Bölüm 2

Türkiye Karayolu Yük Taşımacılığının Elektrifikasyonunda Karbon ve Lastik Aşınması Ödünleşimi Üzerine Çok Kirleticili Bir Yeşil Tedarik Zinciri Senaryo Analizi

Emine Öztürk Koçali[1]

Özet

Elektrikli ağır ticari araçlar, karayolu yük taşımacılığının karbonsuzlaştırılmasında başlıca politika araçlarından biri olarak görülür. Elektrifikasyonu yalnızca karbon emisyonları üzerinden değerlendirmek ise tedarik zinciri sürdürülebilirliğinin diğer çevresel boyutlarını görünmez kılabilir. Bu bölüm, Türkiye'deki ağır ticari karayolu yük filosunu 2030 ve 2035 yılları için yüzde 25, yüzde 50, yüzde 75 ve yüzde 100 elektrifikasyon senaryoları altında inceler. Değerlendirme, depodan tekerleğe karbon emisyonlarını, lastik aşınmasından kaynaklanan mikroplastik parçacıkları ve fren aşınması kaynaklı partikül maddeyi birlikte ele alır. TÜİK taşıt-kilometre istatistikleri, EMEP/EEA emisyon envanteri katsayıları ve bataryalı elektrikli kamyonlara ilişkin uluslararası gerçek kullanım verileri kullanılarak her senaryo için 20.000 yinelemeli Monte Carlo benzetimi yürütülmüştür. Bulgular, filonun 2035'e kadar tamamen elektrikli hâle gelmesi durumunda ortalama depodan tekerleğe karbon emisyonlarının yüzde 66,2 azalacağını, lastik aşınma parçacıklarının ise yüzde 21,7 artacağını göstermektedir. Karbon azalımı ile lastik aşınmasındaki artış arasındaki Pareto sınırı yaklaşık doğrusal görünse de iki sonuç farklı mekanizmalar tarafından belirlenir. Elektrik şebekesinin karbonsuzlaşması karbon kazancını büyütürken lastik aşınması maliyetini değiştirmez. Bu bulgu, elektrikli aracın kendiliğinden yeşil lojistik anlamına geldiği varsayımını sınırlandırmaktadır. Performans ölçümünün, yalnızca karbon emisyonuna odaklanan göstergeler yerine, depo-tekerlek karbon emisyonu, lastik aşınma parçacığı (mikroplastik) salımı ve fren kaynaklı parçacıklı madde (PM) emisyonunu birlikte değerlendiren çok kirleticili ölçütlerle yapılması gerekmektedir. Bölüm, resmî ve ikincil kaynaklara dayanarak lastik teknolojisi, yük yönetimi, finansman ve Euro 7 uyumu eksenlerinde politika önerileri geliştirmektedir.

1 Öğretim Görevlisi, İstanbul Gelişim Üniversitesi İstanbul Gelişim Meslek Yüksekokulu Lojistik Programı, emozturk@gelisim.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-8975-9459

https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1536.c6209

1. Giriş

Karayolu yük taşımacılığında elektrikli araç kullanımının önemi, uluslararası iklim politikaları ve işletmelerin sürdürülebilirlik programları içerisinde giderek artmaktadır. Bunun temel nedeni açıktır. Ağır ticari araçlar, Avrupa'da karayolu taşımacılığından kaynaklanan karbondioksitin önemli bir bölümünü üretir ve dizel motorun elektrikli tahrik sistemiyle değiştirilmesi egzoz kaynaklı emisyonları ortadan kaldırabilir. Bu yaklaşım, sürdürülebilirliği tek bir karbon göstergesiyle ölçülebilen bir olgu olarak ele alır fakat lastik ve fren aşınması ile yol yüzeyi aşınması gibi egzoz dışı kaynaklar, özellikle kentsel hava kalitesi ve mikroplastik kirliliği bakımından daha fazla bilimsel ilgi görmektedir.

Bu bölümün çıkış noktası, literatürde yeterince incelenmemiş fakat fiziksel temeli güçlü bir gözlemdir. Batarya paketinin kütlesi, elektrikli ağır ticari araçları dizel eşdeğerlerinden daha ağır hâle getirir. Ek kütle lastik yükünü, dolayısıyla lastik aşınma parçacığı (TWP) emisyonlarını artırabilir. Binek araç ölçeğindeki güncel bir derlemeye göre ABD pazarındaki bataryalı elektrikli araç modelleri, içten yanmalı araçlardan ortalama yüzde 43 daha ağırdır. Bu fark, lastik yüküne ve aşınma hızına doğrudan yansır (Chen ve Rodrigue, 2026). Aynı çalışma, egzoz standartları sıkılaştıkça lastik aşınması başta olmak üzere egzoz dışı kaynakların trafik kaynaklı partikül kirliliği içindeki payının arttığını vurgular. MOVES modeliyle ABD'deki lastik aşınma parçacığı emisyonlarını 2024-2044 dönemi için öngören başka bir çalışma, elektrikli araçlara atfedilen TWP emisyonlarının yirmi yılda on yedi kata kadar çıkabileceğini ve 2044'te havadaki toplam TWP emisyonlarının yaklaşık yüzde 40'ını oluşturabileceğini hesaplamıştır (Foroutan vd., 2025).

Bu bulgular, batarya kütlesinin daha büyük olduğu ve aracın dizel eşdeğerine göre başka yapısal değişiklikler de geçirdiği ağır ticari araç ölçeğine henüz sistematik biçimde taşınmamıştır. Avrupa'nın elektrikli kamyon filoları üzerine en kapsamlı gerçek kullanım raporlarından biri de olan ICCT (2025), uzun mesafe ve ağır ticari araç yaklaşımlarını alanın temel araştırma boşlukları arasında sayar. Türkiye'de ise karayolu yük taşımacılığı ulusal ekonominin merkezinde olmasına rağmen yük ve yolcu trafiğinin yaklaşık yüzde 90'ı karayoluyla gerçekleşmesine karşın karbon, lastik aşınması ve fren aşınmasını birlikte modelleyen bir ağır ticari araç elektrifikasyonu senaryo analizi bulunmamaktadır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2022).

Çalışma, bu boşluğu resmî ve ikincil kaynaklarla ele alır. 2024 dizel ağır ticari araç filosu temel alınarak 2030 ve 2035 için yüzde 25, yüzde 50, yüzde 75 ve yüzde 100 elektrifikasyon senaryoları oluşturulmuştur. Her senaryo için depodan tekerleğe karbon emisyonları, lastik aşınma parçacıkları ve fren aşınması kaynaklı PM emisyonları hesaplanmıştır. Belirsizlik 20.000

yinelemeli Monte Carlo benzetimiyle değerlendirilmiş, karbon azalımı ile lastik aşınmasındaki artış arasındaki ilişki Pareto sınırı üzerinden gösterilmiştir.

Bölüm araştırmaya üç yönden katkı sunar. Yöntem bakımından, sürdürülebilirliği yalnızca karbon emisyonu üzerinden değerlendiren tek ölçütlü yaklaşımdan ayrılarak, karbonu, lastik aşınması ve fren aşınması gibi diğer kirletici türleriyle birlikte, aynı senaryo modeli içinde değerlendiren çok kirleticili bir çerçeve kurar. Ampirik katkı olarak TÜİK taşıt-kilometre istatistikleri ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının şebeke emisyon katsayılarını EMEP/EEA envanter standartlarıyla birleştiren Türkiye'ye özgü bir model ortaya koyar. Kavramsal katkısı ise yeşil tedarik zinciri yönetimi alanında çoğu kez sorgulanmadan kabul edilen "*elektrikli araç eşittir yeşil lojistik*" varsayımını sınamaktır.

2. Kavramsal Çerçeve ve Literatür İncelemesi

2.1. Egzoz Dışı Emisyonlar ve Gözden Kaçan Kirletici Ekseni

Karayolu taşımacılığından kaynaklanan hava kirliliği araştırmaları uzun süre egzoz emisyonlarına odaklanmıştır. Bu kapsamda CO_2, NO_x, PM ve CO başlıca göstergeler olmuştur. Euro standartlarının her yeni aşaması egzoz emisyonlarını daha sıkı denetim altına alırken lastik, fren ve yol yüzeyi aşınmasından kaynaklanan egzoz dışı emisyonlar büyük ölçüde aynı kalmıştır. Bu nedenle trafik kaynaklı partikül kirliliği içindeki göreli payları artar. Avrupa Birliği'nin egzoz dışı emisyonları ilk kez kapsamına alan Euro 7 düzenlemesi, diğer adıyla (AB) 2024/1257 sayılı Tüzük, bu dönüşüme dayanır. Düzenleme, hafif araçlarda fren PM10 sınırını 7 mg/km olarak belirlemiş ve elektrikli ya da hibrit araçlar için 3 mg/km sınırı getirmiştir. Komisyon ağır ticari araçlara yönelik sınırları henüz geliştirmektedir. Dolayısıyla bu araçlarda egzoz dışı emisyon yönetimi, politikanın henüz olgunlaşmamış alanlarından biridir.

