

Lojistik Sektöründe Emisyon, Karbonsuzlaşma Stratejisi ve İklim Değişikliği

Melisa Bolat¹

Ahmet Koluman²

Fatih Kaplan³

Özet

Bu çalışmada lojistik sektörünün iklim değişikliği ile mücadelede üstlenebileceği roller kapsamlı şekilde ele alınmaktadır. Yapılan incelemede, mevcut literatürün üç ana konu etrafında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bunlardan ilki, lojistik faaliyetlerinin iklim değişikliğine olan etkisidir. Kara yolu taşımacılığından kaynaklanan sera gazı emisyonları, fosil yakıt tüketimi ve altyapı kaynaklı çevresel etkiler bu başlık altında ele alınmaktadır. İkinci konu, sektördeki karbonsuzlaşma stratejileridir. Elektrikli araçların kullanımı, intermodal taşımacılığın yaygınlaştırılması ve dijitalleşme yoluyla verimliliğin artırılması gibi önlemler bu stratejilerin başında gelmektedir. Üçüncü olarak ise lojistik faaliyetlerinde yenilenebilir enerji kullanımının teşviki önem kazanmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisiyle çalışan depolama ve dağıtım merkezleri, sektörün dönüşümüne katkı sağlayabilecek yenilikçi uygulamalardandır. Yapılan literatür değerlendirmesinde iklim değişikliği bağlamında lojistik sektörünün yalnızca bir emisyon kaynağı olarak değil, aynı zamanda çözümün bir parçası olarak değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Sektörün teknolojik altyapısının güçlendirilmesi, çevreci uygulamaların teşvik edilmesi ve sürdürülebilirlik temelli politikaların kurumsallaşması, hem çevresel hem de ekonomik açıdan kazanımlar sunacaktır.

- 1 Araş. Gör. Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, Hasan Kalyoncu Üniversitesi melisa.bolat@hku.edu.tr ORCID: 0000-0003-0552-253X
- 2 Öğr. Gör. Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, Tarsus Üniversitesi, ahmetkoluman@tarsus.edu.tr ORCID: 0000-0002-6157-3051
- 3 Prof. Dr. Uluslararası Ticaret ve Lojistik Bölümü, Tarsus Üniversitesi, fkaplan@tarsus.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7417-1126

1. GİRİŞ

İklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltma çabaları, günümüzde yalnızca çevre politikaları ve enerji dönüşümleri ile sınırlı kalmamakta, giderek artan bir biçimde lojistik sektörünün kapasite ve kabiliyetlerine de bağımlı hale gelmektedir. Küresel tedarik zincirlerinin sürdürülebilirliği, karbon ayak izinin azaltılması ve yeşil taşımacılık uygulamaları gibi konular, lojistik sektörünü iklim değişikliği ile mücadelenin temel aktörlerinden biri haline getirmiştir. Lojistik sektörünün iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir konumda olmasına rağmen, bu süreçlere katkısının hem politika yapıcılar hem de akademik çevreler tarafından yeterince değerlendirilmediği düşünülmektedir. Bu durum, “Lojistik sektörü iklim değişikliği ile mücadelede etkin bir rol üstlenebilir mi?” sorusunu gündeme getirmekte ve bu alandaki çalışmalara olan ihtiyacı artırmaktadır.

İklim değişikliği konusu, 1970’li yıllarda Birleşmiş Milletler’in (BM) gündemine dahil edilmiş ve 1980’li yıllarda Avrupa Birliği (AB) düzeyinde stratejik bir önem kazanmıştır (IPCC, 2007). Bu süreçte, iklim değişikliği ile mücadele amacıyla çeşitli uluslararası anlaşmalar ve protokoller geliştirilmiş; Stockholm Deklarasyonu, Montréal Protokolü, Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması gibi önemli belgeler bu çerçevede imzalanmıştır (Balog ve Mizik, 2021). 2000 yılında BM öncülüğünde kabul edilen Bin Yıllık Kalkınma Hedefleri (Millennium Development Goals - MDGs), küresel ölçekte kalkınma politikalarına yön vermeyi amaçlamış ve bu hedefler arasında çevresel sürdürülebilirlik özel bir yer edinmiştir. Söz konusu hedef, doğal kaynakların verimli ve sürdürülebilir biçimde kullanılmasını, çevre kirliliğinin azaltılmasını ve iklim değişikliği gibi çevresel krizlere uzun vadeli çözümler geliştirilmesini amaçlamaktadır. Nitekim dünya ekonomisinde gözlemlenen büyüme eğilimleri, üretim ve tüketim hacmindeki artış, sanayileşmenin hız kazanması ve ulaşım talebinin genişlemesi gibi dinamikler; iklim değişikliği, çevre kirliliği ve ekosistem tahribatı gibi çevresel sorunları da derinleştirmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilir kalkınma yaklaşımı yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal politikalarla da entegre biçimde ele alınması gereken çok boyutlu bir zorunluluk haline gelmiştir.

Küresel ekonomik sistemin işleyişinde stratejik bir konuma sahip olan lojistik sektörü, çevresel sürdürülebilirlik bağlamında önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Enerji yoğun bir yapıya sahip olan ulaşım faaliyetleri, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık dörtte birini oluşturmaktadır. Karayolu taşımacılığı bu emisyonların en büyük payını üstlenirken havayolu, denizyolu ve demiryolu taşımacılığı da çevresel etkileri itibarıyla kayda değer ölçüde katkı sağlamaktadır. Lojistik sektörünün mevcut çevresel

ayak izi, iklim değişikliğiyle mücadelede bu sektörün yalnızca bir problem kaynağı olarak değil, aynı zamanda çözüm sürecinin aktif bir bileşeni olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Dolayısıyla, lojistik sektöründe çevre dostu stratejilerin benimsenmesi, sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesi açısından kritik bir eştir. Bu bağlamda sektörde enerji verimliliği odaklı dönüşümler, alternatif yakıt kullanımı, düşük emisyonlu taşıma teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve yeşil lojistik uygulamalarının entegrasyonu, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesinde kilit öneme sahiptir.

