terminoloji farkı bulunmaktadır. Avrupa Komisyonu, yük taşıma amaçlı kullanılan ve brüt ağırlığı 3.5 tonu geçmeyen araçları hafif hizmet aracı (light duty vehicle; LDV) ya da Van tipi araç olarak isimlendirir (EU, 2007). ABD ise 3.8 ton (8.5 lbs) altında kalan araçları hafif hizmet kamyonu (light duty truck; LDT) olarak sınıflandırmaktadır (EPA, 2002). Taşıdığı yük ile toplam ağırlığı 3.5 ton üzerindeki ticari araçlar ise çeşitli kaynaklarda ağır yük aracı (heavy goods vehicle; HGV), ağır hizmet aracı (heavy duty vehicle; HDV), ağır ticari taşıt (heavy commercial vehicle; HCV) ya da ve geniş ticari araç (large goods vehicle; LGV) olarak geçmektedir

(EC, 2007). Bu çalışmada, karışıklığa yer vermemek adına hafif ticari araçlar LDV, ağır ticari araçlar ise HGV olarak anılacaktır. Şehir lojistiğinde en çok kullanılan araç sınıfı olan LDV, demiryolu taşımacılığına kıyasla yaklaşık 18 kat daha fazla dışsal maliyet oluşturmaktadır (Allen vd., 2016). OECD (2015) raporuna göre 2050 yılında karayolu taşıma modunun demiryolu taşıma moduna kıyasla 20 kattan fazla CO² salınımına sebep olması beklenmektedir.

Smokers vd. (2014) CO² salınımı azaltmak adına yapılacak yeşil lojistik stratejilerinden biri olarak intermodal taşımacılığı önermiştir. Lojistik verimliliği arttırmanın CO² salınımını %10'a kadar azaltma potansiyeli olduğuna değinen araştırma, sürdürülebilir ve maliyeti düşürme hedeflerinin aynı anda gerçekleşmediği stratejiler için lojistik operatörlerin gönüllü olarak girişimde bulunmayacağını tartışmıştır. Notteboom vd. (2020) araştırmasında yaptığı anket araştırmasına göre taşıma modu değişimi/intermodal taşıma, firmalar tarafından %15 ile dördüncü en çok bahsedilen yeşil lojistik seçeneği olmuştur. Mostert vd. (2017) yaptığı çalışmada yalnızca karayolu ile karayolu/demiryolu ve karayolu/iç su yolu intermodal taşımacılık seçeneklerini karşılaştırmış, sonuçta dışsal maliyetlerin intermodal taşımacılıkta çok daha düşük olduğu sonucuna varmıştır.

İncelenen çalışmalar ve raporlar göz önüne alındığında intermodal taşımacılığın tercih edilmesine yönelik bulguları 3 maddede özetlemek mümkündür;

1. Artan popülasyon ve büyüyen ekonomilerin bir çıktısı olarak lojistik ve taşımacılık sektörü büyümektedir. Buna bağlı olarak şehirlerdeki karayolu ağı yetersiz kaldığından trafik sıkışıklığı maliyetleri artmakta, tek modlu karayolu taşımacılığına alternatif geliştirmek gerekmektedir (Matsuoka vd., 2011).
2. Artan sera gazı salınımına bağlı olarak küresel ısınma, global hava kirliliği ve gürültü kirliliği gibi çevresel faktörleri azaltmak için daha yeşil taşıma modlarına ağırlık verilmesi gerekmektedir (Move, 2014).
3. Dışsal maliyetler konusunda politik müdahaleler arttıkça lojistik operatörleri tarafından dışsal maliyetlerin içselleştirilmesi gerekeceği için firmaların daha az dışsal maliyete sahip taşıma modu seçeneklerine yönelmesi beklenmektedir (CE Delft, 2008).

4. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ

Bu çalışmanın amacı, kargo ve kurye operatörlerinin diğer tüm aktiviteleri aynı kalmak kaydıyla, kullandığı taşıma modunu değiştirmesi durumunda içsel ve dışsal maliyet değişimlerini hesaplamaktır.

Janić (2007)'in geliştirmiş olduğu istatistiksel tam maliyet modeli, 2. bölümde değinilmiş olan içsel ve dışsal taşıma maliyetlerini kapsamaktadır. Çok değişkenli fonksiyonlar toplamından oluşan bu sistem, taşıma maliyetlerine ait ilgili parametrelerin bilinmesi halinde sistemin tam maliyetini hesaplamaya olanak tanır. Sonraki bölümde bu model detayları ile incelenecek, ardından Allen vd. (2018)'in Londra'nın merkezindeki kargo ve kurye operatörleri ile gerçekleştirdiği araştırmanın sonuçları kullanılarak, Janić (2007)'in çok değişkenli modeli matematiksel yöntemle çözülecektir.

4.1. Tam Maliyet Modeli

Janić (2007), oluşturmuş olduğu tam maliyet modelinde tek modlu karayolu taşıma sistemi ile intermodal karayolu-demiryolu taşıma sisteminin içsel (operasyonel) ve dışsal (çevresel) maliyetlerinin toplamını karşılaştırmıştır. Bu çalışmada intermodal uzun taşıma için 26 vagonluk tren ve tek modlu karayolu uzun taşıma için 20'lik 2 konteyner kapasitesine sahip kamyon önerilmiştir. Önerilen tam maliyet modeli uygulamasına ait senaryoya göre toplama bölgesi K ile 1. İntermodal terminal arasında ve dağıtma bölgesi L ile 2. İntermodal terminal arasında kamyon, 1. ve 2. İntermodal terminal arasında demiryolu, kısa mesafe K ve L bölgesinde kullanılan aracın içsel (operasyonel) ve dışsal (çevresel) maliyet fonksiyonları, karayolu uzun taşıma (K-L arasında) için kullanılan kamyon ile aynı kabul edilmiştir. İçsel (operasyonel) maliyet, yolun fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Dışsal maliyet fonksiyonu ise Avrupa Komisyonu (2002) raporundaki değerlerden türetilmiş ve yine yolun fonksiyonu olarak verilmiştir. Modele ait fonksiyonlar aşağıda sırasıyla verilmiştir.