Lastik aşınma parçacıklarının çevresel önemi iki kaynaktan doğar. TWP'ler PM10 ve PM2.5 fraksiyonlarına girdiği için solunum yoluyla insan sağlığını etkileyebilir. Sentetik kauçuk içerikleri nedeniyle çevrede kalıcı mikroplastik yükünün de önemli bir bileşenidir. Triboloji açısından aşınma hızı, düşey yük ya da araç ağırlığı, lastik bileşimi, özellikle hızlanma davranışı ve yol yüzeyinin özellikleri gibi birçok etkene bağlıdır (Zhang vd., 2025). Elektrikli araçların iki özelliği bu değişkenleri olumsuz yönde etkileyebilir. Bunlar artan araç kütlesi ile elektrik motorunun anlık ve yüksek tork üretmesidir.

Literatürdeki bulgular ise bütünüyle aynı yönde değildir. Güncel bir eleştirel analiz, ikincil kaynaklarda yaygın biçimde aktarılan lastik aşınması emisyon katsayılarının birincil ölçüm çalışmalarına göre sistematik olarak

yüksek verildiğini savunur. Araştırmacılar bu yanlılığı 1995'e uzanan hatalı atıf zincirleriyle ilişkilendirmiş ve ABD Çevre Koruma Ajansı ile Avrupa Çevre Ajansının yaygın kabul gören katsayılarının bile gözden geçirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu tartışma, çalışmada kullanılan emisyon katsayılarının tek değer yerine geniş belirsizlik aralıklarıyla modellenmesini destekler (Saladin vd., 2024). Fren aşınmasına ilişkin kanıtlar daha belirgindir. Elektrikli araçların rejeneratif fren sistemi, kinetik enerjiyi sürtünme frenlerini kullanmadan elektrik motoru aracılığıyla geri kazanır. Böylece sürtünmeli frenlerin kullanım sıklığı azalır. Bataryalı elektrikli bir araç üzerinde yapılan ampirik ölçümler, bu mekanizmanın atmosfere yayılan fren aşınması emisyonlarını belirgin biçimde düşürdüğünü göstermiştir (Bondorf vd., 2023). ABD için hazırlanan bir projeksiyona göre rejeneratif frenleme, fren aşınması kaynaklı PM emisyonlarını yüzde 95'e kadar azaltabilir (Hicks vd., 2023, Foroutan vd., 2025). Fren aşınmasında açık ve kalıcı bir azalma görülürken lastik aşınmasındaki etki belirsiz fakat olumsuzdur. Bu asimetri, çok kirleticili bir analizin elektrikli araçların daha temiz ya da daha kirli olduğu biçiminde tek bir yargıya indirgenemeyeceğini gösterir.

Lastik aşınma parçacıklarının çevredeki akıbeti de önem taşır. Sucul çevre literatürünü kapsamlı biçimde inceleyen Wagner vd. (2018), TWP'lerin yüzey akışı ve atmosferik taşınım yoluyla su sistemlerine ulaştığını göstermiştir. Buna karşılık taşınım mekanizmaları, yüzey sularındaki yoğunluklar ve sucul yaşam üzerindeki etkiler konusunda bilgi sınırlıdır. Bu eksiklik, hava kirliliğine ek olarak su ve toprak ortamlarında henüz nicelleştirilememiş bir mikroplastik yüküne işaret eder. Bölümde geniş belirsizlik aralıklarının tercih edilmesinin nedenlerinden biri budur.

2.2. Ağır Ticari Araç Ölçeğindeki Araştırma Boşluğu

Yukarıda özetlenen çalışmaların neredeyse tamamı binek araç ölçeğindedir. Hem dizel hem elektrikli araçlara ait gerçek kullanım verilerinin daha sınırlı olduğu ağır ticari araç segmentinde durum farklıdır. Avrupa Temiz Kamyonculuk İttifakı (orijinal adıyla European Clean Trucking Alliance - ECTA), tarafından işletilen 91 elektrikli çekici-yarı römorku inceleyen ICCT (2025) raporu, alandaki en kapsamlı gerçek kullanım veri kümelerinden birini sunar. İncelenen elektrikli çekici-yarı römorkların enerji tüketimi 92-150 kWh/100 km, başka bir ifadeyle 0,92-1,50 kWh/km arasında değişmiş ve eşdeğer dizel kamyonlardan ortalama yüzde 65 daha düşük bulunmuştur (ICCT, 2025). Almanya'daki bağımsız bir gerçek kullanım veri analizi de 0,96 kWh/km ortalama tüketim değeriyle üretici teknik özelliklerine yakın sonuç vermiştir (Oeko-Institut, 2025).

Dizel araçlara ilişkin gerçek kullanım testleri, tam yüklü ağır çekici-yarı römorkların tanktan tekerleğe CO_2 emisyonlarının 750-840 g/km aralığında olduğunu ve taşıma yüküne bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir (ICCT, 2023a, 2023b). Dizel ve elektrikli çekicilerin bu tüketim ve emisyon profilleri birlikte değerlendirildiğinde elektrifikasyonun net karbon kazancının elektrik şebekesinin karbon yoğunluğuna büyük ölçüde bağlı olduğu görülür. Çalışmanın şebeke senaryolarını ayrı bir değişken olarak ele almasının nedeni budur.

2.3. Türkiye Bağlamı ve Araştırma Boşluğu

Türkiye'deki ulaştırma sistemi ağırlıklı olarak karayoluna dayanır. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı verilerine göre yük ve yolcu taşımacılığının yaklaşık yüzde 90'ı karayoluyla yapılır, sektördeki karbon emisyonlarının yaklaşık yüzde 94'ü de karayolu taşımacılığından kaynaklanır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2022). TÜİK'in 2024 Taşıt-Kilometre İstatistikleri ağır yük filosunun iki ana bileşeni olan kamyonlar ile çekici-yarı römorkları ayrı ayrı raporlar. Çekiciler yılda ortalama 66.893 km, kamyonlar ise 21.887 km yol yapar. Ulusal ölçekteki 382,87 milyar taşıt-kilometrenin yüzde 5,7'si çekicilere, yüzde 3,8'i kamyonlara aittir (TÜİK, 2025). Bu ayrıntı düzeyi, iki araç sınıfının filo içindeki göreli ağırlıklarının resmî verilere dayandırılmasını ve ampirik model kurulmasını mümkün kılar.

Türkiye elektrik şebekesinin karbon yoğunluğu senaryo tasarımında belirleyicidir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığının güncel bilgi formlarına göre ulusal şebekenin tüketime dayalı ortalama emisyon katsayısı yaklaşık 0,44 tCO_2/MWh, yani 440 gCO2/kWh düzeyindedir. Faaliyete dayalı marjinal emisyon katsayısı ise 0,71 tCO_2/MWh'ye kadar çıkar (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Türkiye Ulusal Enerji Planı rüzgâr ve güneş kurulu gücünün 2035'e kadar yaklaşık üç katına çıkarılmasını hedefler (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022). İkinci Ulusal Katkı Beyanı'ndaki elektrifikasyon teşvikleri de aynı yönü gösterir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025). Kesin düşüş düzeyine ilişkin resmî bir nicel projeksiyon yayımlanmadığından 2030 ve 2035 şebeke yoğunlukları, politika yönünü yansıtan açık senaryo varsayımları olarak kullanılmıştır. Bu değerler resmî hükûmet projeksiyonu değildir (bkz. Bölüm 3.5).

Senaryoların uygulanabilirliği değerlendirilirken Türkiye karayolu taşımacılığı sektörünün yapısal özellikleri de dikkate alınmalıdır. Sektör politikalarına ilişkin değerlendirmeler, filonun büyük bölümünün az sayıda araca sahip bireysel işletmeciler ile küçük işletmelerde toplandığını gösterir.