Son yıllarda salgınlar, savaşlar ve siyasi-ekonomik krizler gibi çeşitli belirsizliklere rağmen küresel ekonomik büyümenin uzun vadede istikrarlı bir biçimde sürmesi beklenmektedir (ITE, 2023: 29). Bu çerçevede, ekonomik büyüme ile doğru orantılı olarak ulaşım talebinde de artış öngörülmektedir. Ekonomik büyüme ulaştırma faaliyetlerini teşvik ederken ulaşım altyapısı da üretimde uzmanlaşmayı kolaylaştırmakta, ticareti desteklemekte ve genel olarak kalkınma süreçlerine katkı sunmaktadır. Ancak bu büyümenin çevresel etkilerle doğrudan bağlantılı olduğu gerçeği göz ardı edilmemelidir. Bununla birlikte, Birleşmiş Milletler Ekonomik ve Sosyal İşler Departmanı'nın (UN DESA) projeksiyonlarına göre, 2025 yılında 8,2 milyar olan dünya nüfusunun 2060 yılına kadar 10 milyara ulaşması beklenmektedir (UN DESA, 2025). Bu demografik artış, daha fazla seyahat ve taşımacılık ihtiyacını beraberinde getirmekte dolayısıyla ulaşım faaliyetlerinin önümüzdeki on yıllarda ciddi bir ivme kazanacağı öngörülmektedir (ITE, 2023: 15). Ancak ulaşım sektöründeki bu büyüme, önemli çevresel dışsalırları da beraberinde getirmektedir. Özellikle karbondioksit (CO₂) emisyonlarındaki artış, atmosferdeki sera gazı birikimini hızlandırmakta ve küresel ısınma ile iklim değişikliği sürecini daha karmaşık ve yönetilmesi güç bir hale getirmektedir. Enerji tüketiminde büyük bir paya sahip olan ulaşım sektörü, bu bağlamda küresel sera gazı emisyonlarının da başlıca kaynakları arasında yer almaktadır. Bu nedenle, ulaşımın çevresel etkilerinin azaltılması, iklim politikalarının başarısı için vazgeçilmez bir ön koşul haline gelmiştir. Dolayısıyla, ulaşımın çevresel etkileri hem politika yapıcılar hem de akademik çevreler tarafından daha yoğun biçimde analiz edilmelidir.

Bu çalışma, lojistik sektörünün iklim değişikliği bağlamındaki durumunu ve dönüşüm potansiyelini değerlendirmekte ve sektördeki çevresel sürdürülebilirlik uygulamalarına literatür temelli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır. Çalışma, teorik değerlendirmelere dayanmakta olup uygulamalı veri analizlerini kapsamamaktadır. Bu bağlamda çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, çalışmanın giriş bölümüdür. İkinci bölümde lojistik faaliyetlerinin iklim değişikliğine olan etkisine yer

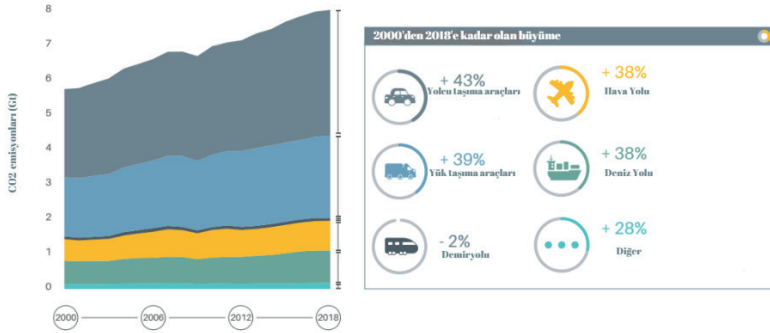
verilmiştir. Üçüncü bölümde, sektördeki karbonsuzlaşma stratejileri ele alınmıştır. Dördüncü bölümde lojistik faaliyetlerde yenilenebilir enerji kullanımı detaylandırılmıştır. Beşinci bölümde çalışma genel hatları ile değerlendirilmiş ve sonuçlandırılmıştır.

2. LOJİSTİK FAALİYETLERİNİN İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE ETKİSİ

Kalkınmanın temel bileşenlerinden biri olan ulaşım faaliyetleri, küresel ekonomideki büyüme eğilimleriyle paralel bir gelişim sergilemektedir. Küresel Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYİH) ile yük ve yolcu taşımacılığına yönelik talep arasında yüksek bir korelasyonun bulunduğu çeşitli ampirik çalışmalarda ortaya konulmuştur. Bu durum, ulaştırma altyapılarının ekonomik kalkınma süreçlerinde yalnızca destekleyici değil, aynı zamanda belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir. Bu çerçevede lojistik sektörü, iklim değişikliği ile ilişkili çevresel süreçlerde hem etkileyen hem de etkilenen bir pozisyonda yer almaktadır. Lojistik operasyonların gerçekleştirilmesi sırasında açığa çıkan sera gazı (GHG) emisyonları, iklim değişikliğini tetikleyen başlıca unsurlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan, lojistik faaliyetler de doğrudan iklim değişikliğinden etkilenmektedir. Ani hava olayları, kuraklık, deniz seviyesindeki yükselme gibi çevresel değişkenler ulaştırma altyapısını, tedarik zinciri sürekliliğini ve operasyonel verimliliği tehdit etmektedir. Dolayısıyla, lojistik sektörü hem iklim değişikliğine neden olan yapısal süreçleri azaltacak hem de bu değişime uyum sağlayacak stratejiler geliştirmek zorundadır.

Ulaşım faaliyetlerinin çevresel etkilerinin en temel kaynağı, enerji üretiminde fosil yakıtlara duyulan yüksek bağımlılıktır. Günümüzde ulaşım sektörünün enerji ihtiyacının yaklaşık 95%'i, başta dizel ve benzin olmak üzere, petrole dayalı fosil yakıtlarla karşılanmaktadır (IRENA, 2023). Bu oran, ulaşım sektörünü hem küresel karbon ayak izinin büyümesinde hem de enerji dönüşüm politikalarının merkezinde önemli bir aktör haline getirmektedir. Ulaşım, toplam petrol tüketiminin 51%'inden sorumlu olup bu yönüyle sera gazı emisyonlarında da ciddi bir paya sahiptir (IRENA, 2018: 37). Bu yüksek oran, sektörel dönüşüm ihtiyacının aciliyetini ortaya koymaktadır. Özellikle Avrupa Birliği (AB) özelinde yapılan analizler, 2013 ile 2023 yılları arasında ekonomik faaliyetlerin çoğunun sera gazı emisyonlarını azaltmayı başardığını ancak ulaşım ve depolama sektörlerinde emisyonların yaklaşık 14% oranında arttığını göstermektedir (Eurostat, 2024). Ulaşım sektörü, 2010 yılı itibarıyla doğrudan sera gazı emisyonlarından yaklaşık 7,0 gigaton (Gt) CO₂ eşdeğeri üretmiş ve bu miktar, toplam enerjiye dayalı emisyonların yaklaşık 23%'üne karşılık gelmiştir (IPCC, 2014:

603). Bu veriler, ulaştırma faaliyetlerinin iklim sistemine yaptığı baskının büyüklüğünü çarpıcı biçimde ortaya koymaktadır. Bu emisyonların önemli bir kısmı karayolu taşımacılığından kaynaklanmaktadır. 2010 yılı itibarıyla kara taşımacılığı, ulaşımdan kaynaklanan toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık 74%'ünü oluşturmuştur. Küresel ölçekte ulaştırma kaynaklı CO₂ emisyonları, 2000-2016 döneminde %29'luk bir artışla 5,8 gigatondan 7,5 gigatona yükselmiştir (SLOCAT, 2018: 34). Ayrıca, 2018 yılında ulaşım sektörü, dünya genelindeki toplam nihai enerji tüketiminin 29%'undan tek başına sorumludur (IRENA, 2021: 6). Bu çerçevede, ulaşım sektörü yalnızca yüksek enerji talebiyle değil, aynı zamanda emisyon üretimiyle de iklim değişikliği politikalarının merkezinde yer almaktadır. şekil 1'de ulaşım sektörünün 2000-2018 dönemine ait taşımacılık türlerine göre CO₂ emisyonları gösterilmektedir.



şekil 1: Taşımacılık türlerine göre CO₂ emisyonları

Kaynak: SLOCAT, 2021; 30.

2018 yılında, 2000 yılına kıyasla karayolu yolcu taşımacılığında CO₂ emisyonları 43%, karayolu yük taşımacılığında 39%, hava ve denizyolu taşımacılığında 38% ve boru hattı taşımacılığında 28% artış göstermiştir. Demiryolu taşımacılığında ise CO₂ emisyonları 2% azalmıştır. 2019'da ulaşım sektörü 8,2 gigaton CO₂ emisyonuna ulaşmıştır ve toplam CO₂ emisyonlarının 22%'sini oluşturmaktadır. 2020'de, çoğunlukla COVID-19 pandemisinin etkileri nedeniyle, ulaşım kaynaklı CO₂ emisyonları 13% azalarak 7,1 gigatona düşmüş ancak 2021'de 7,6 gigatona yükselmiştir (SLOCAT, 2023; 12). Ulaşım kaynaklı CO₂ emisyonlarının 2050 yılına kadar 16-50% arasında artabileceği öngörülmektedir (SLOCAT, 2023; 15). Eđer karbon azalımı ile ilgili politikalar geliştirilip uygulanmaz ise ulaşım

sektörünün toplam CO₂ emisyonlarındaki payı ve iklim değişikliği ile ilişkili sorumluluğunun büyük ölçüde artış göstermesi beklenmektedir.

Lojistik faaliyetlerinin iklim değişikliği üzerinde karbondioksit emisyonu dışında etkileri de bulunmaktadır. CO₂, salınan en yaygın sera gazı olmasına rağmen havayı kirleten diğer gazların da azaltılması önem arz etmektedir. Örneğin, karayolu taşıma araçları küresel CO₂ emisyonlarının büyük bir kısmını oluştururken bu araçlardan salınan NO_x (nitrik oksit), VOC (uçucu organik birleşik) ve CO (karbon monoksit) emisyonları, troposferdeki O₃ (ozon) seviyelerinin artmasına neden olmaktadır (Mertens vd., 2024; 12080). O₃, güçlü bir sera gazı olmasının yanında siyah karbon ve organik karbon gibi maddeler de bu sektörden kaynaklanan radyatif zorlamayı (RF) etkileyebilir (IPCC, 2007: 331). Karayolu taşımacılığında kaynaklanan CO₂ dışı emisyonlar (CH₄ ve N₂O), Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) Sera Gazı Envanteri verilerinde yer almaktadır. Ulaştırma sektöründen kaynaklanan emisyonların CH₄, N₂O ve F-gazları (CFC-12, HFC-134a, HCFC-22 klorodiflorometan) oranları toplam ulaşım CO₂ emisyonlarının yaklaşık 3%'üne denk gelmektedir (U.S. EPA, 2024). Bu oran, ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ dışı emisyonların, CO₂ emisyonlarına kıyasla oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Karayolu taşımacılığında çeşitli emisyonlar denizyolu taşımacılığında da bulunmaktadır. Denizyolu taşımacılığının kendine özgü bir özelliği, düşük seviyeli bulutların (gemi izleri) gözlemlenen oluşumudur, bu durum da negatif (soğuma) bir RF etkisi yaratmaktadır (IPCC, 2007: 331). Havayolu taşımacılığın CO₂ zorlamasından daha büyük bir RF etkisi vardır. Havayolu taşımacılığında kaynaklanan emisyonları, radyatif zorlamayı pozitif (ısınma) ve negatif (soğuma) şekilde etkilemektedir. 2011 yılında havacılığın etkili radyatif zorlamanın yaklaşık 3,5%'inden sorumlu olduğu tahmin edilmiştir (Lee vd., 2021; 2). Demiryolu taşımacılığı, genellikle karayolu taşımacılığına kıyasla daha düşük CO₂ emisyonlarına sahip olsa da diğer sera gazları ve hava kirletici maddelerinin emisyonlarını (CH₄, NO_x, CO, VOC, BC (siyah karbon), SO₂ (kükürt dioksit)) da üretmektedir. Demiryolu taşımacılığında dizel motorlar kullanılan sistemlerde bu emisyonlar daha belirgin olmakla birlikte elektrikli demiryolu taşımacılığı ise bu tür emisyonları önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Lojistik faaliyetleri söz konusu bu gazları üreten en büyük sektörlerden biridir. Lojistik operasyonlarında ortaya çıkan CO₂ ve CO₂ dışı emisyonlar iklimi olumsuz yönde etkilemekte, küresel ısınmaya, şiddetli hava olaylarına, deniz seviyelerinde değişimlere, kuraklığa vb. olaylara sebebiyet vermektedir. Örneğin Amerikan Ulusal Araştırma Konseyi (NRC) 2008 yılında yayınlanan raporunda ABD ulaştırma altyapısının değerlendirmesini

yaparak iklim değişikliğinin olası beş etkisinin olabileceğini öne sürmüştür. Bunlar (NRC, 2008; 3);