İntermodal taşıma sistemine ait maliyet fonksiyonları (Janić 2007):

Toplama/dağıtma (kısa mesafe) kısmı:

- İçsel (Operasyonel) Maliyetler;

$$C_{1(toplama)} = (Q_k/\lambda_k \times M_k)c_{ik}(d_k) \quad \forall k \in N \quad (1)$$

- Zaman Maliyeti;

$$C_{2(toplama)} = Q_k \times \alpha_{bk} \times t_k \quad \forall k \in N \quad (2)$$

- Elleçleme maliyeti;

$$C_{3(toplama)} = Q_k \times t_{hk} \times c_{hk} \quad \forall k \in N \quad (3)$$

- Dışsal (Çevresel) Maliyetler;

$$C_{4(toplama)} = (Q_k/\lambda_k \times M_k)c_{ek}(d_k) \quad \forall k \in N \quad (4)$$

- Toplama/dağıtma toplam maliyeti;

$$C_{toplama} = \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^K C_{i/k} \quad \forall k \in N \quad (5)$$

Demiryolu (uzun mesafe) kısmı;

- Zaman ve elleçleme maliyeti dahil içsel (operasyonel) maliyetler:

$$c_1(W, d, q) = (4,60 \times n_l + 0,144 \times n_w + 0,3) \times d + 12,98 \times (n_l + n_w) + 5,6 \times q + 0,0019 \times W \times d + \quad \forall k \in N \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^k (0,227 \times \frac{10^{-6}v^2}{\ln d_l} + 0,000774) \times W \times d + 33 \times n_d(t_{dp} + d/v + D)$$

- Dışsal (Çevresel) Maliyetler;

$$C_{4(tren)} = Q \times (c_{e1} + c_{e2}) + \frac{\sqrt{2}}{2} \times c_d(w, s) \times \left[\frac{QT \times [(\alpha_{b1} + \alpha_{b2})]}{c_i(w, s) + c_d(w, s)} \right]^{0,5} \quad (7)$$

- Demiryolu toplam maliyeti;

$$C_T = c_i(W, d, q) + C_{4(tren)} \quad \forall W, d, w, s \in \mathbb{N} \quad (8)$$

L (dağıtma) bölgesindeki maliyetler K bölgesindeki paraleldir ve fonksiyonlara uygun parametreler uygulanarak hesaplanabilir. İntermodal taşıma sistemine ait tam maliyet, demiryolu kısmına ait maliyet ile toplama ve dağıtma kısmına ait maliyetlerin toplamıdır.

$$C_{inter\ modal\ (tam)} = C_{toplama} + C_{dağıtma} + C_T \quad (9)$$

Tek modlu karayolu taşıma sistemine ait toplama/dağıtma kısmı maliyetleri intermodal sistemdeki ile aynıdır. Karayolu uzun mesafe taşımaya ait maliyet fonksiyonları şu şekilde ifade edilmiştir;

- İçsel (operasyonel) maliyetler:

$$C_{1/kl} = (Q_{kl}/\lambda_{kl} \times M_{kl})c_{i/kl}(d_{kl}) \quad \forall k, l \in \mathbb{N} \quad (10)$$

- Zaman maliyeti;

$$C_{2/kl} = Q_{kl} \times \alpha_{b/kl} \times \left(\frac{d_{kl}}{v_{kl}} + D_{kl} + 2t_{s/kl} \right) \quad \forall k, l \in \mathbb{N} \quad (11)$$

- Elleçleme maliyeti;

$$C_{3/kl} = Q_{kl} \times t_{h/kl} \times c_{h/kl} \quad \forall k, l \in \mathbb{N} \quad (12)$$

- Dışsal (Çevresel) Maliyetler;

$$C_{4/kl} = (Q_{kl}/\lambda_{kl} \times M_{kl})c_{e/kl}(d_{kl}) \quad \forall k, l \in \mathbb{N} \quad (13)$$

- Tek modlu Karayolu taşıma sistemi toplam maliyeti;

$$C_{karayolu(tam)} = \sum_{i=1}^4 \sum_{k,l=1}^{K,L} C_{i/kl} \quad \forall k, l \in \mathbb{N} \quad (14)$$

Fonksiyonlara ait parametreler ve değerleri aşağıdaki tablo verilmiştir:

Tablo 2. İçsel ve Dışsal maliyet fonksiyonlarının parametre ve referans değerleri

Sabit Parametre	Tanım	Değer	Birim	Kaynak
λ_T	Tren Yükleme Faktörü	0,75		Janić (2008)
w_w	Her vagonun boş ağırlığı	24	ton	Janić (2008)
n_l	Lokomotif sayısı	1	adet	Janić (2008)
w_l	Lokomotif ağırlığı	100	ton	Janić (2008)
α_d	Birim yük değeri	0,32	€/saat.ton	Janić (2007)
v_{LT}	Karayolu Uzun mesafe araç ortalama hızı	60	km/s	Janić (2007)
D_{LT}	Karayolu gecikme süresi	0	km/s	Janić (2007)
t_{LT}	Karayolu araç yükleme bekleme süresi	0	saat	Janić (2007)
D	Trenin ortalama gecikme süresi (h)	0,5	saat	Janić (2007)
v_T	Trenin ortalama hızı	40	km/s	Janić (2007)
t_{dp}	Makinistin hazırlık süresi	0	saat	Janić (2008)
n_d	Makinist sayısı	1	adet	Janić (2008)
λ_{LDV}	Karayolu kısa mesafe yükleme faktörü (LDV)	0,6		Janić (2007)
λ_{LT}	Karayolu uzun mesafe yükleme faktörü (LT)	0,85		Janić (2007)

Kaynak: Janić, (2007); Janić,(2008)

Janić (2007) tarafından oluşturulmuş olan model, 837 ton yükün yukarıda belirtilmiş olan intermodal demiryolu-karayolu ve tek modlu karayolu sistemi ile taşınması durumunda tam maliyetin başa baş noktasını hesaplamayı amaçlamıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre belirtilen miktardaki yükün taşınmasında 1050 km'de, 4 €/cent/t-km birim maliyette 2 sistem başa baş noktasına erişmekte, bundan sonra tam maliyet intermodal taşıma sisteminde daha uygun olmaktadır.

Bu çalışmada, Janić (2007) tarafından geliştirilmiş olan tam maliyet modeli, Allen vd. (2018), Aljohani ve Thompson (2020) ve Avrupa Komisyonu'nun (CE Delft, 2019) raporu ışığında senaryo oluşturularak analiz edilmiştir.

4.2. Dışsal Maliyet Fonksiyonunun Belirlenmesi

Janić (2007)'in çalışmasında karayoluna ait dışsal maliyet fonksiyonu, alınan yol d'ye bağlı olarak belirlenmiştir. Bu fonksiyon, Janić (2007)'in kendi ifadeleri ile Avrupa Komisyonu (2001 a,b) kaynaklarına göre hesaplanmıştır (Janić, 2007:40) ve karayolu taşımada için önerilen 20'lik 2 konteyner kapasitesine sahip kamyon için hesaplanmış olduğundan sonraki bölümde anlatılacak olan senaryoya uygun değildir. Bu fonksiyonunun hesaplamalarda kullanılmamasının bir diğer sebebi, araştırmacının işaret ettiği 2001 yılına ait kaynağın artık güncel olmaması dolayısıyla senaryo sonuçlarını günümüz maliyetlerine uygun hesaplayamayacak olmasıdır.

Janić (2007)'in demiryolu için önermiş olduğu dışsal maliyet fonksiyonu ise olup trenin toplam ağırlığı w ile aldığı yol s'ye bağlıdır. Bu maliyet 26 vagonlu blok tren için hesaplanmış olup şehir içi lojistiği sağlayan kargo ve kurye operatörleri için söz edilen günlük yükün çok üzerinde bir kapasite sağlamaktadır.

