

T.C.
GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ULUSLARARASI TİCARET VE LOJİSTİK ANA BİLİM DALI

**OECD ÜLKELERİNDE ÇEVRESEL BOZULMA,
ENERJİ TÜKETİMİ VE LOJİSTİK PERFORMANS
ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ: MAKİNE
ÖĞRENİMİ İLE BİR UYGULAMA**

DOKTORA TEZİ

MAİDE BETÜL BAYDAR

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa METE

GAZİANTEP, Eylül 2025

T.C.
GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

ULUSLARARASI TİCARET VE LOJİSTİK ANA BİLİM DALI

Tezin Başlığı: OECD Ülkelerinde Çevresel Bozulma, Enerji Tüketimi ve Lojistik Performans Arasındaki İlişkinin İncelenmesi: Makine Öğrenimi ile Bir Uygulama

Adı ve Soyadı: Maide Betül BAYDAR

Tez Savunma Tarihi: 09/09/2025

Prof. Dr. Mustafa METE danışmanlığında hazırlanan bu tez tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından oybirliği ile bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri:

(Unvanı, Adı ve SOYADI)

İmzası

Prof. Dr. Taner AKÇACI (Jüri Başkanı)

Prof. Dr. Mustafa METE

Doç. Dr. Hayri ABAR

Doç. Dr. Sefa ÖZBEK

Dr. Öğr. Üyesi Hakkı ÖZBAŞ

Bu tezin gerekli şartları sağlayarak yukarıda belirtilen jüri tarafından Doktora tezi olarak kabul edildiğini onaylarım.

Prof. Dr. Orhan ÇOBAN

Enstitü ABD Başkanı

Sosyal Bilimler Enstitüsü Onayı

Doç. Dr. Ahmet BOZDAĞ

SBE Müdürü

ETİK İLKELERE UYGUNLUK BEYANI

Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza:

Adı ve Soyadı: Maide Betül BAYDAR

Öğrenci Numarası: 190516211005

Tezin Savunma Tarihi:09/09/2025

ÖZET

OECD ÜLKELERİNDE ÇEVRESEL BOZULMA, ENERJİ TÜKETİMİ VE LOJİSTİK PERFORMANS ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ: MAKİNE ÖĞRENİMİ İLE BİR UYGULAMA

BAYDAR, Maide Betül

Doktora Tezi

Uluslararası Ticaret ve Lojistik Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa METE

Eylül 2025, 111 Sayfa

Lojistik faaliyetler sera gazı emisyonları aracılığıyla iklim değişikliği ve küresel ısınmaya yol açarak, dünya için yıkıcı sonuçlar doğurmaktadır. Bu sonuçlardan korunabilmek amacıyla hem lojistik sektöründe hem de enerji üretim ve tüketiminde çeşitli önlemler alınması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında 38 OECD ülkesi üzerinde lojistik performans, çevresel bozulma ve enerji tüketimi arasındaki ilişki bir makine öğrenimi algoritması olan Rassal Orman analiziyle incelenmektedir. Analizde, algoritmanın performansını değerlendirmek için MSE, MAE, RMSE ve R^2 metrikleri, değişken önemini değerlendirmek için ise TreeSHAP kullanılmaktadır. Ayrıca sonuçların görselleştirilmesi için arı sürüsü grafiklerinden faydalanılmaktadır. Algoritma, ulaşım sektöründen kaynaklanan enerji tüketimi, çevresel bozulma, Lojistik Performans Endeksi (LPE) göstergelerinden lojistik kalite ve yetkinlik, altyapı, takip ve izlenebilirlik, gümrükleme değişkenlerini başarıyla tahmin edebilirken; zamanlama ve uluslararası taşımacılık göstergelerini açıklamakta zorluk çekmektedir. Değişken önem düzeylerine göre her bir hedef LPE göstergesi için, diğer LPE göstergeleri tutarlı bir şekilde etkili tahmincilerdir. Enerji tüketimine ilişkin sonuçlar, doğru enerji tüketimi tahminleri için algoritmanın lojistik metriklerindense, çevresel ve ekonomik faktörlere öncelik verilmesi gerektiğini göstermektedir. Analiz sonucunda çevresel bozulma tahmininin en baskın belirleyicisinin ise enerji tüketimi olduğu gözlemlenmektedir.

Anahtar sözcükler: Çevresel Bozulma, Enerji Tüketimi, Lojistik Performans, Makine Öğrenimi, Rassal Orman

ABSTRACT

EXAMINING THE RELATIONSHIP BETWEEN ENVIRONMENTAL DEGRADATION, ENERGY CONSUMPTION, AND LOGISTICS PERFORMANCE IN OECD COUNTRIES: AN APPLICATION USING MACHINE LEARNING

BAYDAR, Maide Betül

Doctorate Thesis

International Trade and Logistics Department

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa METE

September 2025, 111 Pages

Logistics activities contribute to climate change and global warming through greenhouse gas emissions, resulting in destructive consequences for the planet. To mitigate these effects, various measures need to be implemented both in the logistics sector and in energy production and consumption. This thesis investigates the relationship between logistics performance, environmental degradation, and energy consumption in 38 OECD countries using the Random Forest machine learning algorithm. In the analysis, MSE, MAE, RMSE, and R^2 metrics are used to evaluate the algorithm's performance, while TreeSHAP are employed to assess variable importance. Additionally, bee swarm plots are utilized for visualizing the results. The algorithm successfully predict the variables of energy consumption from the transportation sector, environmental degradation, 'the competence and quality of logistics services', 'the quality of trade and transport-related infrastructure', 'the ability to track and trace consignments', and 'the efficiency of customs and border management clearance' from Logistics Performance Index (LPI) indicators; however, it has difficulty explaining 'the frequency with which shipments reach consignee within scheduled or expected delivery time' and 'the ease of arranging competitively priced international shipments' indicators. According to variable importance levels, for each target LPI indicator, other LPI indicators consistently serve as the most influential predictors. The results related to energy consumption indicate that, for accurate energy consumption predictions, priority should be given to environmental and economic factors rather than logistics metrics. The analysis also reveals that energy consumption is the most dominant determinant in forecasting environmental degradation.

Keywords: Energy Consumption, Environmental Degradation, Logistics Performance, Machine Learning, Random Forest

ÖN SÖZ

Tez çalışmam boyuncaengin bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, katkılarıyla bu çalışmanın şekillenmesinde büyük rol oynayan tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa METE'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez yazım sürecinde beni yönlendiren, katkılarını esirgemeyen tez izleme komitesi üyesi değerli hocalarım Prof. Dr. Taner AKÇACI ve Doç. Dr. Hayri ABAR'a şükranlarımı sunarım. Uzakta olmasına rağmen her zaman fikirleriyle ve moral desteğiyle yanımda hissettiğim sevgili dostum Berna DOĞAN BAŞAR'a ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Yanımda olmasalar da destekleriyle varlıklarını hissettiren, bana her zaman güç veren aileme -babam Fikret, annem Fadime, abim Talha ve kardeşim Rümeysa-yürekten teşekkür ederim.

Son olarak akademik yaşama adım atmamda ilham kaynağı olan, beni yönlendiren, artık aramızda olmasa da yolumu aydınlatan değerli büyüğüm Numan Durak AKSOY'u saygı ve rahmetle anıyorum.