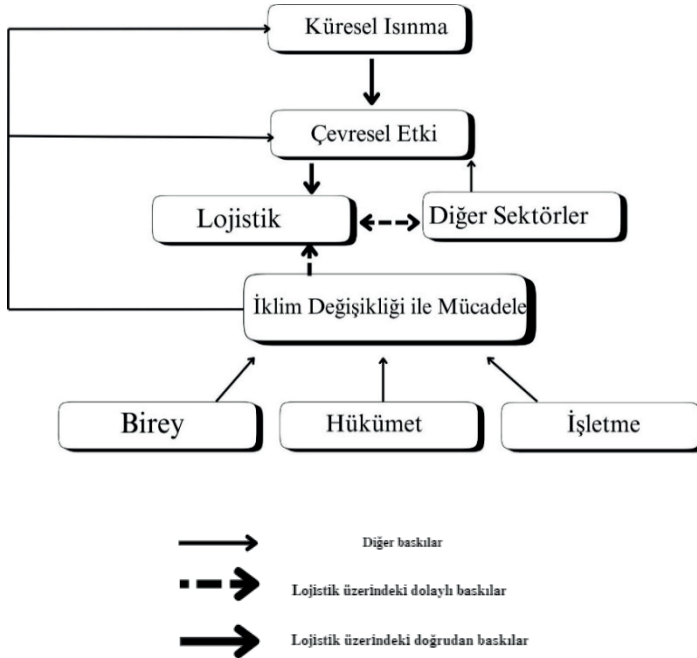
- Çok sıcak günlerin ve sıcak hava dalgalarının artması,
- Arktik sıcaklıkların artması,
- Deniz seviyelerinin yükselmesi,
- Yoğun yağış olaylarının artması,
- Kasırga şiddetinin artmasıdır.

İklim değişikliği, lojistik faaliyetlerinin verimliliğini, maliyetleri, operasyonel süreçleri ve sürdürülebilirlik hedeflerini doğrudan etkileyebilmektedir. Koetse ve Rietveld (2008) çalışmalarında, iklim değişikliğinin farklı yük taşıma türlerinin rekabetçi konumunu değiştireceğini ve denizyolu ile yapılan yük taşımacılığı ve yük taşımacılığı desenlerinin (yüklerin nasıl, nereden nereye, neyle ve ne sıklıkla taşındığı) önemli ölçüde etkilenebileceğini belirtmişlerdir (Koetse ve Rietveld, 2008; 208).

Lojistik faaliyetlerin iklim değişikliğinden etkilenmesinin üç nedeni bulunmaktadır. İlk olarak lojistik faaliyetler, lojistiğin malların uzak yerler arasında taşınması temel rolünü yerine getirmektedir. İklim değişikliği, hava olaylarının daha şiddetli ve düzensiz hale gelmesine neden olabilmektedir. Örneğin artan sıcaklıklar, şiddetli yağışlar, fırtınalar, sel ve kuraklıklar, lojistik süreçlerini, taşımacılık rotalarını, teslimat sürelerini olumsuz etkileyebilir. İkinci olarak lojistik, hem depolama, aktarma veya malzeme taşıma gibi fonksiyonları yerine getiren tesisler arasında içsel bir bağa sahiptir hem de lojistiğin desteklediği geniş ekonomik, sosyal, tıbbi, askeri ve diğer alanlarla da dışsal olarak bağlantılıdır. İklim değişikliği, taşıma altyapısını da tehdit edebilir. Özellikle kıyı bölgelerinde deniz seviyesinin yükselmesi, limanlar ve kara yolları gibi altyapıların zarar görmesine yol açabilir. Üçüncü olarak lojistikte zamanlama oldukça kritiktir. Just-in-Time (JIT) anlayışı bağlamında envanter minimum seviyelerde tutulmaktadır. Aşırı hava koşullarına karşı tampon görevi görebilecek envanter eksikliği yaşanması mümkündür. Just-in-time anlayışının gevşetilmesi, yüklerin daha iyi bir şekilde konsolide edilmesini sağlayabilir. İklim değişikliğinin lojistik sistemleri üzerindeki söz konusu etkilerine karşı lojistiğin uyum sağlaması gerekmektedir.

McKinnon ve Kreie (2010), lojistik faaliyetlerin ve tedarik zincirlerinin iklim değişikliğinin doğrudan ve dolaylı etkilerine uyum sağlamasına odaklanan yeni bir lojistik dalı olarak uyumlu (adaptif) lojistiği ele almıştır. Uyumlu (adaptif) lojistik, lojistik sistemlerinin iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamak için yapması gereken değişiklikleri tanımlamak amacıyla

kullanılan bir terimdir (McKinnon ve Kreie, 2010; 2). Uyumlu lojistik, lojistiğin çevresel değişikliğe nasıl yanıt vermesi gerektiğini ele almaktadır. Söz konusu yanıt, lojistik sistemlerinin olumsuz iklim etkilerini en aza indirmek için değiştirilmesi gereken doğrudan baskıları ve iklim değişikliğinin lojistik hizmetlere olan talebi değiştirdiğinde sistemlerin buna göre yeniden yapılandırılması gereken dolaylı baskıları içermektedir. İklim değişikliğine uyum sağlamak için lojistiğe uygulanan doğrudan ve dolaylı baskılar Şekil 2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2. İklim Değişikliğine Uyum Sağlamak İçin Lojistik Üzerindeki Doğrudan ve Dolaylı Baskılar

Kaynak: McKinnon ve Kreie, 2010; 2.