Dışsal maliyet fonksiyonlarını belirlemek için referans olarak Avrupa Komisyonu'nun (CE Delft, 2019) raporu alınmıştır. Bu rapor, taşımacılığa ait dışsal maliyetleri 7 başlık altında sınıflandırılmıştır; Trafik kazaları, Hava kirliliği, İklim, Gürültü, Trafik sıkışıklığı, Yakıtların üretimden tüketimine kadar olan sera gazı salınımı (well-to-tank) ve Doğaya verilen zarar.

Bu raporda dışsal (çevresel) maliyetlerden hava kirliliği, trafik kazaları, gürültü hasar maliyeti yaklaşımı ile, iklim değişikliğini hesaplamak için kullanılan CO² fiyatları kaçınma maliyeti yaklaşımı, doğaya verilen zararlara ait dışsal maliyetler ise yerine koyma yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir.

Maliyet fonksiyonlarını saptamak için seçilen CE Delft, (2019) raporu, tüm AB-28 ülkeleri ve her taşıma modu için ayrı ayrı incelenmiş olsa da bu çalışmanın kapsamına demiryolu ile karayolu için LDV ve HGV tipi araçlar girdiğinden, yalnızca bunlara ait maliyetler göz önünde bulundurulmuştur. Maliyetler tabloda verilmiştir.

Tablo 3. Karayoluna ait LDV ve HGV ile Trenin toplam dışsal maliyetleri

Yük Taşımacılığa ait ortalama dışsal Maliyetler			
2016 – AB-28			
Maliyet Kategorisi	LDV	HGV	Tren
	€-cent/araç-km	€-cent/ton-km	€-cent/ton-km
Trafik Kazası	4,14	1,25	0,07
Hava Kirliliği	3,37	0,76	0,16
İklim	2,77	0,53	0,06
Gürültü	1,14	0,50	0,60
Trafik sıkışıklığı	11,61	0,80	-
Well-To-Tank	0,79	0,20	0,15
Doğaya verilen zarar	0,93	0,19	0,24
Total	24,75	4,23	1,28

Kaynak: CE Delft, (2019)

Tablo 3'ten görülebileceği gibi demiryolu için trafik sıklığı olmadığı varsayılmıştır (CE Delft, 2019:33-160).

Senaryoya ait hesaplamalarda kullanılacak dışsal maliyet fonksiyonları, bu tablodaki değerler esas alınarak şu şekilde belirlenmiştir;

Demiryolu Dışsal Maliyet Fonksiyonu:

$$c_{e(tren)}(d) = (1,28 \text{ € cent/t. km}) \times w \times d_{uzun} \quad (15)$$

HGV Tipi Araç Dışsal Maliyet Fonksiyonu:

$$c_{e(HGV)}(d) = (4,23 \text{ € cent/t. km}) \times Q / (\lambda_{HGV} \times M_{HGV}) \times d_{uzun} \quad (16)$$

LDV Tipi Araç Dışsal Maliyet Fonksiyonu

$$c_{e(LCV)}(d) = (24,75 \text{ € cent/araç. km}) \times q_{TDM} / (\lambda_{LCV} \times M_{LCV}) \times d_{kısa} \quad (17)$$

Dışsal maliyet fonksiyonlarına ait parametreler şu şekilde sıralanabilir; w , trenin toplam ağırlığı; d , gidilen uzun yol mesafe; Q , toplam taşınan yük ağırlığı; λ_{HGV} , HGV tipi aracın yükleme faktörü; M_{HGV} , HGV tipi aracın yararlı yük kapasitesi; q_{TDM} , her TDM'ne dağıtılan günlük ortalama yük ağırlığı; λ_{LCV} , LDV tipi aracın yükleme faktörü; M_{LCV} , LDV tipi aracın yararlı yük kapasitesi ve $d_{kısa}$, TDM'lere ait LDV'lerin her çıktıkları seferde gittikleri ortalama mesafe.

4.3. İçsel Maliyet Fonksiyonunun Belirlenmesi

Trene ait içsel (operasyonel) maliyet fonksiyonu için 6. Fonksiyon kullanılacaktır. Bu fonksiyona ait daha detaylı bilgi için Janić (2008) incelenebilir (Janić, 2008:1335).

Karayolu yük taşımada kullanılacak LDV ve HGV tipi araçların içsel (operasyonel) maliyet fonksiyonları için AK (2006) raporuna başvurulmuştur. Bu raporda içsel maliyetler hesaplanırken şu maliyet bileşenleri göz önünde bulundurulmuştur: Yıpranma ve eskime maliyeti, Araç sermaye maliyeti, eleman maliyeti, yakıt maliyeti, sigorta maliyeti, Vergiler ve Diğer giderler. Spesifik maliyetler olarak adlandırılan bu maliyetler toplamı, LDV ve HGV tipi araçlar için ülkelere göre Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. LDV ve HGV tipi araçlar için araç başına toplam içsel maliyetler

	LDV Spesifik Maliyetler (€/araç-km)	HGV Spesifik Maliyetler (€/araç-km)
Belçika	1,11	1,34
Çek Cumhuriyeti	0,40	0,52
Danimarka	1,17	1,39
Almanya	0,89	1,10
Estonya	0,29	0,39
Yunanistan	0,50	0,62
İspanya	0,68	0,84
Fransa	1,04	1,26
İrlanda	0,75	0,92
İtalya	0,75	0,94
Güney Kıbrıs	0,62	0,77
Litvanya	0,21	0,30
Letonya	0,24	0,34
Lüksemburg	1,24	1,40
Macaristan	0,36	0,50
Malta	0,56	0,70
Hollanda	1,14	1,35
Avusturya	1,15	1,39
Polonya	0,32	0,43
Portekiz	0,58	0,75
Slovenya	0,50	0,63
Slovakya	0,30	0,43
Finlandiya	1,23	1,36
İsveç	1,25	1,43
Birleşik Krallık	0,94	1,18
ABD	0,87	1,00
İsviçre	1,07	1,61
AB 25	0,85	1,03
Batı AB	0,89	1,11
Doğu AB	0,34	0,46

Kaynak: AK, (2006:19)

Tablonun en altında gözüken Batı AB, AB-15 ülkelerini ve Doğu AB, Çek Cumhuriyeti, Macaristan, Polonya, Slovenya ve Slovakya'yı kapsamaktadır. Türkiye'de kişi başına düşen gayri safi milli hasıla (GSMH)'ya bakıldığında, Doğu Avrupa ülkelerinin kişi başı GSMH'sine daha yakın olduğu görülmektedir (Worldbank, 2021). Bu sebeple LDV ve HGV tipi araçlara ait içsel (operasyonel) maliyetler şu şekilde belirlenmiştir;

LDV tipi araç içsel maliyet fonksiyonu

$$c_{i(LDV)} = (0,34 \text{ €/araç.km}) \times q / (\lambda_{LCV} \times M_{LCV}) \times d_{kisa} \quad (18)$$

HGV tipi araç içsel maliyet fonksiyonu:

$$c_{i(HGV)} = (0,46 \text{ €/araç.km}) \times q / (\lambda_{LCV} \times M_{LCV}) \times d_{kisa} \quad (19)$$

0,34 €/araç.km LDV içsel maliyet birim değeri, LDV'lerin maliyetlerini araştıran Prevedouros ve Mitropoulos (2016)'un çalışmasında, ortalama 10,6 yıl araç ömrü ile yıllık 18 bin km mesafe gittiği varsayılan LDV'lere ait 0,33 \$/araç.km bulgularıyla paralellik gösterdiği için güncellik kaygısı duyulabilecek AK (2006) raporunun referans alınmasında bir sakınca görülmemiştir.