Maide Betül BAYDAR

Eylül-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖN SÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLOLAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
GRAFİKLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR	ix

GİRİŞ

A. Araştırmanın Konusu ve Problemi.....	2
B. Araştırmanın Amacı ve Önemi.....	3
C. Araştırmanın Yöntemi.....	5
D. Sınırlılıklar	6
E. Ulusal ve Uluslararası Literatür.....	6

I. BÖLÜM

LOJİSTİK VE LOJİSTİK PERFORMANSIN TEORİK ÇERÇEVESİ

1.1. Lojistik Performans Kavramı, Önemi, Amacı ve Gelişimi.....	14
1.2. Lojistik Performans Ölçütleri.....	18
1.2.1. Lojistik Performans Endeksi.....	18
1.2.2. Yeni Gelişen Pazarlar Lojistik Endeksi	26
1.2.3. Diğer Lojistik Performans Göstergeleri.....	29
1.3. Lojistik Performansı Artırma Yöntemleri.....	33
1.4. Lojistik Performans ve Ekonomi İlişkisi.....	39

II. BÖLÜM

ÇEVRESEL BOZULMA VE ENERJİ

2.1. Çevresel Bozulma ve Lojistik Aktiviteler.....	43
2.1.1 Çevresel Bozulma ve Ulaştırma Sektörü İlişkisi	47
2.1.2 Çevre ve Lojistik ile İlgili Uluslararası Düzenleme ve Protokoller.....	49
2.2. Enerji Tüketimi ve Lojistik Performans İlişkisi.....	55

III. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Veri Seti ve Değişkenler	59
3.2. Yöntem.....	62
3.3. Algoritma Parametrelerinin Belirlenmesi	67
3.4. Performans Değerlendirme Kriterleri.....	70
3.5. Performans Değerlendirme Sonuçları	72
3.6. Değişken Önem Düzeyleri	73

SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ.....	111



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1	Yıllara göre LPE'ye katılan ülke sayıları.....	19
Tablo 1.2	LPE ülke sınıflandırması.....	21
Tablo 1.3	LPE 2023 raporuna göre ilk ve son on ülke.....	22
Tablo 1.4	OECD üyesi ülkelerin LPI Sıralamaları.....	23
Tablo 1.5	Yeni Gelişen Pazarlar Lojistik Endeksi temel alanları ve alt boyutları	27
Tablo 1.6	Yeni Gelişen Pazarlar Lojistik Endeksi'ne göre ilk ve son beş ülke	28
Tablo 1.7	Güvenilirlik, esneklik ve maliyet tabanlı lojistik performans göstergeleri	30
Tablo 1.8	Lojistik faaliyetlere göre performans kriterleri	32
Tablo 2.1	Çevresel perakende tedarik zinciri yönetimi çerçevesi	46
Tablo 3.1	Değişkenler ve kaynakları.....	61
Tablo 3.2	Analize dâhil edilen ülkeler	61
Tablo 3.3	En iyi parametreler.....	70
Tablo 3.4	Rassal orman performans metrikleri	72

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Lojistiğin ekonomik büyüme üzerindeki etkisi.....	41
Şekil 2.1 Çevreyi etkileyen lojistik kararları.....	45
Şekil 3.1 Rassal orman algoritma mimarisi.....	65



GRAFİKLER LİSTESİ

Grafik 1.1 Mod ve fonksiyona göre 2019 küresel lojistik maliyetleri	40
Grafik 3.1 LPI1 değişkeni için arı sürüsü grafiği.....	75
Grafik 3.2 LPI2 değişkeni için arı sürüsü grafiği.....	76
Grafik 3.3 LPI3 değişkeni için arı sürüsü grafiği.....	77
Grafik 3.4 LPI4 değişkeni için arı sürüsü grafiği.....	78
Grafik 3.5 LPI5 değişkeni için arı sürüsü grafiği.....	79
Grafik 3.6 LPI6 değişkeni için arı sürüsü grafiği.....	80
Grafik 3.7 OIL değişkeni için arı sürüsü grafiği.....	81
Grafik 3.8 CO değişkeni için arı sürüsü grafiği.....	82

KISALTMALAR

AB:	Avrupa Birliği
ABD:	Amerika Birleşik Devletleri
ASEAN:	Güneydoğu Asya Ülkeleri Birliği
CO₂:	Karbondioksit
CORSIA:	Uluslararası Havacılık Karbon Dengeleme ve Azaltma Planı
EJ:	Eksajul
GSYİH:	Gayri Safi Yurt İçi Hâsıla
Gt:	Milyar ton
ICAO:	Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü
IMO:	Uluslararası Denizcilik Örgütü
JIT:	Tam Zamanında
KPI:	Anahtar Performans Göstergesi
LPE:	Lojistik Performans Endeksi
MAE:	Ortalama Mutlak Hata
MARPOL:	Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesi Sözleşmesi
MDI:	Düğüm Safsızlığındaki Ortalama Azalma
MENA:	Orta Doğu ve Kuzey Afrika Bölgesi
MSE:	Ortalama Karesel Hata
MtCO_{2e}:	Milyon Metrik Ton Karbondioksit Eşdeğeri
OBRI:	Bir Kuşak Bir Yol Girişimi
°C:	Santigrat Derece
OECD:	Ekonomik İş birliği ve Kalkınma Teşkilatı
RMSE:	Kök Ortalama Karesel Hata
RO:	Rassal Orman
SAF:	Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları
SHAP:	Shapley Eklemeli Açıklamalar
SOLP:	Sürdürülebilir Operasyonel Lojistik Performansı

TJ:	Terajul
UNEP:	Birleşmiş Milletler Çevre Programı
US\$:	Amerikan Doları
vb.:	Ve benzeri
vd.:	Ve diğerleri
WB:	Dünya Bankası



GİRİŞ

Lojistik sektörü, ekonomik verimliliği artırma, ulusal ve uluslararası ticareti destekleme ve küresel entegrasyonu güçlendirmede önemli bir rol üstlenmektedir. Ticaretin yapı taşı olan lojistik, dünya genelinde ekonomik faaliyetlerin sürdürülmesinde temel unsurdur. Ancak bu lojistik faaliyetler sera gazı emisyonlarıyla küresel ısınmaya yol açarak, toplum ve çevre için yıkıcı sonuçlar doğurmaktadır. İklim değişikliğinin yol açtığı etkilerden korunabilmek ya da bu etkileri en aza indirebilmek için ulaşım, enerji üretim ve tüketiminde çeşitli önlemler alınması gerekmektedir.

Giriş bölümünde, çalışmanın konusu ile problemi, araştırmanın amacı ve önemi ile yöntemi detaylandırılarak, sınırlılıkları ifade edilmektedir. Ayrıca konu ile ilgili yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

Çalışma lojistik, enerji tüketimi ve çevresel bozulma üzerine son literatürün gözden geçirilmesiyle başlayarak üç bölüme ayrılmaktadır. Birinci bölümde lojistik performans kavramı ve ölçüm türleri, lojistik performansı artırma yöntemleri ve 2023 yılına ait LPE incelenmektedir. Birinci bölüm çevre ve lojistik ile ilgili uluslararası anlaşmalar ve projelerden bahsedilerek sonlandırılmaktadır. Bu bölümü, ikinci bölüm olan çevresel bozulma ve enerji başlığı takip etmektedir. Bu bölüm lojistik aktivitelerin enerji, çevre ve sürdürülebilirlik ilişkisine odaklanmaktadır. Üçüncü bölümde materyal ve yöntem yer almaktadır. Sonuç ve öneriler bölümü analiz sonucunda elde edilen bulguların pratik ve teorik sonuçlarına odaklanan bir tartışma sunarken, gelecekteki araştırmalar için çeşitli fikirler vermektedir. Çalışma, lojistik sektörünü Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Teşkilatı (OECD) ülkeleri özelinde daha sürdürülebilir bir şekle çevirmeye yardımcı olmak için politika öngörülerini sağlamaktadır.

A. Araştırmanın Konusu ve Problemi

Çevre konusu son yıllarda, iklim değişikliği, biyoçeşitlilik ve çevresel sağlık üzerinde gerçekleşen uzun vadeli etkileri nedeniyle ele alınması gereken önemli bir sorun haline gelmiştir. Lojistik yönetimi taşıma, gümrükleme, envanter, depolama ve bilgi işleme gibi operasyonları etkili bir şekilde tedarik zinciri süreci içine entegre etmek için gereken işlemlerdir. Tedarik zinciri ile yakından ilişkili olan temel lojistik faaliyetler arasında taşıma, elleçleme, depolama, envanter yönetimi ve müşteri hizmetleri vb. operasyonlar bulunmaktadır (Bayraktutan ve Özbilgin, 2014, s. 5). Bu temelde, lojistik faaliyetlerle bağlantılı ekonomik, enerji ve çevre kanallarını belirlemek gerekmektedir. Giderek artmakta olan çevresel sorunlar, bu sektörün sürdürülebilirliğini değerlendirmenin önemli olduğu mesajını vermektedir.