Bu yapı sermaye birikimini, teknoloji yatırımı kapasitesini ve geniş ölçekli filo yenileme kararlarını sınırlar (Kılıç, 2019). Karayolu yük taşımacılığının Türkiye ekonomisindeki ağırlığı ile sektörün finansman kısıtları arasındaki gerilim, elektrifikasyonun teknik bir mühendislik sorununun yanında sektörel dönüşüm kapasitesi sorunu olduğunu da ortaya koyar (Macit, 2020). Bu yapısal koşullar, politika sonuçlarının tartışıldığı Bölüm 5.2'de yeniden ele alınmıştır.

2.4. Çok Kirleticili Bulguların Yeşil Tedarik Zinciri Karar Çerçevesine Yerleştirilmesi

Bölümün bulguları ile yeşil tedarik zinciri yönetimi (YTZY) literatürü arasındaki ilişki, konu benzerliğinin ötesinde kavramsal düzeyde kurulmalıdır. Seuring ve Müller (2008), sürdürülebilir tedarik zincirini doğal ya da toplumsal sistemlere zarar vermeden uzun dönemli ekonomik yaşayabilirlik üretebilen bir sistem olarak tanımlar. Bu tanım, üç performans boyutunun birlikte yönetilmesini gerektirir. Üçlü bilanço yaklaşımı da ekonomik, çevresel ve toplumsal unsurların sürdürülebilirlik amacıyla bütünleştirilmesini öngören çerçeveyle uyumludur (Carter ve Rogers, 2008). Bu bölümde sunulan sonuçlar, üçlü bilançonun çevresel boyutunun bile kendi içinde birden fazla bileşen taşıdığını göstererek YTZY çerçevesini ayrıntılandırır.

Yeşil tedarik zinciri uygulamalarını sınıflandıran erken çalışmalar, filo ve araç teknolojisi kararlarını tedarikçi ve operasyon düzeyinde çevresel risk yönetimi kategorisine yerleştirir (Srivastava, 2007, Zhu ve Sarkis, 2004). Bu sınıflandırmada ağır ticari filonun elektrifikasyonu, özellikle yukarı yönlü taşımacılık ve dağıtım kategorisindeki Kapsam 3 emisyonlarında karbon ayak izini iyileştiren bir operasyon kararıdır. Aynı karar mikroplastikler bakımından ayrı bir çevresel risk ekseni açar (WRI/WBCSD, 2011). Türkiye'deki lojistik işletmeleri üzerine nitel bir araştırma, ulusal ve uluslararası düzenlemeleri, rekabet koşullarını ve işletme stratejisini yeşil tedarik zinciri uygulamalarına geçişin temel itici güçleri olarak belirlemiştir (Özkaya ve Kazançoğlu, 2020). Bu bulgu, Bölüm 5.2'de önerilen düzenlemelerin Türkiye lojistik sektöründeki karar vericiler için neden anlamlı bir teşvik aracı olabileceğini açıklar. Karbon azalımının lastik aşınması artışı ve fren aşınması azalımıyla birlikte ortaya çıktığını gösteren bu bulgular, filo elektrifikasyonu kararlarının tek ölçütlü bir sorun yerine çok ölçütlü bir karar problemi olarak kurulması gerektiğini ortaya koyar. Sürdürülebilir tedarikçi ve teknoloji seçimi literatüründe çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yöntemleri, özellikle bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile TOPSIS'i birleştiren hibrit yaklaşımlar, çevresel, operasyonel ve ekonomik ölçütlerin tek bir karar modeli içinde ağırlıklandırılmasını sağlar. Bu hibrit yöntem, imalat sektöründe tedarikçi değerlendirmesinde (Chatterjee & Stević, 2019), yeşil tedarikçi seçiminde (Wimalasena vd.,

2025) ve sürdürülebilir uygulama çerçevelerinde (Boutkhoum vd., 2016) yaygın biçimde uygulanmıştır. Türkiye'de sürdürülebilir tedarikçi seçimi için geliştirilen bulanık bir ÇÖKV modeli, üçlü bilanço yaklaşımını doğrudan karar ölçütlerine dönüştürmesi bakımından benzer bir örnektir (Avcı Öztürk ve Özçelik, 2014). Bu bölümde üretilen karbon, TWP ve fren PM göstergeleri böyle bir modelin girdi katmanını oluşturabilir. Örneğin bir filo yöneticisi, karbon azalımına yüksek, TWP artışına daha düşük ağırlık veren bir AHP hiyerarşisi kurabilir. Nitekim benzer bir yaklaşım, paylaşımlı araç filolarında güç aktarma organı (İYM, hibrit, tam elektrikli) seçimini çevresel ve ekonomik ölçütler üzerinden değerlendiren yakın tarihli bir çalışmada da örneklenmektedir (Sendek-Matysiak vd., 2026). Bu hiyerarşiyle filo yöneticisi, Bölüm 4.4'teki Pareto sınırından işletmenin önceliklerine uygun elektrifikasyon düzeyini seçebilir. Bu seçim yüzde 75 yerine yüzde 50 olabilir. Böylece eşik, teknik optimizasyon sorunundan kurumsal tercih sorununa dönüşür. Ulaştırma türü seçimindeki çevresel ölçütleri benzer bir çerçevede inceleyen Fang vd. (2024) de aynı yöntemsel mantığı izler. Bu bölüm doğrudan ÇÖKV uygulaması yapmaz fakat Bölüm 4'teki bulguları böyle bir modelde kullanılabilecek somut girdilere dönüştürür.

3. Veri ve Yöntem

3.1. Araştırma Tasarımı

Araştırma, anket ya da birincil veri kullanmadan kamu istatistiklerine, hakemli yayınlara ve kurumsal ikincil kaynaklara dayanan nicel bir senaryo analizidir. Yöntem dört aşamadan oluşur. İlk aşamada 2024 dizel ağır ticari araç filosu için temel senaryo kurulmuştur. İkinci aşamada 2030 ve 2035 yılları için yüzde 25, yüzde 50, yüzde 75 ve yüzde 100 elektrifikasyonu kapsayan sekiz senaryo tanımlanmıştır. Üçüncü aşamada her senaryo için depodan tekerleğe karbon emisyonu, lastik aşınması ve fren aşınması kaynaklı partikül madde bakımından nokta tahminleri ile olasılıksal belirsizlik aralıkları hesaplanmıştır. Son aşamada karbon tasarrufu ile artan lastik aşınması arasındaki ödünleşim Pareto sınırıyla gösterilmiştir.

3.2. Filonun Tanımlanması ve Ağırlıklandırılması

Model, Türkiye ağır yük filosunu kamyonlar ile çekici-yarı römork birleşimlerinden oluşan iki araç sınıfına ayırır. TÜİK'in (2025) taşıt-kilometre paylarına göre bu sınıflar ulusal taşıt-kilometrenin sırasıyla yüzde 3,8'ini ve yüzde 5,7'sini oluşturur. İki değer kendi toplamlarına göre normalize edildiğinde filo içi ağırlıklar kamyonlar için yüzde 40, çekici-yarı römorklar için yüzde 60 olarak hesaplanır. Ton-kilometre normalizasyonunda Türkiye karayolu taşımacılığı uygulamasında yaygın kabul gören temsili ortalama

yük varsayımları kullanılmıştır. Etkin ortalama yük kamyonlar için 8 ton, çekici-yarı römorklar için 18 tondur. Bu değerler resmî istatistik değil, model varsayımıdır. İlgili sınırlılık Bölüm 3.5'te yeniden değerlendirilmiştir.