4.4. Senaryo Oluşturulması ve Analiz

İncelenmiş olan tam maliyet modelini uygulamak için oluşturulan senaryoda Allen vd. (2018)'nin araştırması esas alınmıştır. Bunun öncelikli nedeni, Allen vd. (2018)'nin çok yoğun nüfusa sahip bir metropol olan Londra merkezinde e-ticaret'in son kilometre lojistiğine olan etkilerini araştırmış olmasıdır. Bu araştırmayı bizzat KK operatörleriyle yapmıştır ki bu tezin hedef kitesini oluşturmaktadır. Araştırma sonuçları, Janić (2007)'nin tam maliyet modelinde gereken parametreleri kapsamlı bir şekilde vermektedir.

Allen vd. (2018)'nin Londra'nın merkezindeki KK sektörüne ilişkin yaptığı çalışma, bu operasyonların karakteristiklerinin şehir altyapısı ile çatıştığına işaret etmektedir. Bu çalışmanın bulgularına göre tipik bir LDV, günde 37 farklı duraktaki 72 müşteriye 118 kargo teslimatı yapmaktadır. Aljohani ve Thompson (2020) Melbourne şehir merkezindeki KK taşıyıcıları ile yaptığı çalışmada, araçların tam dolu olduğunda teslim edilecek kargoların bulunmasının zorlaştığı, duraklardaki bekleme sürelerinin uzadığı görülmüş, araçların doluluk oranının %60'ın üzerinde olmasından kaçınılması önerilmiştir. Araştırmanın anket sonuçları, teslim edilen kargoların %65'inin LDV'ler ile gerçekleştiğini ve her aracın günlük ortalama 2-3 sefer düzenlediğini göstermektedir. KK hizmeti veren bir şirketin her toplama/dağıtım merkezi (TDM) dairesel bir alana hizmet vermektedir ve TDM'lerin alanı birbirine teğettir. Tüm kargolar ilgili dağıtım merkezinden Bölge Merkezi (BM)'ne sevk edilmekte, ardından ilgili TDM'lere dağıtılmaktadır. BM ile 1. TDM arasında ve ardışık her TDM arasında 3,39*2=6,78 km mesafe vardır. Bütün TDM'lerin intermodal terminali olup ulaşım için ek bir mesafe kat edilmemektedir. TDM'lerin toplama/dağıtımını gerçekleştiren araçlarının başlangıç noktası TDM ile 1. Müşteri arasındaki mesafenin ve son müşteri ile TDM arasındaki mesafenin eşit olduğu varsayılmıştır. s parametresi ile ifade edilen TDM sayısı, aynı zamanda fonksiyonlardaki segmentleri belirtmekte olup Janić (2007)'in fonksiyonlarındaki k indisine karşılık gelmektedir ve modelin bağımsız değişkeni olarak kabul edilmiştir. TDM sayısındaki değişime göre intermodal karayolu-demiryolu taşıma sistemi ve tek modlu karayolu taşıma sisteminin

tam maliyetleri, Microsoft Excel (Microsoft 365 için MSO versiyon 16.0.13530.20132) aracılığıyla hesaplanmıştır.

Her TDM'nin sahip olduğu LDV sayısı 3 olarak belirlenmiş olsa da her zaman BM'nden TDM'lere kargoların dağıtımını yapacak yeterli araç olduğu varsayılmıştır. TDM'ler toplama/dağıtım için içten yanmalı motora sahip dizel LDV tipi Ford Transit, BM ise yine TDM'lere sevkiyat için içten yanmalı motora sahip dizel HGV tipi Iveco Eurocargo kullanmaktadır (Quak vd., 2017). Araçların özellikleri Tablo 5'te belirtilmiştir.

Tablo 5. TNT araçlarının özelliklerine genel bakış

Araç Parametre/Model	Ford Transit	Iveco Eurocargo
Yararlı yük (kg)	900	3990
Araç Tipi	Hafif Ticari Araç	Büyük Ticari Araç
Brüt Araç Ağırlığı	1500	7500
Azami yükleme kapasitesi (m3)	9	14

Kaynak: Quak vd., (2017)

Bu araçların seçilmesinin sebepleri incelenmiş olan literatüre göre en çok tercih edilen araç tipi olmaları, amaçlarına uygun ebatları ve oluşturdukları maliyet avantajı olarak sıralanabilir (Quak vd., 2017; Aljohani ve Thompson, 2020).

Bu kabuller ışığında oluşturulan senaryoya ait parametreler ve değerler aşağıda yer almaktadır;

Tablo 6. Senaryoya ait parametreler

Parametre	Parametre Tanımı	Değer	Birim	Kaynak
	Her TDM'ye ait Araç Sayısı (LDV)	3	adet	Allen vd. (2018)
	LDV'lerin günlük ortalama sefer sayısı	2	adet	Aljohani ve Thompson, (2020)
	Her aracın seferlik ortalama durak sayısı	37	adet	Allen vd. (2018)
	Her aracın seferlik ortalama müşteri sayısı	72	adet	Allen vd. (2018)
	Her aracın seferlik ortalama kargo sayısı	118	adet	Allen vd. (2018)
V_{LDV}	Teslimat bölgesinde ortalama hız	7	km/s	Allen vd. (2018)
	Teslimat bölgesinde ortalama gidilen mesafesi	12	km	Allen vd. (2018)
	Her durakta geçirilen ortalama süre	4,1	dakika	Allen vd. (2018)
M_{LDV}	Araç kapasitesi ağırlık (LDV)	0,9	ton	Quak vd., (2017)
M_{HGV}	Araç kapasitesi ağırlık (HGV)	3,99	ton	Quak vd., (2017)
$c_{e(LDV)}(d)$	Birim LDV Dışsal Maliyeti	0,2475	€/araç.km	EC (2018)
$c_{e(HGV)}(d)$	Birim HGV Dışsal Maliyeti	0,0423	€/ton.km	EC (2018)
$c_{i(LDV)}(d)$	Birim LDV İçsel Maliyeti	0,34	€/araç.km	EC (2006)
$c_{i(HGV)}(d)$	Birim LDV İçsel Maliyeti	0,46	€/araç.km	EC (2006)
$c_{e/tren}(d)$	Tren Dışsal Maliyeti	1,28	€-cent/tkm	EC (2018)

Kaynak: Allen vd., (2018)

5. BULGULAR

Allen vd. (2018)'nin bulgularına paralel olarak TDM'lerdeki araçlar, her tur 12 km yol almaktadır. TDM'ler dairesel bir alandan sorumlu olduğundan sahip oldukları 3 araç, $3 \cdot 12 = 36 \text{ km}^2$ lik bir alanı taramaktadır. Alanı km^2 olan dairenin yarıçapı , buna bağlı olarak BM ve 1. TDM ile diğer tüm ardışık TDM'ler arası mesafe olacaktır.