Küreselleşmenin ardından, yük ve deniz taşımacılığı rekabet avantajı konusuna dönüştüğünden, firmaların küresel kaynak kullanımı mecbur hale gelmektedir. Kaynak kullanımının fazlasıyla yoğun olduğu küresel ticarete, karbondioksit (CO₂) emisyonlarının uzun vadeli etkisine gerekli önem verilmemektedir. Bu noktada lojistik sektörü artan talebi karşılarken, CO₂ emisyonlarını düşürebilmek gibi önemli bir imtihanla karşı karşıya kalmaktadır.

Fosil yakıt kullanımı ve ormansızlaşma, atmosferdeki CO₂ seviyelerini artırma yoluyla dünya ikliminde büyük bir değişime neden olarak, tüm insanlığı tehdit eden küresel ısınmayı hızlandırmaktadır (Wang vd., 2023, s. 1). İklim değişikliğinin potansiyel risklerine yönelik artan farkındalık, uluslararası düzeyde ülkeleri 2050–2070 yılları arasında karbon nötrlüğü hedefine ulaşmaya teşvik etmektedir (Patil vd., 2024, s. 1227). Küresel ısınma hızının durdurulması için tüm sektörlerde hızlı bir emisyon azaltımı yapılmaması durumunda, küresel sıcaklık önümüzdeki dönemde 1.5°C ile sınırlamak mümkün görünmemektedir (IPCC, 2022, s. V). Deniz seviyesindeki yükselme, okyanus asitlenmesi, ekosistemlerin bozulması, biyoçeşitlilik kaybı, sosyal ve ekonomik bozulmalar, gıda ve su kıtlığı ile sağlık riskleri gibi küresel ısınmanın potansiyel etkilerinin minimize edilmesi ve dünyanın daha dayanıklı ve sürdürülebilir bir geleceğe sahip olması için, küresel ısınmanın azaltılması ve adaptasyon stratejilerinin eş zamanlı olarak ele alınması gerekmektedir (Malhi vd., 2020, s. 2).

Ulaşım sektörü gündelik hayatı sürdürebilmek için gerekli olmasına rağmen, trafik sıkışıklığı, CO₂ ve diğer kirletici maddelerin emisyonları gibi olumsuz etkileri nedeniyle toplumsal ve çevresel tartışmaların odağında yer almaktadır (Lambrechts vd., 2019, s. 1). Ayrıca bu sektör, erişilebilirliği artırarak bireylerin sosyo-ekonomik durumlarını önemli ölçüde etkilemekte ve küresel sürdürülebilir büyümenin kritik bir bileşeni olarak 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'nde ("Birleşmiş Milletler", 2025) merkezi bir rol oynamaktadır. Ulaşım, 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'nde, sürdürülebilir ulaşım, sürdürülebilir şehir, sağlık, enerji, ekonomik büyüme, altyapı ve toplum yerleşimleri alanlarında olmak üzere çeşitli Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'ne entegre edilmiştir. Artan ulaşım talebi karşısında, seyahat gereksinimleri karşılanırken, eş zamanlı olarak yükselen CO₂ emisyonları, azalan hava kalitesi ve artan trafik yoğunluğu gibi sorunlarla mücadele etmek ve tüm bireyler için fırsatlara, mallara ve hizmetlere erişimi iyileştirmek önemli olmasına rağmen oldukça zordur. Uluslararası Enerji Ajansı, küresel CO₂'nin %23'ünün ulaşım ile ilgili olduğunu tespit etmiştir ("IEA", 2020). Aynı zamanda 2022 yılında Avrupa'nın CO₂ emisyonlarının %29'undan da taşımacılık sektörü sorumludur ("IEA", 2022). Ancak genel olarak senaryolar, mevcut politikaların zamanla küresel düzeyde bir fark yaratmaya başlayacağını ve ulaşımındaki CO₂ emisyonlarının 2050 yılına kadar bir miktar düşeceğini göstermektedir (ITF, 2023, s. 46).

B. Araştırmanın Amacı ve Önemi

Ülke düzeyindeki çevresel veya ekonomik sürdürülebilirlik konularının uluslararası karşılaştırmasını ya da ilişkisini ele alan lojistik performansla alakalı literatürde yer alan çalışmalar az sayıdadır (Kim ve Min, 2011, s. 1173). Çalışmaların bir kısmı lojistik performansın, ekonomik göstergeler üzerindeki etkisini şirket bazında analiz etmektedir. Bunun yanında küreselleşmeyle birlikte lojistik performans, sürdürülebilirlik için giderek daha fazla tamamlayıcı ve destekleyici bir hedef olarak görülmektedir ("Dünya Bankası", 2014, s. 31). Ayrıca lojistiğin önemli bir bölümünü oluşturan ulaştırma sektörü, küresel düzeyde sera gazlarının büyük bir kısmından sorumlu olduğundan, düşük emisyonlu yakıt kullanan ya da fosil yakıt kullanmayan ekonomiler için iyi bir lojistik performans oldukça önem taşımaktadır. Bu nedenle, hem CO₂ emisyonlarının lojistik performans üzerindeki etkisini, hem de lojistik performansın CO₂ üzerindeki etkisini analiz etme

ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı, OECD ülkeleri özelinde çeşitli lojistik performans göstergelerini, ulaştırma sektöründeki petrol ürünleri tüketimini ve ulaştırma sektöründe yakıt yanmasından kaynaklanan CO₂ emisyonlarını tahmin etmede Rassal Orman algoritmasını kullanarak, hedef değişkenlerin tahminini etkileyen temel faktörleri belirlemektir. Bu kapsamda, çalışma, enerji tüketimi ve çevresel bozulmanın lojistik operasyonların performansını tahminindeki; lojistik performans ve çevresel bozulmanın enerji tüketimini tahminindeki; lojistik performans ve enerji tüketiminin çevresel bozulmayı tahminindeki etkinliğini eleştirel bir şekilde değerlendirmektedir. Çalışma, her değişkeni ayrı ayrı hedef olarak ele alarak, bu faktörlerin değişkenler arasındaki varyasyonları açıklamadaki tahmini ilişkilerini ve göreceli önemini ortaya çıkarmaktadır.

Yapılan bu çalışma, literatüre üç şekilde katkıda bulunmayı hedeflemektedir:

- Enerji tüketimi değişkeni sıklıkla kullanılırken, ulaşımda tüketilen enerji miktarının kullanıldığı çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu çalışma, OECD üyesi olan 38 ülkede (“Centraal Bureau voor de Statistiek”, 2025) ulaştırma sektörüne özel bir odaklanma getirmektedir. Ulaşım odaklı lojistik performans, enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarına önceki çalışmalardan daha geniş bir coğrafi ve zamansal odakla genel bir bakış sunmaktadır.
- İkinci olarak, çalışmaların çoğunda yöntem olarak geleneksel ekonometrik modeller kullanılırken, bu araştırma, yöntem olarak makine öğrenimi algoritmalarından rassal orman algoritmasından yararlandığı için rekabet avantajı sergilemektedir.
- Üçüncü olarak, LPE’nin altı göstergesinin, ulaşım sektöründeki petrol ürünleri nihai tüketiminin ve ulaşım sektöründe yakıt yanmasından kaynaklanan CO₂ emisyonlarının ayrı ayrı hedef değişken olarak kullanılması, değişkenler arasındaki ilişkilere çok yönlü ve detaylı bir bakış sağlamaktadır. Ayrıca LPI’nin bileşenlerinin birbirlerini nasıl tamamladıkları ve hangi bileşenlerin birbirinin itici gücü niteliğinde olduğu belirlenmektedir.