3.3. Emisyon ve Aşınma Katsayıları

- *Depodan tekerleğe karbon emisyonları:* Dizel araçların depodan tekerleğe (TTW) CO_2 emisyonları, gerçek kullanım testlerine dayanan üçgen dağılımlarla modellenmiştir. Kamyonlar için alt sınır, mod ve üst sınır sırasıyla 550, 650 ve 750 g/km'dir. Çekici-yarı römorklar için karşılık gelen değerler 700, 800 ve 920 g/km olarak alınmıştır (ICCT, 2023a, 2023b). Yakıt üretimi ile dağıtım zincirini hesaba katan ve yaşam döngüsü değerlendirmesi literatüründe yaygın kullanılan yaklaşık yüzde 19'luk depodan tanka (WTT) çarpanı uygulanarak TTW değerleri depodan tekerleğe (WTW) çevrilmiştir. Elektrikli araçlarda enerji tüketimi, Avrupa filolarının gerçek kullanım verilerine dayalı üçgen dağılımlarla modellenmiştir. Çekici-yarı römorklar için 0,92, 1,15 ve 1,50 kWh/km değerleri kullanılmıştır (ICCT, 2025). Kamyonlar için ölçeklenmiş varsayım 0,60, 0,85 ve 1,10 kWh/km'dir. Şebeke karbon yoğunluğu 2024 için 400, 440 ve 713 gCO_2/kWh olarak modellenmiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Değerler 2030 için 280, 350 ve 440 gCO_2/kWh, 2035 için 200, 270 ve 380 gCO_2/kWh'dir. Son iki dağılım resmî projeksiyon değil, yukarıda açıklanan senaryo varsayımlarıdır.
- *Lastik aşınma parçacıkları:* Dizel ağır ticari araçların temel TWP katsayısı, EMEP/EEA Hava Kirletici Emisyon Envanteri Rehberi'nde ağır ticari araç kategorisi için verilen merkez değerlerden hareketle taşıt-kilometre başına 400, 539 ve 800 mg'lık üçgen dağılımla modellenmiştir. Elektrikli araçların ek kütlesinin, içten yanmalı motor, yakıt deposu ve şanzıman çıkarıldıktan sonraki net batarya paketi kütlesinin, lastik yükü üzerindeki etkisini yansıtmak amacıyla 1,10, 1,20 ve 1,35 değerlerinden oluşan kütle ölçekleme çarpanı uygulanmıştır. Aralık, literatürde bildirilen kütle artışlarına dayanır (Chen ve Rodrigue, 2026, Foroutan vd., 2025).
- *Fren aşınması kaynaklı PM:* Fren aşınması, 2024 dizel temel değerinin 100 kabul edildiği göreli bir endeksle modellenmiştir. Elektrikli araçlarda rejeneratif frenle sağlanan azalma oranı 0,55, 0,70 ve 0,85 değerlerinden oluşan üçgen dağılımla temsil edilmiştir. Bu temkinli varsayım, uzun mesafede ve sürekli yük altında çalışan ağır ticari araçların rejeneratif kapasitesinin binek araçlara göre daha sınırlı olabileceğini dikkate alır. Değerler, binek araçlar için bildirilen yüzde 95'e kadar azalma oranlarının altındadır ve ağır ticari araç çalışma profiline uyarlanmıştır (Bondorf vd., 2023, Hicks vd., 2023).

3.4. Monte Carlo Belirsizlik Analizi

Her senaryo için 20.000 yinelemeli Monte Carlo benzetimi yürütülmüştür. Dizel CO2 katsayıları, BEV enerji tüketimi, şebeke karbon yoğunluğu, TWP katsayısı, kütle ölçekleme çarpanı ve fren azalım oranından oluşan tüm girdiler, yukarıda tanımlanan üçgen dağılımlardan bağımsız olarak örneklenmiştir. Her yinelemede kamyon ve çekici-yarı römork ağırlıklarıyla filo ortalamaları hesaplanmıştır. Sonuçlar ortalama değerler ve 5.-95. yüzdelik aralıklarıyla raporlanmıştır. Karbon azalımı ile TWP artışı, ilgili senaryo değerinin aynı yinelemedeki 2024 dizel temel değerine oranı üzerinden hesaplanmıştır. Bu yöntem, iki gösterge arasındaki korelasyon yapısını benzetim içinde korur. Model girdileri, üçgen dağılım sınırları ve kaynaklar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Monte Carlo Model Parametreleri ve Kaynakları

Parametre	Alt Sınır	Mod	Üst Sınır	Birim	Kaynak
Dizel TTW CO_2 (kamyon)	550	650	750	g/km	ICCT, 2023a, 2023b
Dizel TTW CO_2 (çekici-yarı römork)	700	800	920	g/km	ICCT, 2023a, 2023b
BEV enerji tüketimi (kamyon)	0,60	0,85	1,10	kWh/km	Ölçeklenmiş varsayım
BEV enerji tüketimi (çekici-yarı römork)	0,92	1,15	1,50	kWh/km	ICCT, 2025
Şebeke karbon yoğunluğu 2024	400	440	713	gCO_2/kWh	Enerji Bakanlığı, 2024
Şebeke karbon yoğunluğu 2030	280	350	440	gCO_2/kWh	Senaryo varsayımı
Şebeke karbon yoğunluğu 2035	200	270	380	gCO_2/kWh	Senaryo varsayımı
Temel TWP katsayısı (dizel HDV)	400	539	800	mg/taşıt-km	EMEP/EEA
Kütle ölçekleme çarpanı (BEV)	1,10	1,20	1,35	Boyutsuz	Chen ve Rodrigue, 2026, Foroutan vd., 2025
Fren azalım oranı (BEV)	0,55	0,70	0,85	Boyutsuz	Bondorf vd., 2023, Hicks vd., 2023

3.5. Sınırlılıklar

Çalışmanın yöntemsel sınırlılıkları açıkça belirtilmelidir. İlk olarak 2030 ve 2035 şebeke karbon yoğunlukları resmî hükûmet projeksiyonuna değil, ulusal enerji planındaki yenilenebilir kurulu güç hedeflerinin yönünü temel alan senaryo

varsayımlarına dayanır. Bölüm 4.6'daki duyarlılık analizi, bu parametrenin karbon bulgularındaki en kırılgan bileşen olduğunu doğrular. Monte Carlo aralığı belirsizliğin bir bölümünü kapsasa da ileride yayımlanacak resmî projeksiyonlar farklılaşabilir. İkinci olarak ton-kilometre normalizasyonunda kullanılan 8 ve 18 tonluk ortalama yükler resmî istatistiklerden değil, modelleme kararlarından türetilmiştir. Üçüncü olarak Bölüm 4.6'daki duyarlılık analizi tek seferde tek değişken (OAT) yöntemiyle yürütülmüştür. Yüksek enerji tüketimi ile düşük şebeke yoğunluğunun aynı anda gerçekleşmesi gibi parametre etkileşimleri bu yöntemle ölçülemez. Tam faktöriyel ya da Sobol duyarlılık analizi ileride yapılacak geliştirmeler için uygun bir yöndür. Bu sınırlılıklar nedeniyle sonuçlar kesin nokta tahminleri yerine yön ve göreli büyüklükler üzerinden yorumlanmalıdır.

4. Bulgular

4.1. Temel Senaryo ve Kirletici Profilleri

Monte Carlo benzetiminde 2024 tamamen dizel filo için ortalama depodan tekerleğe karbon emisyonu 885 g/km, 5.-95. yüzdelik aralığı ise 825-948 g/km olarak hesaplanmıştır. Aynı temel senaryoda ortalama lastik aşınma parçacığı emisyonu taşıt-kilometre başına 580,9 mg'dır ve aralık 454,7-729,5 mg/taşıt-km'dir. Fren aşınması endeksi tanım gereği 100'dür. Filonun 14,0 tonluk ortalama yüküyle ton-kilometre üzerinden normalize edildiğinde 2024 temel karbon yoğunluğu 63,2 g CO_2/ton-km olur.

4.2. Elektrifikasyon Senaryolarında Karbon Emisyonları

Sekiz senaryonun ortalama depodan tekerleğe karbon emisyonları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Depodan Tekerleğe Karbon Emisyonu Senaryo Sonuçları

Senaryo	CO_2 (g/km)	5.-95. Yüzdelik	2024'e Göre Azalma (%)	CO_2 (g/ton-km)
2024 Temel (tamamen dizel)	885	825-948	-	63,2
2030 Yüzde 25 elektrifikasyon	758	709-808	14,4	54,1
2030 Yüzde 50 elektrifikasyon	631	584-680	28,7	45,0
2030 Yüzde 75 elektrifikasyon	503	448-565	43,1	36,0
2030 Yüzde 100 elektrifikasyon	376	305-455	57,5	26,9

2035 Yüzde 25 elektrifikasyon	739	690-789	16,6	52,8
2035 Yüzde 50 elektrifikasyon	592	545-642	33,1	42,3
2035 Yüzde 75 elektrifikasyon	445	391-508	49,7	31,8
2035 Yüzde 100 elektrifikasyon	299	229-380	66,2	21,3

Sonuçlarda iki eğilim öne çıkmaktadır. Elektrifikasyon oranı yükseldikçe karbon azalımı beklendiği gibi yaklaşık doğrusal artar. Aynı elektrifikasyon düzeyinde 2035 senaryosu, 2030'a göre belirgin biçimde daha fazla karbon kazancı sağlar. Tam elektrifikasyonda azalma 2030 için yüzde 57,5, 2035 için yüzde 66,2'dir. Fark elektrikli araç teknolojisinden değil, şebekenin zaman içinde daha düşük karbonlu hâle gelmesinden doğar. Dolayısıyla elektrifikasyonun karbon kazancı, araç dönüşümünün yanında bu dönüşümün gerçekleştiği enerji sisteminin karbon içeriğine de bağlıdır.