Her aracın sefer başına taşıdığı ortalama kargo kapasitesi 118 adettir. LDV yükleme faktörü $\lambda_{LDV}=0,6$; yararlı yükü $q_{LDV}=900 \text{ kg} = 0,9 \text{ ton}$ olduğundan, birim kargo ağırlığı $m_k=900 \text{ kg} * 0,6/118 \text{ kargo} = 4,57$ her TDM için taşınan yük $q_{TDM}=118 \text{ adet} * 4,57 \text{ kg} * 3 \text{ araç} = 3,24 \text{ ton kg}$, ton olarak hesaplanmıştır.

TDM'lerde kargolar, LDV'ler tarafından 4,1 dakika aralıklarla her seferde 37 farklı durağa dağıtılmaktadır. Buna göre LDV'lerin tur süresi $t_{LCV} = \frac{12}{7} + 37 \times \frac{4,1}{60} = 4,24 \text{ saat}$ olarak hesaplanmıştır. Bu ifadedeki 1. terim araç yolda giderken geçen süre, 2. Terim ise kargo teslim ederken geçen süreyi belirtmektedir.

Her 2 sistem için de TDM'lere ait araç sayıları, gidilen yol ve teslim edilen kargo sayıları aynıdır. Bu sebeple her TDM'nin günde oluşturduğu tam maliyet birbirine eşit ve 5. Fonksiyon uyarınca şu şekilde olacaktır;

$$c_{TDM} = (0,34 \text{ €/araç.km}) \times q_{TDM}/(\lambda_{LCV} \times M_{LCV}) \times d_{kisa} + q_{TDM} \times \alpha_d \times t_{LCV} + (0,2475 \text{ €/araç.km}) \times q_{TDM}/(\lambda_{LCV} \times M_{LCV}) \times d_{kisa}$$

$$= 0,34 \times \frac{3,24}{0,6 \times 0,9} \times 12 + 3,24 \times 0,32 \times 4,24 + 0,2475 \times \frac{3,24}{0,6 \times 0,9} \times 12 = 46,7 \text{ €}$$

Yukarıdaki fonksiyonda 1. Terim, içsel maliyetleri vermekte olup elleçleme maliyetlerini de içermektedir. 2. Terim, zaman maliyeti ve 3. Terim ise dışsal (çevresel) maliyetleri ifade etmektedir.

Her TDM, günde 3,24 ton yükü 2 seferde dağıtacağına sebep olacağı tam maliyet sefer başına 23,35€ ve günde 46,7€ 'dur.

Her konteynerin taşıdığı yük 12 ton ve her vagon 3 konteyner taşıdığına göre, Vagon sayısı $n_w = \frac{\text{Toplam taşınan yük } (Q)}{12 \times 3 \times \lambda_t}$ 'ye eşittir. Her vagonun boş ağırlığı 24 ton, lokomotif ağırlığı 100 ton, boş konteyner ağırlığı 2,3 ton olmak üzere boş tren ağırlığı $w = 100 + n_w \times 24$, toplam tren ağırlığı ise $W = w + (\text{konteyner sayısı}) \times 2,3 + \text{Taşınan yük } (Q)$ 'dir.

BM ile son TDM arasındaki mesafe aynı zamanda trenin aldığı yol olup $d = 6,78 \times s$ ile hesaplanmıştır.

Tek modlu karayolu dağıtımında her bir BM'nden her TDM'ye giden aracın aldığı mesafe değişmektedir. 1. TDM'ye giden HGV'ler 6,78 km, 2. TDM'ye giden HGV'ler 6,78*2 km ve s. TDM'ye giden HGV'ler 6,78*s km yol kat eder. Alınan yol, tüm bu yolların toplamıdır ve

$$d_{HGV} = 6,78 * \text{TDM'ye giden HGV sayısı} \times (s \times (s + 1/2)) \quad (20)$$

şeklinde hesaplanır. İfadenin son terimi olan $(s \times (s + 1/2))$, s'ye kadar olan ardışık sayıların toplamını verir.

20. fonksiyona göre her TDM'ye gitmesi beklenen HGV sayısı, her TDM'ye giden yükün senaryoda seçilmiş olan Iveco Eurocarg o araçlarına ait yük kapasitesine bölünmesiyle bulunabilir:

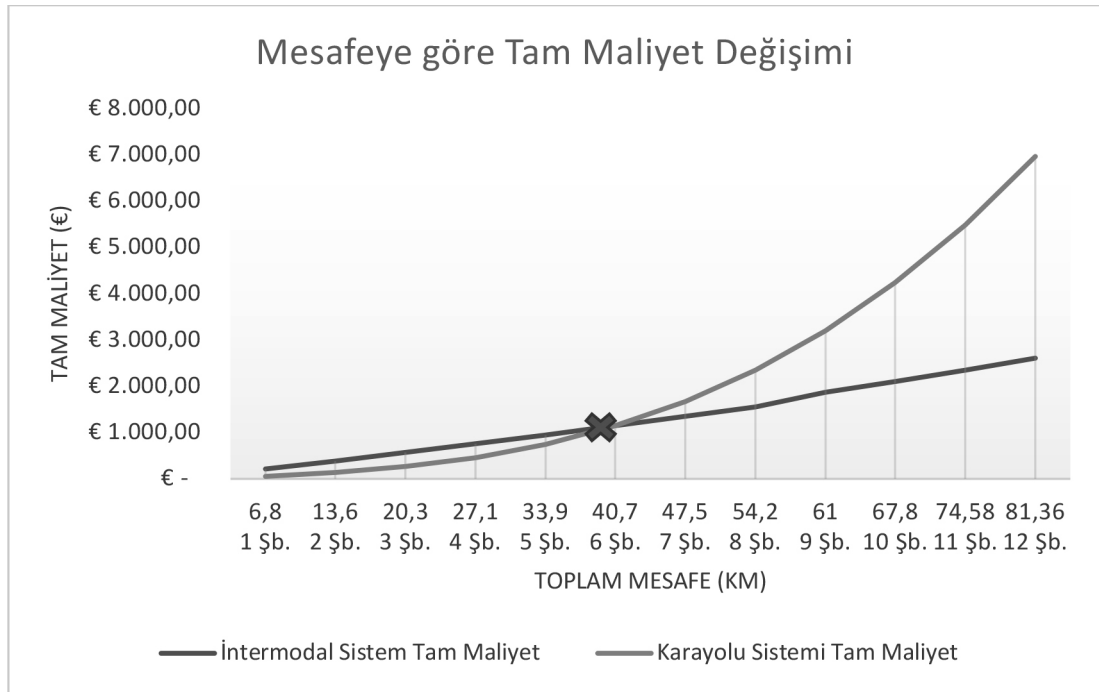
$$HGV \text{ Sayısı} = \frac{q_{TDM}}{\lambda_{LCV} \times M_{HGV}} = \frac{3,24}{0,85 \times 3,99} = 0,95 \cong 1$$

Bu sonuca göre her TDM'ye, %85'lik yükleme faktörü ile neredeyse tam dolu 1 adet HGV gideceği öngörülebilir.