Araştırma, aşağıdaki sorulara yanıt aramaktadır:

- 1- Ekonomi ve ticaretle ilgili değişkenleri kullanarak lojistik performans göstergelerini, enerji tüketimini ve çevresel bozulmayı rassal orman algoritması aracılığıyla ne kadar etkili bir şekilde tahmin edebilmektedir?

2- Hangi özellikler (bağımsız değişkenler) LPE'nin altı göstergesinin tahmini üzerinde en fazla ve en az etkiye sahiptir?

3- Hangi özellikler enerji tüketimi tahmini üzerinde en fazla ve en az etkiye sahiptir?

4- Hangi özellikler çevresel bozulma tahmini üzerinde en fazla ve en az etkiye sahiptir?

Çalışma, LPE ile enerji tüketimi ve çevresel bozulma ilişkisini makine öğrenimi yöntemiyle değerlendirerek, hedef değişkenleri etkileyen temel faktörleri belirlemektedir. Literatürdeki çoğu çalışmadan farklı olarak bir makine öğrenimi yöntemi olan rassal orman algoritması kullanarak, lojistik faaliyetlerinin çevresel etkisi üzerine entegre ve bütünsel bir yaklaşım sağlaması, bu alanda daha önce yapılmış çalışmaları tamamlamaktadır.

C. Araştırmanın Yöntemi

Analiz, OECD üyesi olan 38 ülkenin lojistik, çevre ve enerji özelliklerine dayanılarak; 2007, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 ve 2022 yıllarını kapsayan verilerle, yazılım programı Python 3.12'de Rassal Orman algoritması kullanılarak yapılmaktadır. Çalışmada, Dünya Bankası tarafından her iki yılda bir yayımlanan LPE'nin takip ve izlenebilirlik, lojistik kalite ve yetkinlik, uluslararası taşımacılık, gümrükleme, zamanlama, altyapı göstergeleri (Zaman ve Shamsuddin, 2017; Khan vd., 2019; Magazzino vd., 2022; Ahmad vd. 2024), enerji tüketiminin göstergesi olarak ulaşım sektöründeki petrol ürünleri tüketimi (Chandran ve Tang, 2013; Azlina vd., 2014) ve çevresel bozulmanın göstergesi olarak ulaşım sektöründe yakıt yanmasından kaynaklanan CO₂ emisyonları (Magazzino vd., 2022; Rehman vd., 2023), Gayri Safi Yurt İçi Hâsıla (GSYİH) (Hayaloğlu, 2015; Magazzino vd., 2022) ve ticari dışa açıklık (Zaman vd. 2016; Khan vd., 2019) değişkenleri kullanılmaktadır. Analiz, algoritma performansını değerlendirmek için Ortalama Karesel Hata (MSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE), Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE) ve R² gibi metrikleri, değişken önemini değerlendirmek için karar ağaçları ve rassal orman algoritması gibi topluluk yöntemlerine özel geliştirilmiş olan TreeSHAP ve Düğüm Safsızlığındaki Ortalama Azalma (MDI) değerleriyle birlikte kullanılmaktadır. Ayrıca TreeSHAP değerinin daha kolay yorumlanabilmesi ve görselleştirilmesi için arı sürüsü grafiklerinden faydalanılmaktadır.

D. Sınırlılıklar

LPE raporunun Dünya Bankası tarafından iki yılda bir yayımlanmasından dolayı veri yedi yıl ile sınırlıdır. Analiz, 38 OECD ülkesi verileri kullanılarak yapıldığından, küresel ölçekte bir genelleme yapılamamaktadır. Çalışmada kullanılan değişkenleri etkileyebilecek siyasi dalgalanmalar, teknolojik gelişim düzeyi, kentleşme oranı, altyapı yatırımları gibi faktörler algoritmaya dâhil edilmemiştir.

E. Ulusal ve Uluslararası Literatür

Genel olarak, lojistik ya da tedarik zinciri yönetimi ve çevre hakkındaki araştırma makaleleri lojistik ya da tedarik zincirini birincil odak yapan, çevreyi birincil odak yapan ya da her ikisini odak noktası yapan üç tür odak noktasından birine sahiptir (Abukhader ve Jönson, 2004, s. 138). Lojistik performansın ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisine ilişkin makro yönelimi benimseyen literatür, lojistiğin ülkelerin ekonomik ve çevresel performansını artırma veya azaltma potansiyeline sahip olduğunu ileri sürmektedir (Khan vd., 2018, s. 596-597).

Yapılan literatür taraması sonucunda, lojistik ve enerji, CO₂ emisyonu, ekonomik büyüme arasındaki ilişkinin yeterli düzeyde incelenmediği görülmektedir. Ulusal ve uluslararası literatürdeki çalışmalar, genellikle lojistiğin alt bileşenlerine, özellikle de ulaşım ve telekomünikasyon altyapısındaki gelişmelere odaklanmaktadır.

Çeşitli coğrafi bölgelerdeki ve farklı ülke kümelerindeki çevresel lojistik performans göstergelerinin ekonomik büyüme, doğrudan yabancı yatırım ve ticari dışa açıklık gibi makroekonomik değişkenler üzerindeki etkileri sıklıkla incelenmektedir (Khan ve Qianli, 2017; Zaman ve Shamsuddin, 2017; Yu vd., 2018; Kim ve Min, 2011). Bu araştırmalar genel olarak, yeşil lojistik uygulamalarının ekonomik büyüme ve diğer makroekonomik göstergeler üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğunu desteklemektedir. Ayrıca lojistik operasyonların enerji ve fosil yakıt tükettiğini, fosil yakıt ve yeşil olmayan enerji kaynaklarının ise çevresel sürdürülebilirlik üzerinde önemli derecede zararlı etkilere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, yeşil lojistiğin yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etme ve çevresel sürdürülebilirliği artırma potansiyeli üzerine

yapılan çalışmaların sayısı giderek artmaktadır (Khan vd., 2018; Khan, 2019). Bu çalışmalar, yenilenebilir enerjiye geçişin ve yeşil lojistik uygulamalarının benimsenmesinin, lojistik faaliyetlerin çevresel etkilerini azaltırken aynı zamanda ekonomik büyümeyi ve uluslararası ticaret hacmini artırabileceğini ortaya koymaktadır. Bazı bilim adamları, hibrit veya bileşik endeksler oluşturmak için çevresel göstergeler ekleyerek LPE'yi genişletmiştir. Örneğin, Kim ve Min (2011), altı LPE göstergesinden ikisini (altyapı ve zamanlama) sera gazı ve diğer emisyonları ölçen beş Çevresel Performans Endeksi göstergesiyle birleştirerek 146 ülke için "yeşil lojistik performans endeksini" hesaplamaktadır. Çalışma sonucunda daha fazla lojistik verimliliği ve daha yüksek milli gelir seviyelerinin, daha fazla emisyon şeklinde çevresel bozulmaya yol açabileceği sonucuna varmışlardır. Ekonomik büyüme daha fazla lojistik faaliyet anlamına gelmekte, bu da daha yüksek yakıt tüketimi ve daha fazla emisyon anlamına gelmektedir. Lu vd. (2019), lojistik verimliliği ile çevrenin korunması arasındaki dengeyi temsil etmek için bir "çevresel lojistik performans endeksi" geliştirmektedir. Çevresel lojistik performans endeksi, altı LPE göstergesinin tümünü ulaşımdaki CO₂ emisyon yoğunluğu ve petrol tüketimi yoğunluğuyla birleştirmektedir. Yeşil lojistik performans endeksini ve düşük karbonlu lojistik performans endeksine benzer şekilde, bu endeks ulusal gelirle ilişkili çıkmaktadır.