4.3. Lastik Aşınması ve Mikroplastik Yükü

Aynı senaryolara ait TWP sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Lastik Aşınma Parçacığı Senaryo Sonuçları

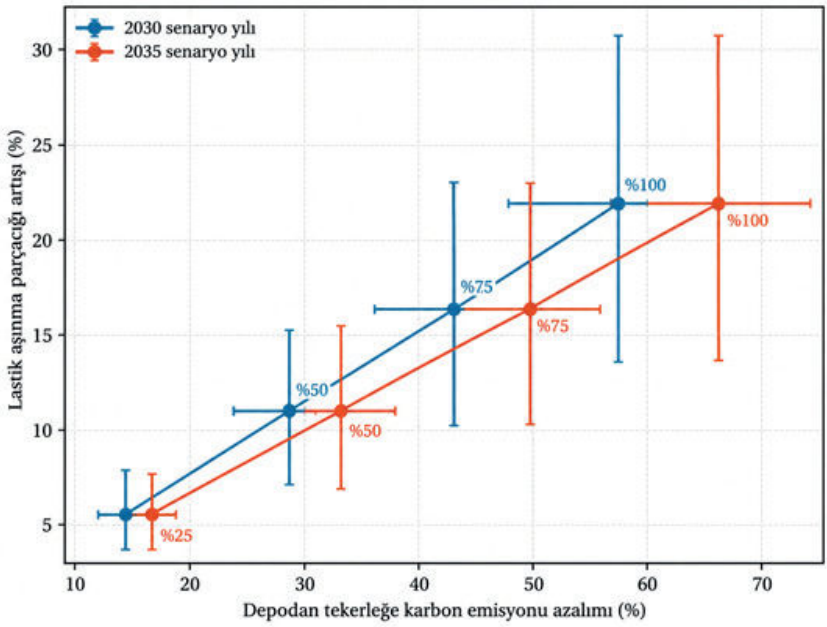
Senaryo	**TWP (mg/taşıt-km)**	**5.-95. Yüzdelik**	**2024'e Göre Artış (%)**	**Fren PM Endeksi**	**Fren Azalımı (%)**
2024 Temel (tamamen dizel)	580,9	454,7-729,5	-	100,0	-
2030/2035 Yüzde 25 elektrifikasyon	612,4	479,1-770,9	5,4	82,5	17,5
2030/2035 Yüzde 50 elektrifikasyon	643,9	502,5-811,2	10,8	65,0	35,0
2030/2035 Yüzde 75 elektrifikasyon	675,4	525,3-852,2	16,2	47,5	52,5
2030/2035 Yüzde 100 elektrifikasyon	706,8	547,6-895,5	21,7	29,9	70,1

TWP artış oranı ile fren aşınmasındaki azalma 2030 ve 2035 için aynıdır. Tablo 3'teki bu iki sonuç yalnızca elektrifikasyon oranına bağlıdır. Bunun bağımsız ampirik bir bulgu değil, model mimarisinin doğal sonucu olduğu özellikle belirtilmelidir. Modelde lastik yükünün ve rejeneratif fren oranının şebeke karbon yoğunluğundan bağımsız olduğu açıkça varsayılmıştır (Bölüm 3.3). Dolayısıyla burada görülen bağımsızlık bir model varsayımıdır. Yine de yapısal özelliğin politika bakımından karşılığı vardır. Lastik yükü ve rejeneratif fren kapasitesi, aracın tasarımı ile kullanım biçiminden doğar ve elektrik şebekesinin karbon yoğunluğuyla fiziksel bir bağ taşımaz. Şebeke temizlendikçe elektrifikasyonun karbon tasarrufu büyür fakat lastik aşınmasında kendiliğinden bir iyileşme oluşmaz. Zaman karbon ekseninde elektrifikasyonun lehine işlerken lastik aşınması sorununu çözmez. Bu asimetri, lastik aşınmasının şebekenin karbonsuzlaşmasından ayrı bir politika hedefi olarak ele alınmasını gerektirir (bkz. Bölüm 5.2).

Fren aşınmasındaki yön tersine döner. Yüzde 100 elektrifikasyon senaryosunda fren aşınması kaynaklı PM emisyonları 2024 temel değerine göre ortalama yüzde 70,1 azalır. Bu karşıtlık çok kirleticili değerlendirmenin neden gerekli olduğunu açıklar. Yalnızca lastik aşınmasına bakan bir analiz elektrifikasyonu kirletici, yalnızca fren aşınmasına bakan bir analiz ise temiz olarak niteleyecektir. Sonuç, incelenen kirleticiye göre yön değiştiren karma bir çevresel profildir.

4.4. Karbon Azalımı ve Lastik Aşınması Ödünleşiminin Pareto Sınırı

Şekil 1, 2030 ve 2035 senaryolarında karbon azalımı ile lastik aşınmasındaki artış arasındaki ilişkiyi Pareto sınırı üzerinde göstermektedir.

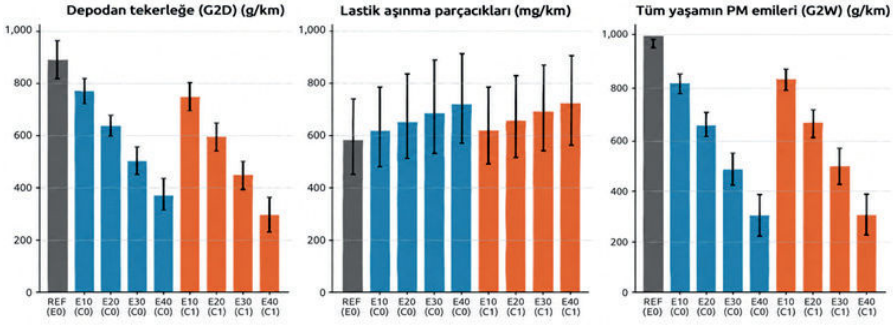


Şekil 1. Türkiye Ağır Ticari Karayolu Yük Filosunda Karbon Azalımı ile Lastik Aşınması Ödünleşiminin Pareto Sınırı. Hata çubukları, 20.000 yinelemeli Monte Carlo benzetiminin 5.-95. yüzdelik aralığını gösterir.

Pareto sınırı üç özellik gösterir. Merkez tahminler arasındaki ilişki yaklaşık doğrusaldır. Elektrifikasyon oranındaki her 25 yüzde puanlık artış, yaklaşık 14 yüzde puanlık ek karbon azalımı ve 5 yüzde puanlık TWP artışıyla ilişkilidir. Bu örüntü, azalan marjinal fayda yerine görece sabit bir ödünleşim oranına işaret eder. Ayrıca 2035 eğrisi 2030 eğrisinin sistematik olarak sağında yer alır. Aynı TWP artışında, yani aynı elektrifikasyon oranında, 2035 senaryosu daha büyük karbon kazancı üretir. Bu fark, önceki bölümde açıklanan şebeke karbonsuzlaşmasının doğrudan sonucudur. Belirsizlik aralığı da elektrifikasyon oranıyla birlikte genişler. Tam elektrifikasyonda karbon azalımının 5.-95. yüzdelik aralığı yaklaşık 18 yüzde puanıyken yüzde 25 elektrifikasyonda 4-5 yüzde puanı düzeyindedir. Başka bir ifadeyle politika bakımından en iddialı seçenek olan tam elektrifikasyon, net çevresel etkiler açısından en yüksek belirsizliği de taşır.

4.5. Çok Kirleticili Gösterge Paneli

Şekil 2, üç kirleticiyi aynı panelde göstererek senaryolar arasındaki karşılaştırmayı özetler.