Lojistik sistemleri ve tedarik zincirleri sürekli bir dönüşüm içindedir ve iklim değişikliği bu süreçte önemli bir belirleyici haline gelmektedir. Uyumlu lojistik, iklim değişikliğinin etkilerine karşı sistemlerin esneklik kazanmasını ve uyum sağlamasını ifade etmektedir. Bu çerçevede iki temel uyum türü öne çıkmaktadır. Birinci uyum türü, küresel ısınmanın etkilerine karşı mevcut lojistik altyapı dayanıklılığının artırılmasını kapsamaktadır. Altyapılar, şiddetli hava olayları nedeniyle geçici kesintilere, kısa vadeli hasarlara ve

uzun vadeli bozulmalara maruz kalabilir. Bu doğrultuda, lojistik tesislerin ve depoların iklim dostu hale getirilmesi veya daha güvenli bölgelere taşınması gerekliliği gündeme gelmektedir. İkinci uyum türü ise, iklim değişikliği nedeniyle değişen tarımsal üretim alanları ve insan yerleşimlerinin lojistik faaliyetlerle yeniden uyumlaştırılmasını içermektedir. Sıcaklık ve yağış rejimlerindeki değişiklikler, tarımsal üretim coğrafyasını önemli ölçüde yeniden şekillendirecektir. Bu durum, lojistik ve tedarik zinciri ağlarının da bu yeni üretim ve tüketim merkezlerine göre yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır.

3. LOJİSTİK SEKTÖRÜNDE KARBONSUZLAŞMA

Lojistik faaliyetlerin karbonsuzlaştırılmasının önündeki temel engel, sektörün büyük ölçüde fosil yakıtlara bağımlı olmasıdır. Bu bağımlılık, sektörün enerji dönüşüm süreçlerine entegre olmasını güçleştirmektedir. Fosil yakıt bağımlılığının iki yönlü bir yapısı bulunmaktadır. Bir yanda, enerjilerinin önemli bir kısmını giderek karbonsuzlaşan elektrik şebekelerinden alan lojistik binalar ve terminaller yer almaktadır. Bu altyapılar, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda dönüşüm süreçlerini daha kolay gerçekleştirebilmektedir. Söz konusu durum, karbonsuzlaşma bağlamında sabit altyapıların daha avantajlı bir pozisyonda olduğunu göstermektedir. Öte yandan, deniz ve hava taşımacılığı gibi hareketli operasyonlar ise karbonsuzlaşma açısından daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Özellikle uzun menzilli ve büyük ölçekli taşımacılık faaliyetlerinde, teknik ve ekonomik kısıtlar karbonsuzlaşma süreçlerini yavaşlatmaktadır. Bu alanlarda yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, karayolu taşımacılığına kıyasla hem daha yavaş ilerlemekte hem de daha yüksek maliyet unsurlarını içermektedir (Culliane ve Yang, 2022; Barke vd., 2022). Bunun temel nedenlerinden biri, düşük karbonlu deniz yakıtlarının hâlihazırda kullanılan fosil yakıtlardan daha pahalı olmasıdır. Mevcut piyasa koşulları, fosil dışı yakıtların yaygınlaşmasını sınırlayan önemli bir faktördür. Ek olarak, sıfır emisyonlu yük taşıma araçlarının düşük arzı, yük trafiğinde geleceğe dönük yüksek büyüme beklentileri, mevcut taşıma filosunun yaşlanması ve yeni teknolojilerle uyumsuzluğu, sektördeki karbonsuzlaşma sürecini daha da karmaşık hale getirmektedir. Bu zorluklar, özellikle gelişmekte olan ve düşük gelirli ülkelerde daha da belirginleşmektedir. Yeni nesil araç filolarının edinilmesi için gerekli finansal kaynakların yetersizliği, bu ülkelerdeki karbonsuzlaşma çabalarını sınırlandırmaktadır. Dolayısıyla, lojistikte karbonsuzlaşma küresel ölçekte homojen ilerlememektedir. Tüm bu zorluklara rağmen, karbonsuzlaşma için uygulanabilir yöntemlerin geliştirildiği ve bu yöntemlerin çeşitli kategoriler altında sınıflandırıldığı

bilinmektedir. McKinnon (2019), lojistik sektöründe karbonsuzlaşmaya yönelik mevcut uygulamaları beş genel başlık altında toplamaktadır. Bunlar;

1. Yük taşımacılığı talebinin artışını, tedarik zincirlerini yeniden yapılandırarak, araçları daha verimli yönlendirerek ve bazı üretim ve dağıtım operasyonlarını 'yerel hale getirerek' sınırlamak.

2. Demiryolu ve su taşımacılığı ağlarından karayolu ağına kaymış yük taşımacılığını tersine çevirerek daha düşük karbonlu taşıma modlarının daha fazla kullanılmasını sağlamak.

3. Yük taşıma araçlarının verimli kullanımını artırarak her bir yük taşıma birimi başına CO₂ emisyonlarını azaltmak.

4. Kamyonlar, trenler, gemiler ve uçaklar tarafından kilometre başına kullanılan enerjiyi yakıt tasarrufu sağlayan teknolojiler ile azaltarak enerji verimliliğini artırmak.

5. Enerji kullanımını azaltmanın yanı sıra, yük taşımacılığı sektörü enerjisini fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına (doğal gaz, biyometan veya biyoyakıtlar, düşük sera gazı kaynaklarından üretilen elektrik veya hidrojen) kaydırmak.

Lojistik sektörünün karbonsuzlaştırılmasında temel öncelik, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve ardından yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin sağlanmasıdır. Bu dönüşüm, yalnızca teknolojik bir değişimi değil, aynı zamanda sektörel politika ve yatırım kararlarının da yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır. Sürdürülebilir bir gelecek hedefi doğrultusunda, lojistik faaliyetlerde kullanılan enerji kaynaklarının 2050 yılına kadar 2020 yılı seviyelerinin altına çekilmesi gerekmektedir (SLOCAT, 2023: 17). Paris Anlaşması kapsamında belirlenen hedeflere ulaşılabilmesi için, yolcu ve yük taşımacılığı kaynaklı CO₂ emisyonlarının 45% ila 51% oranında azaltılması öngörülmektedir. Bu hedefin gerçekleştirilmesi, yıllık ortalama enerji verimliliği artışının 2,0% ile 2,4% arasında gerçekleşmesini zorunlu kılmaktadır (SLOCAT, 2023: 17). Dolayısıyla, sadece yakıt türlerinin dönüşümü değil, aynı zamanda taşıma sistemlerinin enerji verimliliği açısından yeniden yapılandırılması gerekmektedir. Bu kapsamda düşük karbonlu bir ulaşım altyapısının oluşturulabilmesi için, daha az enerji tüketen ve daha çevre dostu taşıma modlarına geçiş büyük önem taşımaktadır. Elektrikli araçlar ve toplu taşıma sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışmaları sayesinde bu dönüşümde kilit bir rol oynamaktadır. Özellikle karayolu taşımacılığında içten yanmalı motorlu araçlardan elektrikli araçlara geçiş, karbon emisyonlarının azaltılmasında çarpan etkisi yaratacaktır. 2040'lı yılların başında elektriğin ulaştırma sektöründeki baskın enerji kaynağı haline

gelmesi beklenmektedir (SLOCAT, 2023: 17). Ancak bu dönüşüm, yalnızca gelişmiş ülkelerde değil; gelişmekte olan ülkelerde de adil ve kapsayıcı biçimde planlanmalı, teknolojik kapasite gelişimiyle desteklenmelidir. Bu doğrultuda, uluslararası iş birliği, finansal destek mekanizmaları ve politik teşvikler, karbonsuz ulaşım sistemlerinin hayata geçirilmesinde tamamlayıcı unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