Mody ve Wang (1997), Çin'in yedi kıyı bölgesindeki 23 sanayi sektörünün çıktısına ilişkin verileri kullanarak 1985-1989 dönemi boyunca büyümenin belirleyicilerini incelemektedir. Sonuçlar, ulaşımın büyüme üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ancak kısa vadede azalan getirilerle karşılaştığını göstermektedir. Benzer bir çalışma Çin'in 24 eyaletinde yapılmıştır. Démurger (2001), bu eyaletlerde ekonomik performansın neden bir eyaletten diğerine farklılık gösterdiğine ve altyapı varlıklarının dağılımı ile büyüme performanslarının dağılımı arasındaki özel ilişkiye dair bir analiz yapmıştır. Analizde, ulaşım olanaklarının ekonomik büyüme farkını açıklamada temel bir faktör olduğu, eyaletlerin büyüme performanslarındaki gözlemlenen varyasyonun önemli bir kısmını açıkladığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Ong vd. (2012), Malezya'daki karayolu taşımacılığının enerji tüketimi ve emisyonlardaki eğilimi ile ulaşım sektörünü geliştirmek için daha fazla araştırma ve

inceleme yapılmasına yönelik rehber niteliğinde bir çalışma yaparak, bu sektörde enerji talebini dengelemek ve emisyonları azaltmak için uygun enerji politikalarının benimsenmesi gerektiğinin acil bir ihtiyaç olduğunu açıklamaktadır. Bunun yanı sıra çalışmada, yakıt ekonomisi standartları ve doğal gazı veya biyodizel geçişi gibi olası politikaların gözden geçirilmesi gerektiğine vurgu yapılmaktadır.

Azlina vd. (2014), 1975-2011 yılları arasında Malezya’da gelir, ulaşımda enerji kullanımı ve CO₂ emisyonları arasındaki dinamik ilişkiyi zaman serisi verileri kullanarak incelemektedir. Çalışma sonucunda, ulaştırma sektöründeki gelir ve enerji tüketimindeki artışın CO₂ emisyonlarında bir artışa yol açtığını göstermektedir. Ulaşımda enerji tüketimindeki %1’lik bir artış emisyonlarda %0.44’lük bir artışa neden olmaktadır. Öte yandan, ekonomideki yapısal değişiklikler ve yenilenebilir enerji kullanımındaki artış, CO₂ emisyonlarının azalmasıyla ilişkili olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

OECD ülkelerinde karayolu taşımacılığı sektöründeki enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları ve ekonomik büyüme arasındaki çift yönlü uzun vadeli ilişkiyi inceleyen Saboori, Sapri ve bin Baba (2014), CO₂ emisyonları ile ekonomik büyüme, karayolu sektöründeki enerji tüketimi ile ekonomik büyüme ve CO₂ emisyonları ile karayolu sektöründeki enerji tüketimi arasında pozitif ve anlamlı uzun vadeli çift yönlü bir ilişki olduğu sonucunu vurgulamaktadır.

Chandran vd. (2013), Güneydoğu Asya Ülkeleri Birliği (ASEAN) ekonomilerinde ulaşım sektörüne ait enerji tüketiminin, CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini eşbütünleşme ve Granger nedensellik yöntemleri kullanarak değerlendirmektedir. Uzun dönem esneklik tahminleri, gelir ve ulaşım enerji tüketiminin CO₂ emisyonlarını anlamlı şekilde etkilediğini göstermektedir. Tayland ve Malezya’da ulaşımda kullanılan enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları arasında çift yönlü nedensellik gözlemlenmektedir. Ayrıca ASEAN ülkelerinde ekonomik büyümenin CO₂ emisyonlarına katkısının, ulaşım enerji tüketiminden daha büyük olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Lean vd. (2014) Çin’de lojistik sektörü ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi kısa ve uzun vadeli olarak analiz etmektedir. Çalışma, ulaşım altyapısının geliştirilmesinin çift yönlü etkisini doğrulamaktadır. Ulaşım ağının iyileştirilmesi, seyahat süresi ve maliyetlerinin azalması gibi kanallardan ekonomik büyümeyi teşvik

ederken, ekonomik büyümenin de ulaşım altyapısının gelişimini tetiklediği belirlenmektedir.

Hayaloğlu (2015), 32 OECD ülkesi üzerinde, panel veri kullanarak yaptığı çalışmada lojistik sektöründeki gelişmelerin ekonomik büyüme üzerindeki etkilerini incelemektedir. Lojistik sektörünün farklı göstergelerinin kullanıldığı çalışmaya göre; iç taşıma altyapı yatırımları, karayolu taşımacılığı, hava taşımacılığı değişkenlerinin ekonomik büyümeye etkisi pozitif iken, telefon hattı değişkeninin etkisi negatiftir. Demir yolu taşımacılığı ile ekonomik büyüme arasında anlamlı bir ilişki bulunmamaktadır. Ayrıca, ulaştırma sektörüne yapılan yatırımlar ve telekomünikasyon ile iletişim sektörlerindeki gelişmeler OECD ülkelerinde ekonomik büyümeye katkı sağlamaktadır.

Zaman ve Shamsuddin (2017), lojistik performansın göstergelerinin enerji kullanımı, emisyonlar ve ekonomik refah üzerindeki etkisini incelemek için 27 Avrupa ülkesinde 2007-2014 yılları verilerini kullanarak panel veri analizi yapmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda LPE göstergelerinin çeşitli ekonomik ve çevresel göstergeler üzerinde farklı etkileri olduğu bulunmuştur; zamanlama göstergesi, GSYİH'yi, sağlık harcamalarını ve kişi başına geliri önemli ölçüde artırmaktadır; altyapı, yenilenebilir enerji kaynaklarını artırırken, CO₂ emisyonlarını azaltmaktadır; takip ve izlenebilirlik, lojistik kalite ve yetkinlik, uluslararası taşımacılık fosil yakıt enerji tüketimini önemli ölçüde artırmaktadır; gümrükleme ise daha düşük enerji fiyatlarıyla anlamlı bir şekilde ilişkili olmaktadır.

Mariano vd. (2017), 104 ülke için düşük karbonlu lojistik performans endeksi oluşturmak üzere sekiz değişken kullanmaktadır. Sekiz değişken; altı LPE göstergesinin tümü, GSYİH ve ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonlarıdır. Bu araştırmacılar, lojistiğin, ekonomik üretimi mümkün kıldığını, bunun da CO₂ emisyonlarına neden olan bir faktör olduğunu belirtmektedir.

Liu vd. (2018) çalışmasında 2007 yılından 2016 yılına kadar 42 Asya ülkesine ait verileri kullanılmaktadır. Sonuçlar, çeşitli LPE göstergeleri ile ölçülen lojistik performansının çevresel bozulmayla bağlantılı olduğunu, çevresel bozulma ile en güçlü ilişkiye sahip iki göstergenin uluslararası taşımacılık ve zamanında teslimat olduğunu göstermektedir. Popescu vd. (2024), Romanya üzerinde yaptıkları çalışmada Liu vd. (2018)'in çalışmasıyla paralel sonuçlar elde etmektedir. Analiz

sonucunda, lojistik sektöründeki enerji ve yakıt tüketiminin çevre üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya konulmuştur. Bu etkinin, teknoloji değiştirilse ve şirketlerin faaliyetlerini yürütmek için kullandığı ekipman giderek daha performanslı hale gelse bile -daha küçük bir ölçekte olsa da- devam ettiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Rashidi ve Cullinane (2019), lojistik sektörünün GSYİH'ye kayda değer bir katkı sağlayan, büyük ölçekli bir istihdam alanı sunan, oldukça fazla enerji tüketen ve sera gazı emisyonlarına önemli derecede katkıda bulunan bir sektör olduğunu gözlemlemektedir. Çalışmada LPE'yi desteklemek için sürdürülebilir operasyonel lojistik performans (SOLP) ölçümü önermekte ve OECD üyesi 22 ülke için SOLP'lerini hesaplamaktadırlar. SOLP, lojistik faaliyeti, enerji tüketimi, emisyonlar ve lojistikte istihdam yaratılmasını izah etmektedir.