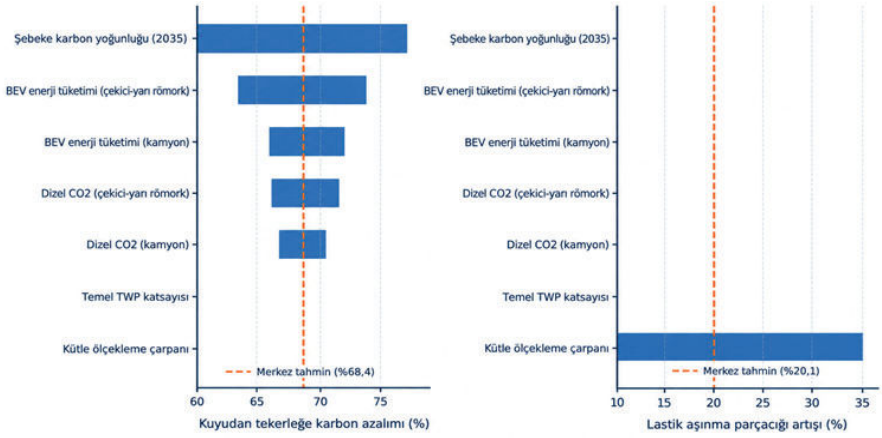


Şekil 2. Depodan Tekerleğe Karbon, Lastik Aşınma Parçacığı ve Fren Aşınması PM Göstergelerinden Oluşan Çok Kirleticili Senaryo Paneli

Panel, üç kirletici ekseninin farklı yönlerde hareket ettiğini görsel olarak ortaya koyar. Bu nedenle elektrifikasyonun bütünüyle iyi ya da kötü olduğu yönünde tek bir hüküm verilemez. Elektrifikasyon arttıkça karbon ve fren PM göstergeleri iyileşir, TWP göstergesi ise kötüleşir. Toplumun ve karar vericilerin bu üç eksene vereceği göreli ağırlık teknik olmaktan çok normatif bir tercihtir. Bölümde sunulan çerçeve, bu tercihin açık ölçütlerle tartışılabilmesini sağlar.

4.6. Duyarlılık Analizi

Monte Carlo benzetiminin ürettiği belirsizlik aralıkları, sonucu en fazla hangi girdinin etkilediğini tek başına göstermez. Bu soruyu yanıtlamak için 2035 yılı yüzde 100 elektrifikasyon senaryosuna tek seferde tek değişken (OAT) duyarlılık analizi uygulanmıştır. Diğer bütün parametreler merkez değerinde, yani modda tutulurken her girdi ayrı ayrı alt ve üst sınıra çekilmiş, karbon azalımı ile TWP artışında oluşan değişim aralığı kaydedilmiştir. OAT temel değeri diğer girdileri üçgen dağılım üzerinden ortalama almak yerine modda sabitler. Bu nedenle merkez senaryo sonuçları olan yüzde 68,4 karbon azalımı ve yüzde 20,0 TWP artışı, Bölüm 4.2 ve 4.3'teki dağılım ortalamalarından, sırasıyla yüzde 66,2 ve yüzde 21,7'den, bir miktar farklıdır. İki sonuç çelişmez. Biri en olası merkez durumu, diğeri bütün benzetim dağılımının ortalamasını yanıtlar. Şekil 3 sonuçları tornado diyagramıyla sunar.



Şekil 3. Tek Seferde Tek Değişken Duyarlılık Analizi. 2035 Yılı Yüzde 100 Elektrifikasyon Senaryosu. Çubuklar, ilgili parametre tek başına alt ve üst sınıra çekildiğinde çıktıda oluşan değişim aralığını gösterir.

Analiz iki ayrı duyarlılık yapısı ortaya koymuştur. Karbon azalımını en fazla etkileyen değişken, 21,1 yüzde puanlık aralıkla şebeke karbon yoğunluğu varsayımıdır. Bu parametre geleceğe ilişkin resmî bir projeksiyondan değil, senaryo varsayımlarından türetildiği için karbon sonuçlarının en belirsiz girdisidir. İkinci sırada 10,7 puanlık aralıkla elektrikli çekici-yarı römork enerji tüketimi yer alır. Avrupa filolarının gerçek kullanım verilerine dayanan bu değer görece daha güvenilirdir (ICCT, 2025). Kamyon ve çekici-yarı römorklara ait dizel CO_2 karşılaştırma katsayılarının duyarlılığı ise 3,4-5,6 puan aralığında kalmıştır.

TWP artışının duyarlılık yapısı çok daha sınırlıdır. TWP artış oranındaki bütün değişim, 25,0 yüzde puanlık etkisi olan kütle ölçekleme çarpanından kaynaklanır. Diğer altı parametre TWP artış yüzdesini değiştirmez. Bu sonuç bir model hatası değildir. TWP artış oranı senaryo değerinin temel değere oranı olarak yazıldığından dizel TWP katsayısı pay ve paydada birbirini götürür. Bulguların veri toplama açısından doğrudan karşılığı vardır. TWP artışındaki belirsizliği azaltmak isteyen araştırmalar, temel lastik aşınma katsayısını daha kesin ölçmekten önce elektrikli ağır ticari araçların dizel araçlara göre kütle artışını ve bu artışın lastik yüküne nasıl yansıdığını ölçmelidir. Chen ve Rodrigue'un (2026) binek araçlar için bildirdiği yüzde 43'lük kütle artışının ağır ticari araçlarda geçerli olup olmadığı, çalışmanın en önemli veri boşluğudur.

5. Tartışma

5.1. Elektrikli Araç ve Yeşil Lojistik Eşitliği Varsayımının Sınırları

Bulgular girişteki araştırma sorusuna açık bir yanıt verir. Elektrifikasyon, yeşil lojistiğin tek boyutlu bir göstergesi olarak kullanılamaz. Yüzde 100 elektrifikasyon senaryosu 2035'te karbon emisyonlarını üçte iki azaltırken lastik aşınma parçacıklarını yaklaşık beşte bir artırır. Bu sonuç elektrifikasyonun olumsuz olduğu anlamına gelmez. Karbon kazancının mutlak büyüklüğü lastik aşınması maliyetinden çok daha yüksektir ve fren aşınması ekseninde ek yarar sağlanır. Yine de yeşil tedarik zinciri çalışmaları ile kurumsal sürdürülebilirlik raporlarında yaygın olan sıfır egzoz emisyonu eşittir sıfır çevresel etki varsayımı geçerli değildir. Filo elektrifikasyonunu tek bir karbon ölçütüyle tanımlayan sürdürülebilir tedarik zinciri analizi, mikroplastikler ve hava kalitesi üzerindeki olumsuz dışsallıkları hesaba katmaz.

Chen ve Rodrigue (2026) ile Foroutan vd. (2025), ulaştırma süreçlerinin sürdürülebilirliğini tek boyutta değerlendiren çalışmaların filo elektrifikasyonunun olumsuz çevresel etkilerini olduğundan düşük gösterebildiğini belirtir. Aynı sonuç ağır ticari araçlar için de geçerli olabilir. Ağır ticari araçlarla binek araçlar arasındaki kütle farkı ve çekici-yarı römorkların yılda ortalama 67.000 km'ye ulaşan kullanım mesafesi, incelenen etkinin bu sektörde daha belirgin olabileceğine işaret eder (TÜİK, 2025).

5.2. Politika Sonuçları

Analiz dört politika alanında uygulamaya dönük sonuç üretir. Düzenleme bakımından Euro 7'nin ağır ticari araçlara ilişkin egzoz dışı emisyon kurallarının geliştirilmesi, erken müdahale için bir fırsat oluşturur (bkz. Bölüm 2.1). Türkiye'nin Avrupa Birliği'ne uyum sürecinde ağır ticari araç lastik aşınması kurallarını erken tartışması, yerli lastik sanayisine öngörülebilirlik ve teknolojik hazırlık sağlayabilir. Teknoloji alanında düşük aşınmalı lastikler ile kütlesi iyileştirilmiş elektrikli araç tasarımları birbirini tamamlayan yatırımlardır. Bu yatırımlar, filo sahipleri açısından çok kirleticili performansı iyileştirir ve CO2 azalımının diğer çevresel göstergeler üzerindeki maliyetini düşürür. Şebeke politikası bakımından yatırım takviminin karbonsuzlaşma patikasıyla uyumlaştırılması, aynı filo yatırımından daha fazla karbon kazancı elde edilmesini sağlar. Böyle bir zamanlama lastik aşınmasını artırmadan karbon kazancının lastik aşınması maliyetine oranını yükseltir.