Ulaştırma sektöründe karbonsuzlaşma sürecinin temel taşıyıcılarından biri olan elektrifikasyon, enerji dönüşüm stratejileri içinde ön plana çıkmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) Net Zero Emission (NZE) Senaryosu'na göre, ulaşımda elektrifikasyon eğilimi, diğer sektörlerle kıyaslandığında daha hızlı bir gelişim göstermektedir. Bu durum, sektörün karbonsuzlaştırılmasında elektrığe dayalı çözümlerin merkezi bir rol üstlenmeye başladığını ortaya koymaktadır. Mevcut durumda ulaştırma sektöründeki enerji tüketiminin yaklaşık 90%'ı petrole dayalı iken bu oranın 2030 yılına kadar 80%'e gerilemesi beklenmektedir. Aynı dönemde elektrik tüketiminin sektördeki payının 1%'den 8%'e yükselmesi öngörülmektedir (IEA, 2024: 124). Bu değişimin büyük ölçüde, içten yanmalı motorlu araçlardan (ICE) elektrikli araçlara (EV) geçişten kaynaklandığı vurgulanmaktadır. Elektrik talebindeki bu hızlı artış, sektördeki enerji dönüşümünün yönünü açık biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle binek araç segmentinde elektrifikasyon dikkat çekici bir ivme kazanmıştır. 2022 yılına kadar geçen on yıllık süreçte, küresel elektrikli otomobil satışları yıllık ortalama 50%'lik bir büyüme oranı sergilemiştir. NZE Senaryosu kapsamında, 2023–2030 döneminde bu artışın yıllık ortalama 25% seviyelerinde devam edeceği öngörülmektedir (IEA, 2024: 125). Elektrikli araçların toplam otomobil satışlarındaki payının ise 2030 yılı itibarıyla yaklaşık 65%'e ulaşması beklenmektedir. Bu artış trendi, sektör genelinde içten yanmalı motorların yerini elektrikli tahrik sistemlerine bırakmakta olduğunu göstermektedir. Ağır taşıma segmentinde de benzer bir dönüşüm süreci yaşanmaktadır. NZE Senaryosu, bu segmentte elektrifikasyonun daha hızlı ivme kazanmasının gerekliliğine dikkat çekmektedir. Elektrikli otobüslerin toplam satışlardaki payı 2022 yılında 4% iken, 2030 itibarıyla 50%'nin üzerine çıkması beklenmektedir. Elektrikli ağır kamyonların payının ise aynı dönemde 1%'den 33%'e yükselmesi öngörülmektedir (IEA, 2024: 125). Bu veriler, karayolu taşımacılığının karbonsuzlaşma sürecinde ağır taşıma araçlarının da önemli bir rol oynayacağına işaret etmektedir. Ancak bu dönüşümün gerçekleşmesi, sadece teknoloji gelişimiyle değil; aynı zamanda altyapı yatırımları, finansal teşvikler ve düzenleyici politikalarla desteklenmelidir. Elektrifikasyonun başarısı, sektörün tüm alt bileşenleriyle birlikte dönüşüm sürecine entegre edilmesine bağlıdır.

Ulaştırma sektörünün karbonsuzlaştırılmasında yalnızca enerji kaynaklarının değiştirilmesi değil, aynı zamanda taşıma modlarının verimliliğinin artırılması da kritik önem arz etmektedir. Her bir taşıma modunun yapısal özelliklerine göre enerji verimliliğini artırma potansiyeli, düşük karbonlu geçiş sürecinde stratejik avantajlar sunmaktadır. Demiryolu taşımacılığı, hâlihazırda enerji verimliliği en yüksek taşıma modlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Mevcut verimliliğine rağmen, sistem düzeyinde hâlâ çeşitli iyileştirme olanakları mevcuttur. Aerodinamik sürüklenmenin azaltılması, tren ağırlığının düşürülmesi, rejeneratif frenleme teknolojisinin kullanımı ve yüksek verimli itiş sistemlerinin entegrasyonu sayesinde demiryolu taşımacılığının enerji tüketiminde önemli düşüşler sağlanabilir (FRA, 2014). Bu iyileştirmeler, özellikle elektrikli demiryolu hatlarında fosil bağımlılığını azaltmaya yönelik etkili bir araç olarak değerlendirilmektedir. Benzer şekilde denizyolu taşımacılığı da yüksek taşıma kapasitesi ve düşük birim enerji tüketimi nedeniyle verimli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu modda da daha ileri düzey verimlilik artışlarına ulaşmak mümkündür. Özellikle yeni nesil gemi tasarımları, yelken destekli hibrit teknolojiler ve düşük sürtünmeli boya sistemleri gibi yenilikçi uygulamalar, denizyolu taşımacılığının karbon ayak izini azaltma potansiyeli taşımaktadır.