Khan vd. (2019), 2001-2017 yıllarına ait verilerle Asya'nın yükselen ekonomi ülkeleri hakkında bir panel çalışması gerçekleştirmiştir. LPE'nin gümrükleme, lojistik yetkinlik ve altyapı göstergeleri ile ticari açıklık, kişi başına düşen GSYİH arasında pozitif ve anlamlı korelasyona sahip olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Daha büyük lojistik operasyonların ise iklim değişikliği, CO₂ emisyonları gibi sosyal ve çevresel kaygılarla negatif bir ilişkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Khan vd. (2020), yaptıkları başka bir çalışmada, ASEAN üyesi on ülkede LPE, yenilenebilir enerji, halk sağlığı harcamaları gibi bazı sürdürülebilirlik unsurları arasındaki ilişkileri yapısal eşitlik modellemesi ile incelemek için Dünya Bankası'ndan alınan verileri kullanmaktadırlar. Sonuçlar, lojistik operasyonlarda yenilenebilir enerji kullanımının emisyonları azaltarak çevresel ve ekonomik performansı iyileştireceğini, çevresel performansın ise kamu sağlık harcamaları ile negatif ilişkili olduğunu ve daha fazla çevresel sürdürülebilirliğin insan sağlığını ve ekonomik büyümeyi iyileştirebileceğini göstermektedir.

Karaduman vd. (2020), sabit etkiler panel regresyon analizi ile Balkan ülkelerinin CO₂ emisyonları ve lojistik performansları arasındaki nedensel ilişkiyi araştırmaktadır. Araştırmada 2010, 2012, 2014 ve 2016 yıllarına ait veriler kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, örneklenen Balkan ülkelerinin lojistik performansı ile CO₂ performansları arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır.

Saidi vd. (2020), gelişmekte olan 46 ülkenin 2000-2016 dönemi boyunca taşımacılık, lojistik, doğrudan yabancı yatırım ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Ampirik analizden elde edilen sonuçlar, taşımacılık ve lojistik altyapısının sürdürülebilir ekonomik büyümeye katkı sağladığını göstermektedir.

Wang vd. (2020), OBRI lkeleri üzerinde ulaştırma sektörünün gelişimi ile CO₂ arasındaki ilişkiyi analiz etmekteledir. Çalışma sonucu gelişmiş ülkelerde ulaşım yoğunluğu etkisinin CO₂ emisyonlarının azaltılmasında başlıca itici güç olduğunu, gelişmekte olan ülkelerde ise enerji yoğunluğu etkisinin ulaşımdan kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltmada kilit rol oynadığını göstermektedir.

Yurtkuran (2021), 1974-2019 yıllarına ait verileri kullandığı çalışmasında birincil enerji kaynakları, lojistik ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi analiz ederek, Türkiye’de uzun vadede üç değişken arasında eşbütünleşme ilişkisi olduğu sonucuna ulaşmaktadır. Ayrıca sonuçlar ekonomik büyümenin enerji kaynakları üzerindeki etkisi pozitifken, lojistiğin enerji kaynakları üzerindeki etkisinin negatif, enerji kaynaklarının ve lojistiğin ise ekonomik büyüme üzerindeki etkilerinin pozitif olduğunu göstermektedir.

Li vd. (2021), Bir Kuşak Bir Yol Girişimi (OBRI) lkeleri için yeşil lojistik performansın büyüme ve çevresel etkilerini iki aşamalı en küçük kareler ve Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi ile analiz etmektedir. Bulgular, yeşil lojistik performansının OBRI, Avrupa, Orta Doğu ve Kuzey Afrika Bölgesi (MENA) ekonomilerinde ekonomik büyümeyi artırdığını ortaya koymaktadır. Yeşil lojistik performansı, OBRI, Orta Asya ve MENA ekonomilerinde evre kirliliğini artırırken, Avrupa ile Doğu ve Güneydoğu Asya bölgelerinde evre kalitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir.

Altıntaş (2021), Dünya Bankası tarafından girdi ve çıktı değişkenleri olarak ikiye ayrılan LPE göstergeleri üzerinde yapay sinir ağları ile analiz gerçekleştirmektedir. Analiz sonucunda girdi değişkenleri olan gümrükleme, altyapı, lojistik kalite ve yetkinlik göstergelerinin, zamanlama, uluslararası taşımacılık, takip ve izleme ıktıları üzerindeki kestirim glerinin oldukça yüksek olduğu tespit edilmektedir.

Savo ve Tudor'un 2022 yılında yapmış oldukları çalışmada, 2007–2018 dönemi boyunca 15 ülkede, LPE'nin toplam CO₂ emisyonlarıyla ölçülen hava kirliliğini nasıl etkilediği incelenmektedir. Yazarlar, LPE'nin altyapı kalitesine ilişkin bileşeninin, kirliliği azaltan önemli bir unsur olduğunu, en yüksek emisyon üreten ülkeler örnekleminde daha yüksek lojistik performansın CO₂ emisyonlarını azalttığını ortaya koymaktadırlar.

Wan vd. (2022), 22 ülkede CO₂ emisyonları, LPE, yeşil inovasyon, yenilenebilir enerji ve ekonomik küreselleşme endeksini değişken olarak kullandıkları çalışmalarında, LPE'nin CO₂ emisyonlarını artırarak çevre kalitesini kötüleştirdiği sonucuna ulaşmaktadırlar.

Wang ve Dong (2023), 2004-2018 yılları arasındaki verilerle Çin'in 30 eyaletindeki lojistik endüstrisindeki büyüme, enerji tüketimi, CO₂ emisyonları ve sabit sermaye yatırımı verilerini kullanarak, orta, doğu, batı ve kuzeydoğu Çin'in dört büyük ekonomik kalkınma bölgesi için bir panel vektör otoregresif modeli oluşturmaktadır. Model katsayıları, Granger nedensellik testi ile değerlendirilen Genelleştirilmiş Momentler Yöntemi kullanılarak tahmin edilmektedir. Analiz sonucu, dört büyük ekonomik bölgedeki lojistik endüstrisindeki büyümenin, enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarını artıran bir etkisi olduğunu, katkı derecesinin doğu ve orta bölgelerde daha küçük, batı ve kuzeydoğu bölgelerinde ise daha büyük olduğunu göstermektedir.

Özcelik ve Töngür (2023) tarafından MENA ülkeleri için bir araştırma yapılmış, araştırma sonucunda petrol zengini MENA ülkelerinin lojistik performansındaki iyileşmelerin, çevresel bozulmayı artırdığını; petrol zengini olmayan MENA ülkelerinde, lojistik performansındaki değişimin çevresel bozulma üzerinde net bir etkisi olmadığını; LPE ve göstergelerinin çevre dostu uygulamalarla doğrudan ilişkili olmadığını gözlemlemişlerdir.

2007-2022 yılları arasında Afrika ülkelerine ait veriler kullanılarak yapılan bir çalışmada, gönderi izlenebilirliği, lojistik hizmet kalitesi ve ticaret altyapısı gibi yeşil lojistik performans göstergelerinin ekonomik büyüme üzerindeki pozitif etkisi ortaya konulmaktadır. Bu bulgu, yeşil lojistik uygulamalarının ekonomik büyümeyi desteklediğini göstermektedir. Aksine, fosil yakıt tüketimi ve sera gazı emisyonları gibi çevresel performans göstergeleri ile ekonomik büyüme ve çevresel

sürdürülebilirlik arasında negatif bir ilişki tespit edilmektedir. Bu da fosil yakıtlara dayalı ekonomik faaliyetlerin hem ekonomik büyümeyi yavaşlatabileceği hem de çevresel sorunları derinleştirebileceği yönündeki endişeleri desteklemektedir (Ahmad vd., 2024).

Chomjinda vd., (2024) tarafından yapılan çalışmada 2007-2018 yılları arası CO₂ ve LPE verileri kullanılarak, Asya ülkelerinde lojistik verimlilik ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki ilişki ortaya konulmaktadır. Kümeleme yöntemi kullanılarak yapılan analizde, yüksek karbon emisyonuna sahip kümede LPE yüksek çıkmaktadır. Böylece lojistik performanstaki iyileşme ile karbon emisyonlarındaki artış arasında potansiyel bir ilişki olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.