Türkiye açısından dördüncü ve en belirleyici alan finansmandır. Avrupa için yapılan toplam sahip olma maliyeti (TCO) analizleri, ağır elektrikli çekici-yarı römorkların 2030'dan önce çoğu araç sınıfında dizele göre en düşük

maliyetli karbonsuzlaşma seçeneği olacağını öngörür (ICCT, 2023c). Bu avantaj, yüksek başlangıç sermayesinin uzun dönemde daha düşük işletme giderleriyle dengelenmesine bağlıdır. Hindistan üzerine karşılaştırmalı bir TCO çalışması, dengeleme mekanizmasının gelişmekte olan ekonomilerde sermayeye erişim ve şarj altyapısı koşullarına duyarlı olduğunu göstermiştir (Rajagopal vd., 2024). Bulgular, Bölüm 2.3'te açıklanan Türkiye filo yapısıyla doğrudan ilişkilidir. Sektörün büyük bölümü, sermaye birikimi sınırlı küçük işletmeler ile bireysel işletmecilerden oluşur (Kılıç, 2019). Yüksek başlangıç maliyetini karşılayamayan işletmeler için kâğıt üzerindeki TCO üstünlüğü elektrifikasyonu uygulanabilir kılmaz. Düşük faizli kredi, liman ve kent erişim teşvikleri ile toplu alım programları gibi filo yenileme kapasitesini artıran finansman mekanizmaları kurulmadıkça bu bölümde önerilen düzenleyici ve teknolojik önlemlerin etkisi sınırlı kalabilir (Macit, 2020).

5.3. Tedarik Zinciri Yönetimi İçin Çok Kirleticili Karar Çerçevesi

Yeşil tedarik zinciri yönetimi literatürü, karbon ayak izini geleneksel olarak temel performans göstergesi kabul eder. Bu bölümün bulguları literatüre yöntemsel ve kavramsal iki katkı getirir. Yöntemsel katkı, tedarik zincirinin çevresel performansının tek göstergeli ve karbon odaklı çerçeveler yerine çok kirleticili modellerle değerlendirilmesi gerektiğini ampirik olarak göstermesidir. Kavramsal katkı, yeşil olma niteliğinin birden fazla boyut taşıdığını ve kısmen ödünleşim içerdiğini ortaya koyar. Bu nedenle karar vericiler filo elektrifikasyonunu tek performans ekseninde değil, açık bir çok ölçütlü çerçevede değerlendirmelidir (bkz. Bölüm 2.4).

Önerinin somut uygulamasında bir filo yöneticisi, bölümde üretilen karbon azalımı, TWP artışı ve fren PM azalımı göstergeleriyle Bölüm 5.2'de tartışılan TCO ve finansman göstergesini dört ayrı ölçüt kabul eden bulanık AHP-TOPSIS modeli kurabilir. Sürdürülebilir tedarikçi ve araç seçimi literatüründe bu yaklaşımın uygulamaları bulunmaktadır (Avcı Öztürk ve Özçelik, 2014, Boutkhoum vd., 2016). Kurumsal önceliklere göre ölçüt ağırlıkları belirlendikten sonra Bölüm 4.4'teki sekiz Pareto noktası, yani iki yıl ve dört elektrifikasyon düzeyinin birleşimleri, alternatif olarak sıralanabilir. Böylece kurumun sürdürülebilirlik stratejisine en uygun elektrifikasyon oranı öznel tercihten ölçülebilir bir çok ölçütlü karara dönüşür. Ulaştırma türü ve araç teknolojisi seçimi literatüründe benzer yöntemler yaygınlaşmaktadır (Fang vd., 2024). Çerçeve, ham madde çıkarımı, batarya geri dönüşümü ve tam yaşam döngüsü etkileri gibi bu bölümün kapsamı dışında kalan ölçütlerle de genişletilebilir.

5.4. Türkiye Bulgularının Uluslararası Karşılaştırması

Başka ülkelerde gözlenen benzer dinamikler, bölümün bulgularını daha geniş bir çerçeveye yerleştirir. Kaliforniya için 2050 ufkunda kurulan bir model, binek araç filosunun neredeyse tamamı sıfır emisyonlu araçlara geçtiğinde bile dezavantajlı bölgelerde yol kenarı PM2.5 eşitsizliklerinin sürdüğünü gösterir. Bu kalıcılık fren ve lastik aşınmasından doğan egzoz dışı emisyonlarla söz konusu bölgelerde artan ağır ticari araç trafiğinden kaynaklanır (Wen vd., 2024). Aynı araştırma grubu, ağır ticari araç elektrifikasyonunun dezavantajlı topluluklara hafif araç elektrifikasyonundan daha fazla hava kalitesi yararı sağladığını fakat bu yararın egzoz dışı kaynaklarla sınırlandığını belirlemiştir. Kaliforniya'da yapılan bağımsız bir uzun dönem analizi, 2000-2019 arasında egzoz kaynaklı PM2.5'in yaklaşık yüzde 70 azaldığını, egzoz dışı kaynakların toplam trafik PM2.5'i içindeki payının ise yüzde 14'ten yüzde 50'ye çıktığını raporlar (Koolik vd., 2024). Bu çalışmalar, Türkiye için bulunan güçlü karbon kazancı ile kısmi egzoz dışı maliyetin birlikteliğiyle aynı yapıyı taşır. Düzenlemeler, filo bileşimleri ve elektrik sistemleri farklı olsa da aynı ikilemin tekrarlanması, bulguların Türkiye'ye özgü bir model ürünü olmadığını düşündürür. Çok kirleticili ödünleşim, elektrikli ağır ticari araçların yapısal bir özelliğidir.

Ekonomik boyutta da benzer bir örüntü vardır. Avrupa'ya ilişkin TCO analizleri elektrikli çekici-yarı römorkların 2030'dan önce dizele göre maliyet üstünlüğü kazanacağını öngörürken Hindistan çalışması bu üstünlüğün gelişmekte olan ekonomilerde sermayeye erişime duyarlı olduğunu gösterir (ICCT, 2023c, Rajagopal vd., 2024). Türkiye, gelişmiş Avrupa Birliği ekonomileri ile Hindistan arasında bir konumdadır. AB'ye uyum süreci düzenlemeleri yakınlaştırırken küçük ölçekli ve sermayesi sınırlı işletmelerin ağırlığı, sermayeye erişim bakımından gelişmekte olan ekonomi dinamiklerine yakındır. Bu ara konum, Türkiye'nin bütünüyle AB modelini ya da gelişmekte olan ülke modelini izlemesi yerine kendi finansman ve düzenleme stratejisini kurmasını gerektirir.

6. Sonuç ve Öneriler

Bu bölüm, Türkiye'deki ağır ticari karayolu yük taşımacılığının elektrifikasyonunu yeniden incelemiştir. İnceleme, yalnızca karbon emisyonuna bakan tek göstergeli yaklaşımdan uzaklaşarak, karbon emisyonunu lastik aşınma parçacığı (mikroplastik) salımı ve fren kaynaklı parçacıklı madde emisyonuyla birlikte, aynı senaryo modeli içinde değerlendiren çok kirleticili bir çerçeve kurmuştur. TÜİK taşıt-kilometre istatistikleri, EMEP/EEA emisyon envanteri katsayıları ve ağır elektrikli araçların uluslararası gerçek kullanım verileriyle kurulan 20.000 yinelemeli Monte Carlo modeli, 2035'e kadar tam

elektrifikasyonun ortalama depodan tekerleğe karbon emisyonlarını yüzde 66,2 azalttığını göstermiştir. Aynı senaryoda lastik aşınma parçacıkları yüzde 21,7 artarken fren aşınması kaynaklı PM emisyonları yüzde 70,1 azalır. Karbon azalımı ile lastik aşınması artışı arasındaki Pareto sınırı yaklaşık doğrusaldır fakat iki eksen farklı mekanizmalarla belirlenir. Şebekenin karbonsuzlaşması karbon kazancını büyütür, lastik aşınması maliyetini ise değiştirmez.

Analiz, elektrikli araç ile sürdürülebilir lojistiği doğrudan eşitleyen görüşün aşırı basit olduğunu ortaya koyar. Elektrikli araçların bütünüyle kirletici olduğu yönündeki karşı görüş de bulgularla desteklenmez. Sonuç, incelenen kirleticiye göre değişen katmanlı bir çevresel profildir. Lojistik operasyonlarının sürdürülebilirlik değerlendirmeleri ve ilgili politikalar, yalnızca karbon emisyonuna bakan ölçütlerden, karbon emisyonunu lastik aşınması/mikroplastik salımı ve fren kaynaklı parçacıklı madde emisyonuyla birlikte değerlendiren çok kirleticili yaklaşımlara geçmelidir. Bu doğrultuda filo elektrifikasyonu, düşük aşınmalı lastiklerin kullanımı ve batarya kütlesinin iyileştirilmesiyle birlikte yürütülmelidir. Türkiye'nin AB uyum planları, ağır ticari araçlara yönelik egzoz dışı emisyon kurallarını başlangıç aşamasından itibaren içermelidir. Elektrifikasyon yatırımlarının takvimi de şebekenin karbonsuzlaşma patikasıyla eşgüdümlenmelidir.