BESTUFS (2007) raporunda da bahsedildiği gibi şehirlerde yük taşımacılığının %80'inden fazlası 80 km. 'den az mesafeler arasında gerçekleşmektedir. Buradan yola çıkarak model 12 TDM'ye ve 80 km mesafeye kadar olan sistemler için çözülmüştür. Buna göre intermodal ve tek modlu taşıma sistemleri için ilgili hesaplamalar yapıldığında tam maliyet değişimleri aşağıdaki gibi olmaktadır;

Tablo 7. Değişen TDM sayısı ve yola göre tam maliyetin değişimi

TDM Sayısı	Toplam Mesafe (km)	İntermodal Taşıma Tam Maliyet (€)	Tek modlu Taşıma Tam maliyet (€)
1	6,8	213,97	53,89
2	13,6	389,77	135,40
3	20,3	571,15	264,98
4	27,1	756,75	463,04
5	33,9	947,46	750,03
6	40,7	1.146,17	1.146,37
7	47,5	1.348,50	1.672,51
8	54,2	1.556,77	2.348,88
9	61,0	1.875,09	3.195,90
10	67,8	2.109,51	4.234,02
11	74,6	2.351,32	5.483,66
12	81,4	2.608,20	6.965,27



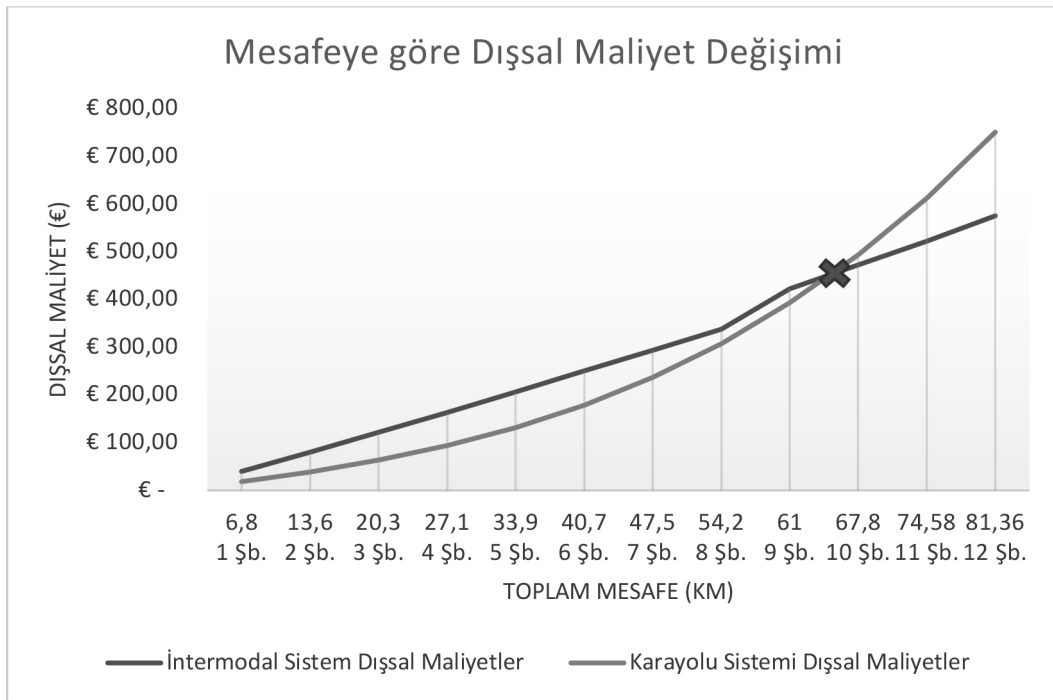
Şekil 1: İntermodal ve Tek modlu taşıma sistemine ait tam maliyetlerin başa baş noktası

Grafikten de anlaşıldığı gibi oluşturulan senaryo için tam maliyet başa baş noktası 40 km olmaktadır. Bu senaryo için 6 şubeden ya da 40 km'den fazla dağıtım alanına sahip KK operatörleri için tam maliyet, intermodal demiryolu/karayolu ile tek modlu karayolu taşımacılığa göre daha düşük kalmaktadır.

Belirtilen taşıma sistemlerine ait yukarıda hesaplanmış olan tam maliyetleri oluşturan içsel (operasyonel) ve dışsal (çevresel) maliyet sürücülerinden dışsal maliyetlerin mesafe ile nasıl değiştiğini daha yakından incelemek yerinde olacaktır.

Tablo 8. Değişen TDM sayısı ve yola göre dışsal maliyetlerin değişimi

TDM Sayısı	Toplam Mesafe (km)	İntermodal Sistem Dışsal Maliyetler (€)	Karayolu Sistemi Dışsal Maliyetler (€)
1	6,8	39,87	18,39
2	13,6	80,31	39,08
3	20,3	121,91	63,78
4	27,1	163,68	94,22
5	33,9	206,00	132,12
6	40,7	250,10	179,19
7	47,5	293,75	237,16
8	54,2	337,97	307,75
9	61,0	422,13	392,68
10	67,8	471,85	493,67
11	74,5	522,14	612,44
12	81,4	575,39	750,72



Şekil 2: İntermodal ve Tek modlu taşıma sistemine ait dışsal maliyetlerin başa baş noktası

60 km'ye kadar intermodal taşımanın dışsal maliyetleri karayoluna kıyasla daha yüksek seyretmektedir. Bunun temel nedeni, demiryolu taşımanın kısa mesafelerde dışsal maliyetlerinin daha yüksek olmasıdır. Tablo 5'teki veriler ışığında bu dışsal maliyetlerin %50'sinin gürültü ve %25'inin doğaya verilen zararlar olduğu söylenebilir. Artan mesafe ve yüke bağlı olarak demiryolunun sahip olduğu ölçek ekonomisi özelliği, bu maliyetlerin karayoluna kıyasla daha yavaş bir hızla yükselmesini sağlamaktadır. 60 km ve 9 şubeden sonra dışsal maliyetler, intermodal karayolu/demiryolu taşıma lehine olmaktadır.