İ.BÖLÜM

LOJİSTİK VE LOJİSTİK PERFORMANSIN TEORİK ÇERÇEVESİ

1.1. Lojistik Performans Kavramı, Önemi, Amacı ve Gelişimi

Lojistik, ekonomi ve toplum yaşamının ayrılmaz bir parçasıdır. Lojistik, bir ürün veya hizmet şeklindeki faydaların, üretim noktasından müşteriye taşınması için gerekli olan çeşitli faaliyetlerin sistematik olarak yönetimi anlamına gelmektedir (Gourdin, 2001, s. 2). Başka bir tanıma göre ise lojistik, satın alma, mal hareketi ve envanterin (ve ilgili bilgi akışının) organizasyon ve pazarlama kanalları boyunca yönetilmesi sürecidir ve kârlılığı en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır (Christopher, 2022, s. 2). De Souza vd. (2007) lojistiği, malların, hizmetlerin ve bilginin ilk kaynağından son tüketiciye verimli akışını planlayan, uygulayan ve kontrol eden değer zincirinin bir parçası olarak değerlendirmektedir. Russell (2000), lojistiği envanterin, hareket halinde ve beklerken, müşterilere hizmet etmek amacıyla yönetilmesi olarak tanımlamaktadır. Hareket halindeki envanter genellikle taşıma araçlarında veya üzerinde bulunurken; bekletilen envanter, genellikle depolarda bulunmaktadır. Ülkeler arasındaki mal, sermaye, bilgi, teknoloji ve insan hareketliliğiyle birlikte sipariş akışı artmakta, bunun sonucunda lojistik faaliyetler gelişmektedir. Dolayısıyla, taşımacılık, depolama, envanter yönetimi ve müşteri hizmetleri, temel lojistik fonksiyonları arasındadır. Lojistiğin en önemli fonksiyonlarından biri olan taşımacılık, ekonominin küreselleşmesinde farklı ithalat ve ihracat pazarlarını dünya çapında birbirine bağlamada kilit bir rol oynamaktadır (Cuturela ve Manole, 2013, s. 189).

Geçtiğimiz yüzyıl boyunca iş dünyasında lojistiğin rolü hem kapsam hem de stratejik önem yönünden oldukça artmıştır. Lojistik sektöründeki ilerlemeler üretim,

dağıtım, satış, depolama gibi işletme faaliyetlerini kolaylaştırdığından, ülkelerin bu alandaki yatırımları küresel ticarete rekabet gücü elde etmelerini sağlamaktadır (Hayaloğlu, 2015, s. 523). Küreselleşme ve artan rekabet gücü, lojistiğin uluslararası ticarete temel unsurlardan biri haline gelmesinde rol oynamıştır. Lojistikte tedarik zinciri entegrasyonu, tam zamanında envanter yönetimi gibi girişimler firmalara hem lojistik operasyonların yönetilmesinde hem de tüm işin yürütülmesinde avantaj sağlarken (Caplice ve Sheffi, 1995, s. 61), taşıma, depolama ve paketleme sorunlarını verimli bir şekilde çözebilmesiyle işletmelerin ve genel olarak ülkenin rekabet gücünün artırılması sağlanmaktadır.

1980'lerde birçok firma, pazarda sürdürülebilir bir rekabet avantajı elde etmek için fiyatları düşürmüş, ürün tasarımında ve iç süreçlerde kalite iyileştirmelerine yönelmiştir (Mentzer ve Williams, 2001, s. 30). Ancak kısalan teknoloji döngüsü göz önüne alındığında, ürün, promosyon veya fiyat değişikliklerinden kaynaklanan avantajları korumak oldukça güçleşmiştir. Şirketler ürün, promosyon veya fiyatlardaki herhangi bir değişikliğin pazarlarında sadece geçici bir etkisi olduğunu bildiklerinden, sürdürülebilir rekabet avantajı elde etmenin yolunu şirketin ürün, promosyon veya fiyat stratejilerindeki değişikliklerde değil, lojistik gibi tamamlayıcı hizmetlerde iyileştirme yapmakta bulmuşlardır (Bowersox vd., 1995, s. 43). Artık birçok firma farklılık yaratmanın bir yolu olarak lojistik yeteneklere önem vermektedir (Anderson ve Narus, 1995, s. 75). Lojistik sektörü dinamik ve rekabetçi bir pazar ortamından güçlü bir şekilde etkilendiği için, bu kavram daha sürdürülebilir iş stratejilerine doğru genişlemiştir (Gruchmann vd., 2019, s. 97).

Musta'ya (2011) göre lojistik, ulusal rekabet gücünün en önemli unsurlarından biridir. Kaliteli lojistik hizmetleri ve altyapıları, ülkeler arasında mal taşımacılığının kolaylaştırılmasında güçlü bir etkiye sahiptir. Son yıllarda lojistik ve taşımacılık sektöründe meydana gelen teknolojik gelişmeler, yönetim ilkelerinin değişimi ve gelişimini, malların ve hizmetlerinin etkinliğini, teslimatların hızını, hizmet kalitesini iyileştirmiş; maliyetlerin, üretim olanaklarının ve enerji kaynaklarının kullanımını daha etkili hale getirmiştir (Cuturela vd., 2013, s. 189). Buna karşılık, verimsiz bir lojistik performans, Hausman vd. (2005)'ne ait çalışmada belirtildiği üzere, ülkeleri ve şirketleri olumsuz yönde etkileyip cirolarını azaltırken, ayrıca zaman ve para açısından yüksek maliyetlere neden olmaktadır.

Lojistik, çok parçalı bir faaliyetler bütünüdür ve bu faaliyetlerin ölçülebilmesi ve performansın izlenebilmesi için bir metrik sistem kullanılması şarttır (Caplice ve Sheffi, 1995, s. 2). Tedarik zinciri boyunca lojistik uygulamalarının hizmet ve maliyet yönlerini değerlendirmek için performans ölçümü gerekmektedir. Lojistik profesyonellerinin sağlam kararlar almak için dikkate alması gereken bilgi hacmi göz önüne alındığında, zamanında ve ilgili bilgiyi raporlayan performans ölçütlerini seçmek, lojistik faaliyetinin etkili yönetimi için kritiktir (Griffis vd., 2007, s. 35). Stratejiler iyi planlamalarla desteklense dahi, yetersiz veya uygunsuz ölçüm sistemleri nedeniyle başarısız olabilmektedir. Hedeflenen performansa ulaşmak için ölçümlerin iyi seçilmesi ve doğru yapılması gerekmektedir (Rose, 1994, s. 179).

Kabak vd. (2018), ülkelerin küresel ortaklarla ticaret ve ulaşım ilişkilerini artıran politikalar oluşturmak için lojistik durumlarını kavramasının önemini vurgulamaktadır. Politikacılar için, lojistik performansına ilişkin bilgiler, uluslarının göreceli konumunu ayırt etmek için karşılaştırmalı bir araç görevi görmektedir (Hadžikadunić vd., 2023, s. 1). Küresel tedarik zincirlerini alt üst eden koronavirüs pandemisinin sonuçları, bu ihtiyacı daha da vurgulamaktadır.

Kavramsal olarak, lojistik performans, firma veya organizasyon performansı kavramının bir alt kümesi olarak görülebilmektedir. Organizasyon performansı yıllar içinde büyük bir çeşitlilik gösteren çok sayıda araştırmanın konusu olmuştur (Chow vd., 1994, s. 23). Lojistiğin stratejik etkilerinin farkındalığının artması (Cheng ve Grimm, 2006, s. 6) ve lojistiği kullanarak müşteri değerini artırmanın faydalarının giderek daha fazla anlaşılması (Mentzer ve Williams, 2001, s. 30) ile lojistik performansının ölçülmesi yüksek bir öncelik haline gelmiştir.