Havayolu taşımacılığı ise enerji yoğunluğu en yüksek modlardan biri olmakla birlikte, son yıllarda dikkate değer verimlilik kazanımları elde edilmiştir. Bugün üretilen yolcu uçakları, 40 yıl önceki benzer modellere kıyasla 70% daha yüksek yakıt verimliliğine sahiptir. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), 2050 yılına kadar bu alanda 40% ila 50% arasında ek verimlilik artışı hedeflendiğini bildirmektedir (ICAO, 2022: 27). Ancak bu kazanımlar, artan hava trafiği talebi nedeniyle toplam emisyonları dengelemede yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, yakıt çeşitlendirmesi havacılıkta hayati önem taşımaktadır. Bu bağlamda, sürdürülebilir hammaddelerden elde edilen biyoyakıtlar, sektörde umut vadeden bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Biyometan ve hidrojenize edilmiş bitkisel yağ (HVO) gibi alternatif biyoyakıtlar, fosil yakıtlara kıyasla sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Biyoyakıtlar, özellikle uçak ve deniz taşımacılığı gibi elektrifikasyonun sınırlı kaldığı alanlarda kritik bir rol oynayabilir. Slocat'ın Net Zero Emission (NZE) senaryosuna göre, biyoyakıtların ulaştırma yakıtlarındaki payının 2030 yılına kadar yaklaşık 15%'e ulaşması beklenmektedir (SLOCAT, 2023: 17). Dolayısıyla, taşımacılıkta yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yaygın ve sistematik biçimde entegrasyonu, sektörel dönüşümün hızlanmasında belirleyici olacaktır. Bu süreç yalnızca teknolojik inovasyonla değil, aynı

zamanda finansal teşvikler, altyapı yatırımları ve regülasyon politikalarıyla da desteklenmelidir.

4. LOJİSTİK SEKTÖRÜNDE YENİLENEBİLİR ENERJİ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyogazın kullanımı, fosil yakıt tüketiminin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Biyogazın araç yakıtı olarak kullanılması durumunda, fosil yakıtlara kıyasla sera gazı (GHG) emisyonlarında 50%'den fazla azalma sağlandığı varsayılmaktadır (IRENA, 2018: 41). Ayrıca, biyogaz metan emisyonlarını engelleyerek de sera gazı salımlarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bir diğer yenilenebilir enerji kaynağı olan biyometan da çevresel açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında, biyometan kullanımı sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (IRENA, 2018: 41). Biyometanın üretiminde kullanılan hammaddeler, elde edilen çevresel faydayı doğrudan etkilemektedir. Örneğin, mısır gibi tarım ürünlerinden elde edilen biyometan, benzine kıyasla sera gazı emisyonlarını yaklaşık 60% oranında azaltmaktadır. Gübre bazlı biyometan üretimi ise bu oranı 80%'e kadar çıkarmaktadır. Bireysel organik atıklardan üretilen biyometanın araç yakıtı olarak kullanımı, fosil yakıtlara kıyasla sera gazı salımlarını 73% oranında azaltmakta; bu da benzinle çalışan bir yolcu aracına kıyasla kilometre başına yaklaşık 70% daha az sera gazı salımı anlamına gelmektedir (IRENA, 2018: 42).

Demiryolu taşımacılığında biyoyakıtlar, dizel ile çalışan lokomotiflerde katkı maddesi olarak kullanılabilirken elektrikli trenler doğrudan yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalıştırılabilmektedir. 1990 yılında, dünya genelindeki şehirlerarası demir yollarında kullanılan enerjinin yalnızca 3,4%'ü yenilenebilir elektrik kaynaklarından sağlanırken bu oran 2015 itibarıyla yaklaşık 9%'a yükselmiştir. Hollanda, Avusturya, Avustralya ve Japonya gibi ülkeler, demiryolu taşımacılığında yenilenebilir enerjiyi 100% oranında kullanarak bu alanda öncü konumdadır (IRENA, 2021: 8).

Denizyolu taşımacılığı da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım potansiyeline sahiptir. Gemiler, biyoyakıtlar, elektrikle çalışan hidrojen veya amonyak motorlarıyla, ayrıca rüzgâr ve güneş enerjisiyle çalıştırılabilmektedir. Ancak, sektördeki yenilenebilir enerji kullanımı henüz sınırlı düzeydedir. Yine de Danimarka, Finlandiya, Norveç ve İsveç gibi ülkelerde elektrikli ve hibrit feribotlar hizmet verirken Amerika Birleşik Devletleri'nde biyodizel ile çalışan feribotlar kullanılmaktadır. Özellikle uzun mesafeli taşımacılıkta yeşil amonyak alternatif bir yakıt olarak öne çıkmaktadır (IRENA, 2021: 8).

Havayolu taşımacılığında da sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş yönünde adımlar atılmaktadır. Yeni nesil uçaklar, geleneksel jet yakıtına belirli oranlarda karıştırılan biyoyakıtları kullanmaktadır. Ancak bu kullanım hâlen sınırlı düzeydedir. 2018 yılından bu yana, 100.000'den fazla ticari uçuşta sürdürülebilir havacılık yakıtları kullanılmıştır. Uzun vadede, elektrikli veya güneş enerjisiyle çalışan uçaklar, sentetik yakıtlar ve yeşil hidrojen gibi alternatif tahrik sistemlerinin geliştirilmesiyle havacılık sektöründe yenilenebilir enerji entegrasyonu mümkün hâle gelecektir (IRENA, 2021: 8).

2018 yılında etanol ve biyodizel, küresel karayolu taşımacılığı yakıt tüketiminin yaklaşık %3'ünü karşılamıştır. Bu durum, alternatif enerji kaynaklarının karayolu taşımacılığında daha yaygın olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Sektör, giderek artan bir şekilde elektrifikasyon sürecinden geçmektedir ve yenilenebilir elektrik kullanımına yönelik fırsatlar genişlemektedir. 2016 yılında, elektrikli araçların tükettiği elektriğin dünya genelinde yalnızca %26'sı yenilenebilir kaynaklardan sağlanırken, bu oranın zamanla artması beklenmektedir. Ayrıca, elektrikli araçların yakıt hücrelerinde enerji üretimi için çevre dostu yöntemlerle üretilen yeşil hidrojenin kullanılması da sektördeki sürdürülebilirlik potansiyelini artırmaktadır (IRENA, 2021: 8).

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma, lojistik sektörünün iklim değişikliğiyle mücadelede üstlenebileceği stratejik rolleri bütüncül bir yaklaşımla analiz etmektedir. Literatür taramasına dayalı olarak gerçekleştirilen değerlendirmeler, lojistik faaliyetlerin hem sera gazı emisyonlarının temel kaynaklarından biri olduğunu hem de iklim değişikliğinin fiziksel ve sistemik etkilerine doğrudan maruz kaldığını göstermektedir. Dolayısıyla sektör hem sebep hem mağdur konumundadır. Bu çift yönlü ilişki, lojistik altyapının dönüşüm ihtiyacını kaçınılmaz hâle getirmektedir.