6. SONUÇ

Bu çalışmanın motivasyonu, sürdürülebilirlik ve yeşil lojistik literatürü çerçevesinde, lojistikte dışsal (çevresel) maliyetlerin azaltılması; amacı ise yalnızca karayolu taşıma sistemi kullanan kargo ve kurye operatörlerinin intermodal taşıma sistemi kullanmaları halinde, temelde dışsal maliyetleri olmak üzere tam maliyetlerinin değişimini analiz etmektir. Bu değişimi sayısal olarak gözlemleyebilmek için Janić (2007)'in oluşturmuş olduğu istatistiksel Tam maliyet modeli, literatür yardımıyla kargo ve kurye operatörlerine uyarlanmıştır.

Janić (2007)'in tam maliyet modeli, taşıma maliyet sürücülerine ait içsel ve dışsal maliyetlerin genel fonksiyonlarını içerdiği için her sisteme uygulanabilir niteliktedir. Bu tez için Allen vd. (2018) 'nin çalışması esas alınarak oluşturulmuş olan senaryo; kargo ve kurye operatörlerinin taşıma operasyonlarına ait basitleştirilmiş bir sistem olup model farklı bölgeler, araçlar ve maliyet fonksiyonları için değiştirilerek istenen amaca uygun hale getirilebilir.

Oluşturulmuş olan senaryo, oldukça karmaşık bir yapısı olan kargo ve kurye hizmeti sağlayıcılarının operasyonel adımlarının, gerçeğe olabildiğince yakın hesaplayabilmek hedefiyle, genel bir çerçevesini çizmiştir. Bu senaryoya göre yaklaşık 6,8 km aralıklarla 3,4 km yarıçaplı dairesel alanlara hizmet veren Toplama/Dağıtım Merkezlere sahip bir kargo ve kurye operatörü, her şubesi için günlük 46,7 € tam maliyete katlanmak zorundadır. Bu tam maliyetin yaklaşık %40'ını dışsal maliyetler oluşturmaktadır. Kargo ve kurye hizmetleri, kapıdan kapıya son kilometre lojistiği sağlamaktadırlar ve karayoluna bel bağlamak durumundadırlar. Senaryoya ait hesaplara göre ortaya çıkan şubelere ait %40'lık dışsal maliyet, uzun yol için kullanılan taşıma modundan bağımsız olarak ortaya çıkmaktadır ve alınan yol, kullanılan aracın yararlı yükü, yükleme faktörü ve birim dışsal maliyetine bağlıdır. Alınan yolun azaltılması işin doğasına aykırı olduğundan dışsal maliyeti azaltmak için kullanılacak bir parametre değildir. Yükleme faktörü, Allen vd., (2018)'in çalışmasında bahsettiği gibi 0,6 üzerinde olduğunda ilave masraflar ortaya çıkmaktadır (zaman, otopark). Dolayısı ile dışsal maliyet, ancak kullanılan aracın yararlı yükü arttırılarak ya da birim dışsal maliyet azaltılarak düşürülebilir.

Tam maliyet modeline göre çözülmüş olan senaryo sonuçları, 40 km'den sonra tam maliyetlerin ve 65 km'den sonra dışsal maliyetlerin intermodal karayolu/demiryolu taşımacılık lehine olduğunu göstermektedir. Kargo ve kurye operatörleri gibi kısa mesafelerde yüksek miktarda yük taşıyan şirketler, taşımacılık maliyetlerini düşürmek amacıyla intermodal demiryolu/karayolunu göz önünde bulundurabilirler. Bu sonucun temel sebepleri demiryolunun düşük dışsal maliyetleri ve ölçek ekonomisine sahip olma özelliğidir.

Oluşturulmuş olan senaryo sonuçları ile literatür kıyaslandığında, dışsal maliyetlerin Mostert vd. (2017)'nin çalışmasına paralel şekilde intermodal taşımacılık için kısa mesafelerde dahi daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu çalışmanın odak noktası olmamakla birlikte operasyonel maliyetler de Mostert vd. (2017)'nin sonuçlarının tersine kısa mesafelerde daha düşük olmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları aynı zamanda Hamburg Limanı hinterlandında yaptığı çalışmayla intermodal taşımanın yalnızca karayolu taşımaya oranla daha ucuz olduğu tartışan Brümmerstedt vd. (2015)'nin çalışmasıyla ve belli bir başa baş noktasının üstünde maliyetlerin intermodal taşıma lehine döndüğünü hesaplayan Janić (2007)'in çalışması ile paraleldir.

Oluşturulmuş olan senaryoyu çözümlmek için tam maliyet modeli kullanılmıştır. Temel referans seçilmiş olan Janić (2007)'in belirttiği modeldeki parametrelerin bazıları güncel veriler ışığında düzenlenmiş olsa da bir kısmı aynı kabul edilmiştir; bu varsayım, bu çalışmanın en önemli kısıtlamasıdır. Ayrıca kargo/kurye operatörlerine ait doğrusal olmayan rotalar ile tekrarlanan durak ziyaretleri, toplama/dağıtma merkezlerinin düzgün olmayan güzergahlarda olması, toplama/dağıtma merkezlerine ait intermodal terminal bulunmaması ve kargo/kurye operatörlerine ait araç filolarının içten yanmalı dizel motorlara sahip olması yine bu çalışmanın kısıtlamaları olarak sıralanabilir.

Gelecek araştırmalarda bu parametrelerin güncellenmesi, yalnızca kargo/kurye operatörlerinin değil, taşımacılık hizmeti veren tüm şirketlerin dışsal ve tam maliyetlerinin hesaplanması önerilebilir. Verilerdeki ve parametrelerdeki bu güncellemeler ve dışsal maliyetlerin ölçülmesine yönelik yeni araştırmalar, yeşil lojistik ve sürdürülebilirlik literatürü için değişimlerin takibi açısından önemli olduğu gibi yaşanabilir ve sürdürülebilir bir dünya için zaruridir. Çalışmanın yöntemi ve bulguları, sürdürülebilirlik raporlamasında dışsal maliyetlerin ölçümü ve denetimine ışık tutabilir.