Gelecek araştırmalar için dört yön öne çıkar. Türkiye'de elektrikli ağır ticari araçlarla yapılacak lastik ve fren aşınması testleri, modelde kullanılan uluslararası vekil verilerin yerini alabilir. Bölüm 4.6'daki duyarlılık analizi, ilk ölçüm önceliğinin elektrikli ve dizel ağır ticari araçlar arasındaki kütle farkı olması gerektiğini göstermiştir. TWP temel katsayısı ikinci sıradadır. Yaşam döngüsü değerlendirmesinin batarya üretimi ve geri dönüşüm aşamalarını kapsayacak biçimde genişletilmesi, çok kirleticili yaklaşımı tamamlayacaktır. Filonun dolu ve boş sefer dağılımı ile mevsimselliği dikkate alan ayrıştırılmış modeller, bu bölümdeki temsili araç yaklaşımından daha kesin sonuç üretebilir. Son olarak Bölüm 5.3'te açıklanan AHP-TOPSIS modelinin Türkiye'deki filo işletmecileriyle uygulanması, göstergelerin ağırlıklarını ampirik olarak belirleyebilir. Kaliforniya ve Hindistan çalışmalarındaki benzer örüntüler, bu araştırma gündeminin Türkiye ile sınırlı olmadığını ve uluslararası önem taşıdığını göstermektedir.

Kaynakça

Avcı Öztürk, B., & Özçelik, F. (2014). Sustainable supplier selection with a fuzzy multi-criteria decision making method based on triple bottom line. *Business and Economics Research Journal, 5*(3), 129–147.

Bondorf, L., Köhler, L., Grein, T., Epple, F., Philipps, F., Aigner, M., & Schripp, T. (2023). Airborne brake wear emissions from a battery electric vehicle. *Atmosphere, 14*(3), 488. https://doi.org/10.3390/atmos14030488

Boutkhoum, O., Hanine, M., Boukhriss, H., Agouti, T., & Tikniouine, A. (2016). Multi-criteria decision support framework for sustainable implementation of effective green supply chain management practices. *SpringerPlus, 5*, 664. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2233-2

Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 38*(5), 360–387. https://doi.org/10.1108/09600030810882816

Chatterjee, P., & Stević, Ž. (2019). A two-phase fuzzy AHP-fuzzy TOPSIS model for supplier evaluation in manufacturing environment. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications, 2*(1), 72-90. https://doi.org/10.31181/oresta1901060c

Chen, X. Y., & Rodrigue, D. (2026). A comprehensive review of tire abrasion: Mechanisms, parameters, and wear rates in the era of vehicle electrification. *Applied Research, 5*, e70172. https://doi.org/10.1002/appl.70172

European Environment Agency [EEA]. (2025). *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe*. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1

European Parliament and Council of the European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1257 on type-approval of motor vehicles with respect to emissions (Euro 7)*. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1257/oj

Fang, H., Rehman, U. U., & Mahmood, T. (2024). Identification of eco-friendly transportation mode by employing complex intuitionistic fuzzy multi-criteria decision-making approach based on probability aggregation operators. *IEEE Access, 12*, 32983–32999. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3368526

Foroutan, H., Aryal, A., Craine, M., & Rakha, H. (2025). Projecting airborne tire wear particle emissions in the United States in the era of electric vehicles. *Science of the Total Environment, 967*, 178848. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178848

International Council on Clean Transportation [ICCT]. (2023a). *A comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of European heavy-duty vehicles and fuels* (O'Connell, A., Pavlenko, N., Bieker, G., & Searle, S., Haz.) [Beyaz kitap]. https://theicct.org/publication/lca-ghg-emissions-hdv-fuels-europe-feb23/

International Council on Clean Transportation [ICCT]. (2023b). *CO emissions from trucks in the European Union: An analysis of the 2020 reporting period* (Mulholland, E., Ragon, P.-L., & Rodríguez, F., Haz.) [Çalışma raporu 2023-14]. https://theicct.org/publication/total-cost-ownership-trucks-europe-nov23

International Council on Clean Transportation [ICCT]. (2023c). *A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe* (Basma, H., & Rodríguez, F., Haz.). https://theicct.org/publication/total-cost-ownership-trucks-europe-nov23/

International Council on Clean Transportation [ICCT]. (2025). *Real-world use cases for zero-emission trucks: Heavy tractor-trailers for goods transport in the European Union* (Ragon, P.-L., Haz.). https://theicct.org/publication/rw-use-cases-for-zet-heavy-tractor-trailers-for-goods-transport-in-the-eu-aug25/

Kılıç, Z. (2019). *Türkiye'de karayolu taşımacılığı için SWOT analizi ve politika önerileri* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Arel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü].

Koolik, L. H., Alvarado, Á., Budahn, A., Plummer, L., Marshall, J. D., & Apte, J. S. (2024). PM2.5 exposure disparities persist despite strict vehicle emissions controls in California. *Science Advances, 10*(37), eadn8544. https://doi.org/10.1126/sciadv.adn8544

Macit, D. (2020). Karayolu yük taşımacılığının ekonomik büyüme ve ticaret hacmi üzerindeki etkisine yönelik ampirik bir analiz. *Alanya Akademik Bakış, 4*(3), 843–860. https://doi.org/10.29023/alanyaakademik.700146

Oeko-Institut. (2025). *Real-world data analysis of battery electric trucks operating in Germany* (Le Corguillé, J., Hacker, F., & Dolingao, T., Haz.). https://www.oeko.de/en/publications/real-world-data-analysis-of-battery-electric-trucks-operating-in-germany/

Özkaya, B., & Kazançoğlu, İ. (2020). Lojistik işletmelerini yeşil tedarik zinciri yönetimine yönlendiren etkenlerin değerlendirilmesi. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi, 15*(59), 490–502. https://doi.org/10.19168/jyasar.687851

Rajagopal, D., Gopinathan, N., Khandekar, A., Karali, N., Phadke, A., & Abhyankar, N. (2024). Comparative evaluation of total cost of ownership of battery-electric and diesel trucks in India. *Transportation Research Record, 2678*(6), 235–247. https://doi.org/10.1177/03611981231195055

Saladin, S., Boies, A., & Giorio, C. (2024). Airborne tire wear particles: A critical reanalysis of the literature reveals emission factors lower than expected. *Environmental Science & Technology Letters, 11*(12), 1296–1307. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00792

Sendek-Matysiak, E., Lewicki, W., & Łosiewicz, Z. (2026). Multi-criteria assessment of vehicle powertrain options for car-sharing fleets using the analytic hierarchy process: A case study from Poland. *Sustainability, 18*(1), 429. https://doi.org/10.3390/su18010429

Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production, 16*(15), 1699–1710. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020

Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews, 9*(1), 53–80. https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı. (2024). *Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü Bilgi Formu*.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). *Türkiye Ulusal Enerji Planı*. https://www.enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2025). *Türkiye Cumhuriyeti İkinci Ulusal Katkı Beyanı (NDC 3.0)*. https://unfccc.int/NDCREG

Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK]. (2025). *2024 yılı taşıt-kilometre istatistikleri*. https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/57946

Wagner, S., Hüffer, T., Klöckner, P., Wehrhahn, M., Hofmann, T., & Reemtsma, T. (2018). Tire wear particles in the aquatic environment: A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects. *Water Research, 139*, 83–100. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.051

Wen, Y., Yu, Q., He, B. Y., Ma, J., Zhang, S., Wu, Y., & Zhu, Y. (2024). Persistent environmental injustice due to brake and tire wear emissions and heavy-duty trucks in future California zero-emission fleets. *Environmental Science & Technology, 58*(43), 19372–19384. https://doi.org/10.1021/acs.est.4c04126

Wimalasena, S., Turskis, Z., & Šliogerienė, J. (2025). A hybrid fuzzy AHP-TOPSIS approach for green supplier selection: A case study in Sri Lanka. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 33*(4), 415-427. https://doi.org/10.3846/jeelm.2025.25194

World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development [WRI/WBCSD]. (2011). *Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard*. https://www.wri.org/research/greenhouse-gas-protocol-corporate-value-chain-scope-3-accounting-and-reporting-standard

Zhang, M., Unrau, H.-J., Gießler, M., & Gauterin, F. (2025). Tire tread wear characteristics: Insights from indoor experiments and analytical modeling. *Tribology International, 210*, 110752. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110752

Zhu, Q., & Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *Journal of Operations Management, 22*(3), 265–289. https://doi.org/10.1016/j.jom.2004.01.005