Emisyon azaltımı, iklim değişikliğine uyum (adaptasyon) ve sistemik dönüşüm gibi süreçler yüksek malzeme ve enerji yoğunluğu gerektirdiğinden, lojistik sektörünün mevcut kapasitesi üzerinde ciddi yapısal baskılar oluşturmaktadır. Bu durum, başta Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG'ler) olmak üzere, birçok ülkenin Net Sıfır Emisyon hedeflerine ulaşmasını da zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla, lojistik sektörüne ilişkin akademik ve uygulamalı çalışmaların kapsamı genişletilmeli; çevre bilimleri, enerji politikaları ve iklim modellemesi ile disiplinlerarası iş birlikleri güçlendirilmelidir.

Gelecekte lojistik sektörünün küresel iklim politikalarıyla uyumlu hale gelebilmesi için sektörün yapısal olarak yeniden şekillendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, hükümetlerin ve uluslararası kuruluşların karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik daha sıkı çevresel düzenlemeler getirmesi beklenmektedir. Söz konusu düzenlemeler, özellikle fosil yakıtla çalışan taşıma sistemlerinin işletme maliyetlerini artıracak; bu da elektrifikasyonun hızlanmasını ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sektöre entegrasyonunu zorunlu kılacaktır. Ancak, özellikle yük taşımacılığı alanı, mevcut teknolojik kapasite eksiklikleri, politika yetersizlikleri ve finansal kısıtlar nedeniyle karbonsuzlaştırılması en güç sektörlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, 2050 yılına kadar yük taşımacılığına olan talebin ciddi biçimde artacağı öngörülmekte, bu da sektörü iklim hedeflerine ulaşma sürecinde potansiyel bir tehdit haline getirmektedir. Mevcut eğilimler sürdüğü takdirde, taşıma sektörü, küresel düzeyde karbon emisyonlarını azaltma çabalarının önünde yapısal bir engel teşkil edebilir.

COVID-19 pandemisi (2020–2022) ve sonrasında yaşanan bölgesel çatışmalar (örneğin Ukrayna-Rusya, İsrail-Ortadoğu ülkeleri), taşıma sistemlerinde kırılگانlıkları derinleştirmiş; küresel tedarik zincirlerinde kalıcı değişimlere neden olmuştur. Pandemi süresince uygulanan seyahat kısıtlamaları, uluslararası taşımacılığı tarihsel olarak düşük seviyelere çekmiş, özellikle temel ürünlerin arz güvenliğini sağlamak amacıyla yük taşımacılığı faaliyetleri hızla adapte olmak zorunda kalmıştır. Pandemi sonrası toparlanma döneminde ise, jeopolitik gerilimler yeni enerji krizlerini tetiklemiş ve alternatif ticaret güzergâhlarının önemini artırmıştır. Bu gelişmeler, lojistik sektörüne olan talebin küresel ölçekte yeniden artmasına neden olmuş; ancak sektör hâlen büyük oranda fosil yakıt bağımlılığını sürdüren bir yapıdadır. Bu bağımlılık, taşıma sistemlerini enerji fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı savunmasız kılmakta ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik riskleri derinleştirmektedir. Önümüzdeki dönemde, artan nüfus ve ekonomik büyümenin etkisiyle hem yük hem yolcu taşımacılığına yönelik talebin katlanarak artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, hükümetlerin ulaşım talebini çevresel, sosyal ve ekonomik boyutları gözетerek karşılayacak bütüncül ve adil politikalar geliştirmesi zorunlu hâle gelmektedir.

Kaynaklar

- Barke, A., Bley, T., Thies, C., Weckenborg, C., & Spengler, T. S. (2022). Are sustainable aviation fuels a viable option for decarbonizing air transport in Europe? An environmental and economic sustainability assessment. *Applied Sciences*, 12(2), 597.
- Cullinane, K., & Yang, J. (2022). Evaluating the costs of decarbonizing the shipping industry: A review of the literature. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 946.
- International Civil Aviation Organization. (2022). ICAO environmental report 2022: *Innovation for a green transition*. Montreal, Canada: ICAO. Retrieved from <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/env-reports.aspx>
- International Energy Agency (IEA). (2020). Renewables 2020 Analysis and forecast to 2025. Erişim adresi: www.iea.org
- International Energy Agency (IEA). (2024). Net Zero Roadmap A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. Erişim adresi: www.iea.org
- IPCC. (2005). Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons. *Working Groups I and III*.
- IPCC. (2007). Transport and its infrastructure. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- IPCC. (2014). Transport. In: Climate Change 2014: *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IRENA (2018), Biogas for road vehicles: Technology brief, *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi.
- IRENA (2021), Renewable Energy Policies for Cities: Transport, *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi.
- IRENA. (2023). World Energy Transitions Outlook 2023.
- ITF. (2023). ITF Transport Outlook 2023, *OECD Publishing*, Paris, <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en>
- Koetse, M. J., & Rietveld, P. (2009). The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. Transportation Research Part D: *Transport and Environment*, 14(3), 205-221.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., ... & Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric environment*, 244, 117834.

- Mertens, M., Brinkop, S., Graf, P., Grewe, V., Hendricks, J., Jöckel, P., ... & Thor, R. N. (2024). The contribution of transport emissions to ozone mixing ratios and methane lifetime in 2015 and 2050 in the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(21), 12079-12106.
- McKinnon, A., & Kreie, A. (2010). Adaptive logistics: preparing logistical systems for climate change. Available from Internet: [http://www. green-logistics.org](http://www.green-logistics.org).
- National Research Council. 2008. Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation: Special Report 290. Washington, DC: *The National Academies Press*. <https://doi.org/10.17226/12179>.
- SLOCAT. (2018). Transport and Climate Change Global Status Report 2018. Erişim adresi: <http://slocat.net/tcc-gsr>
- SLOCAT. (2021). Tracking Trends in a Time of Change: The Need for Radical Action Towards Sustainable Transport Decarbonisation, Transport and Climate Change Global Status Report – 2nd edition. Erişim adresi: www.tcc-gsr.com.
- SLOCAT. (2023). Global Status Report on Transport, Climate and Sustainability – 3rd edition, www.tcc-gsr.com.
- UNDESA. (2025). Probabilistic Population Projections based on the World Population Prospects 2024. Erişim adresi: <https://www.un.org/development/desa/dpad/category/un-des/>
- U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration. (2014). Best practices and strategies for improving rail energy efficiency (Report No. DOT/FRA/ORD-14/02). Washington, DC: U.S. Department of Transportation.