KAYNAKÇA

- Aljohani, K., & Thompson, R. G. (2020) An Examination of Last Mile Delivery Practices of Freight Carriers Servicing Business Receivers in Inner-City Areas. *Sustainability*, 12(7, 2837). doi:10.3390/su12072837
- Allen, J., Piecyk, M., Piotrowska, M. (2016) An analysis of the parcels market and parcel carriers' operations in the UK. London, University of Westminster FTC2050. http://www.ftc2050.com/reports/westminster_parcel_final_Dec_2016.pdf
- Beuthe, M, Degrandart, F, Geerts, J-F and Jourquin, B (2002) External costs of the Belgian interurban freight traffic: A network analysis of their internalization. *Transportation Research: Part D*, 7, pp 285–301
- Brümmerstedt, Katrin; Flitsch, Verena; Jahn, Carlos (2015) Cost Functions in Freight Transport Models, In: Blecker, Thorsten Kersten, Wolfgang Ringle, Christian M. (Ed.: *Operational Excellence in Logistics and Supply Chains: Optimization Methods, Data-driven Approaches and Security Insights*
- CE Delft, Directorate-General for Mobility and Transport;. (2019) *Handbook on External Costs of Transport*. European Commission.
- Delft, CE, 2008, 4.288.1/ *Handbook on estimation of external costs in the transport sector - IMPACT D1 Version 1.1*
- DFT (2013) *Road Transport Forecast 2013*, Department for Transport, London
- Digiesi, S., Mascolo, G., Mossa, G., & Mummolo, G. (2016). *New models for sustainable logistics: internalization of external costs in inventory management*. Cham: Springer.
- Engblom, J., Solakivi, T., Töyli, J., & Ojala, L. (2012). Multiple-method analysis of logistics costs. *International Journal of Production Economics*, 137(1), 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.007>
- EPA, United States Environmental Protection Agency (2002) *User's Guide to MOBILE6.1 and MOBILE6.2: Mobile Source Emission Factor Model* <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1001DSD.PDF?Dockkey=P1001DSD>. PDF (26 Ocak 2021 Tarihinde erişildi).
- European Commission RECORDIT (2001a) *Real Cost Reduction of Door-to-door Intermodal Transport*, European Commissions, Directorate General DG VII, RTD 5th Framework Programme, Brussels, Belgium.
- European Commission IMPREND (2001b) *Improvement of Pre- and End- Haulage* , European Commissions, Directorate General DG VII, RTD 4th Framework Programme, Brussels.
- European Commission EC, (2007) *Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council of 5 September 2007 establishing a framework for the approval of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles*. *Official Journal of the European Union*, L263(9.10.2007), pp. 1-160.
- European Commission EC, (2006) Black, I.; Seaton, R.; Ricci, A.; Enei, R.; Vaghi, C.; Schmid, S.; Bühler, G. (2003) *RECORDIT, Final Report: Actions to Promote Intermodal transport*. https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20060727_155159_96220_RECORDIT_Final_Report.pdf (28 Kasım 2020'de kontrol edildi).
- European Commission EC, (2010) *White Paper on transport — Roadmap to a single European transport area — Towards a competitive and resource-efficient transport System*, Luxembourg: Publications Office of the European Union, doi:10.2832/30955
- Hooper, A., & Murray, D. (2018). *An analysis of the operational costs of trucking: 2018 update*. <https://trid.trb.org/view/1552714>
- Izadi, A., Nabipour, M., & Titidezh, O. (2020). Cost models and cost factors of road freight transportation: A literature review and model structure. *Fuzzy Information and Engineering*, 1-21.

- J. Allen, M. Piecyk, M. Piotrowska, F. McLeod, T. Cherrett, K. Ghali, T. Nguyen, T. Bektas, O. Bates, A. Friday, S. Wise, M. Austwick, (2018) Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: The case of London, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 61, Part B, 2018, Pages 325-338, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.020>.
- Janić M. (2007) Modelling the full costs of an Intermodal and road freight transport network. *Transp Res D: Transp Environ.* 2007;12(1:33–44).
- Kordnejad B., (2014) Intermodal transport cost model and intermodal distribution in urban freight. *Procedia – Soc Behav Sci.* 2014;125:358–372.
- Matsuoka, M., Hricko, A., Gottlieb, R. and De Lara, J. (2011) *Global Trade Impacts: Addressing the Health and Environmental Consequences of Moving International Freight Through our Communities*. Los Angeles: Occidental College & University of Southern California.
- McKinnon, A., Browne, M., Whiteing A. and Piecyk M. (2015) *Green Logistics*, 3rd edn. London: Kogan Page.
- Mostert M, Caris A, Limbourg S. (2017) Road and intermodal transport performance: the impact of operational costs and air pollution external costs. *Res Transp Bus Manag.*;23:75–85.
- Move, D. (2014). Update of the handbook on external costs of transport. Report for the. <http://www.studiomessori.it/content/2014-handbook-external-costs-transport.pdf>
- NCFRP (2013), National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2013) *Freight Data Cost Elements*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/21939>.
- Notteboom, T., Larissa van der Lugt, Niels van Saase, Steve Sel and Kris Neyens (2020) The Role of Seaports in Green Supply Chain Management: Initiatives, Attitudes, and Perspectives in Rotterdam, Antwerp, North Sea Port, and Zeebrugge. *Sustainability* 2020, 12, 1688; doi:10.3390/su12041688.
- OECD (2015) *International Transport Forum Global trade : International freight transport to quadruple by 2050*. Oecd, January, 1–5. <https://www.itfoecd.org/sites/default/files/docs/2015-01-27-outlook2015.pdf>
- Piecyk M. and McKinnon A (2007) *Internalising the external costs of road freight transport in the UK*. Edinburgh: Heriot-Watt University.
- Quak, H., Koffrie, R., Rooijen, T., Nesterova, N. (2017) *Economics of Electric Vehicles for City Logistics - FRE-VUE Deliverable 3.2*, DOI:10.13140/RG.2.2.29145.62566
- Silva, T. F. G., Gonçalves, A. T. P., & Leite, M. S. A. (2014). Logistics cost management: Insights on tools and operations. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 19(3), 329–346. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2014.065500>
- Smokers, R., Tavasszy, L., Chen, M., & Guis, E. (2014). Options for competitive and sustainable logistics. *Transport and Sustainability*, 6, 1–30. <https://doi.org/10.1108/S2044-994120140000006001>
- Rodrigue, J-P., Comtois, C. and Slack, B. (2013) *The Geography of Transport Systems*. 3rd edn. London: Routledge.
- Sansom, T, Nash, C, Mackie, P, Shires, J and Watkiss, P (2001) *Surface Transport Costs and Charges: Great Britain 1998*. Institute of Transport Studies, University of Leeds, Leeds
- Smith, A., Watkiss, P., Tweddle, G., McKinnon, A., Browne, M., Hunt, A. and Cross, S. (2005) *The Validity of Food Miles as an Indicator of Sustainable Development*. London: Defra.
- SMMT (2005) *The UK Automotive Sector: Towards sustainability*, SMMT, London
- Teodorović, D., & Janić, M. (2017). Chapter 10 – Transport Economics. In *Transportation Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803818-5.00010-X>

Teodorović, D., & Janić, M. (2017). Chapter 9 – Freight Transportation and Logistics. In *Transportation Engineering*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803818-5.00009-3>

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2018) <https://cevresehgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turlerine-gore-tasi-nan-yolcu-ve-yuk-miktari-i-85789> (15 Kasım 2020 Tarihinde erişildi).

United Nations, (2001) White Paper European transport policy for 2010: time to decide. COM(2001) 370, Terminology On Combined Transport.

Zeng, A. Z., & Rossetti, C. (2003). Developing a framework for evaluating the logistics costs in global sourcing processes: An implementation and insights. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 33(9), 785–803. <https://doi.org/10.1108/09600030310503334>