Geleneksel olarak mikro veya organizasyonel lojistik performansı, maliyet ve faaliyet açısından tanımlanmaktadır (Beamon, 1999, s. 339). Toplam lojistik maliyetleri, taşıma, depolama, ambalajlama, envanter yönetimi, ürün kalitesi ve müşteri hizmetlerinin sağlanmasında veya performansında ortaya çıkan tüm maliyetleri içermektedir (Kenderdine ve Larson, 1988, s. 7). Faaliyet açısından ise lojistik performans; stok mevcudiyeti, teslim süresi, zamanında teslimat ve sipariş doğruluğu ile müşteri memnuniyeti gibi unsurlar içermektedir (Lambert ve Harrington, 1989, s. 49).

Lojistik performans; lojistik faaliyetlerin verimliliğine vurgu yaparak, lojistik prensipler dâhilinde, ürünlerin alıcıya yüksek memnuniyet düzeyi, kaliteli ve yeterli lojistik hizmetler ile ulaştırılmasıdır (Erturgut, 2021, s. 155). Lojistik performans, lojistik faaliyetleri yerine getirmedeki etkinlik ve verimlilik olarak da tanımlanmaktadır (Mentzer ve Konrad, 1991, s. 33). Performans ölçümü, belirlenen hedefler çerçevesinde, firmada uygulanan strateji ve yöntemlerin etkinliğinin ve verimliliğinin ölçülmesidir (Baki ve Şimşek, 2004, s. 15).

Güçlü bir lojistik performans, uluslararası ticaret hacimlerinin artırılmasında büyük önem taşımaktadır. Lojistik imkân ve yetenekleri yüksek olan ülkeler, daha hızlı büyüyerek, daha rekabetçi olmaktadır. Ayrıca düşük gelirli ülkelerin artan lojistik performansı, ticaret hacimlerini %15 civarında artırmaktadır (Şimşit Kalender vd., 2014, s. 544). Aksine, yetersiz lojistik altyapısına ve hizmetlerine sahip ülkeler, çoğunlukla kendilerini uluslararası tedarik zincirinin dışında bulmaktadır. Bu senaryolar, ülkelerin ekonomik ivmelerini sekteye uğratarak, potansiyel bir durgunluğa neden olmaktadır. Dolayısıyla, ülkelerin lojistik ve ilgili hizmetlerde gelişim sağlamak amacıyla lojistik performanslarını sürekli olarak küresel seviyede izlemeleri, ölçmeleri ve kıyaslamaları zorunlu hale gelmektedir. Strateji belirleme, altyapı geliştirme veya düzenleyici değişiklik gibi politika kararları almadan önce, ülkenin lojistik durumu ayrıntılı olarak değerlendirilmelidir. Bu değerlendirme, kararların lojistik kalitesini yansıtan net parametrelere dayanmasını sağlamaktadır. Bu amaçla, küresel lojistik koşulları hakkında kapsamlı bir bilgi sunan LPE önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır (Miškić vd., 2023, s. 2).

Performansın tanımlanmasında, Gleason ve Barnum (1982) etkinlik ve verimlilik arasında bir ayrım yapmayı tercih etmişlerdir. Etkinliği, “bir hedefin ne ölçüde başarıldığı” olarak tanımlarken, verimliliği “kaynakların ne ölçüde ekonomik kullanıldığı” şeklinde tanımlamışlardır. Şirketlerin operasyonlarının analizinde çok önemli bir gösterge olan lojistik verimlilik, bir işletmenin “doğru şeyleri doğru şekilde yapmak” yani en az kaynak kullanarak en fazla çıktı elde etmek olarak tanımlanmaktadır (Andrejić, 2013, s. 84). Lojistik verimliliği artırma ve müşteri deneyimi/ilişkilerini iyileştirme yolları arasında bilgi yönetim sistemleri, lojistik hizmet kalitesi ve yetenekleri, lojistik güvenilirliği, personel eğitim programları ve rakiplerden öğrenme yer almaktadır (Burity, 2021, s. 29). “Doğru işi yapmak”

anlamına gelen lojistik etkinlik ise, belirli bir girdi düzeyine göre geliri maksimize etmek için strateji belirlemeye odaklanmaktadır (Wong vd., 2015, s. 687). Öte yandan, Sink, Tuttle ve DeVries (1984), performansın ne anlama geldiğine dair kendi kavrayışlarını ifade etmek için yedi boyut tanımlamışlardır: bu boyutlar etkinlik, verimlilik, kalite, üretkenlik, çalışma yaşam kalitesi, yenilikçilik ve kârlılık/bütçe uyumu şeklindedir.

1.2. Lojistik Performans Ölçütleri

1.2.1 Lojistik Performans Endeksi

Ticari ve lojistik bağlantılar kurmak, gelişmekte olan ülkelerin küresel ticaretten faydalanabilmesi ve küreselleşmenin getirdiği avantajları elde edebilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu faydaların sürdürülebilir şekilde sağlanabilmesi ise, ülkelerin ve firmaların küresel tedarik zincirlerine entegre olabilmesine bağlıdır. Bu entegrasyonda başarı, firmaların malları sınırların ötesinde hızlı, güvenilir ve düşük maliyetle taşıyabilme kapasitesiyle başlamaktadır. LPE ve göstergeleri, ülkeler arasındaki lojistik farkın detaylı bir şekilde değerlendirmesini sağlamaktadır. Belirli bir ülkenin ticaret ve taşımacılığı kolaylaştırma dostluğunu ölçen uluslararası bir kıyaslama aracıdır. LPE aslında, gelişmekte olan ve gelişmiş ekonomilerdeki politika yapıcılar tarafından yakından takip edilen, Dünya Ekonomik Forumu tarafından yayımlanan küresel rekabet endeksi gibi diğer göstergeleri tamamlayan bir araçtır (Kim vd., 2011). Dünya çapındaki lojistik profesyonellerinin birinci elden bilgisine dayanarak, çeşitli göstergeler aracılığı ile tedarik zinciri performansının kapsamlı bir analizini sunmaktadır (Arvis vd., 2007, s. 1). Dünya Bankası'nın nakliyeciler ve taşıyıcılarla ilgili iki yılda bir yaptığı anketten yararlanan LPE, ulusların algılanan lojistik performansını ölçmektedir. Birçok ülke için mevcut olan tek ulusal lojistik performans ölçütü olup, ülkeler arasında performans karşılaştırmasına ve ulusal zorluklar ile fırsatların belirlenmesine olanak tanımaktadır (Arvis vd., 2018, s. 8). LPE, deneyimli lojistik profesyonellerinin algılarına dayanmaktadır (Larson, 2021, s. 3). Bu endeks, gümrük prosedürleri, lojistik maliyetleri ve kara ve deniz taşımacılığı için gerekli altyapının kalitesi hakkında genel bir bakış sunarak ülkeler arasındaki temel farklılıkların analiz edilmesine olanak tanımaktadır (Martí vd., 2014, s. 2982). LPE, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasındaki farklılıkları yansıtmamanın yanı sıra, en az gelişmiş, kara bağlantısı olmayan ülkeler arasındaki farklılıkları da

yansıtmaktadır. LPE sıralamasında üst sıralarda yer alan ülkeler genellikle lojistik endüstrisinde önemli roller oynarken, en alt sıralarda yer alanlar ise aşırı regülasyon ve bürokrasi, yetersiz yatırımlar ve düşük kaliteli hizmetler nedeniyle kısır döngüye girmektedirler. Gelişmekte olan ülkeler arasında, lojistikte başarılı olanlar genellikle imalat sanayi ürünlerinin ihracatının önderlik ettiği ekonomik büyüme yaşayan ülkelerdir (Arvis vd., 2007, s. 1).

Literatür, ülkeler arasında devam eden ticareti engelleyebilecek bir dizi tarife dışı engelin üstesinden gelinmesini sağlayacak ticareti kolaylaştırma tedbirlerine odaklanmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde bu tür önlemler yeterince geliştirilemeyebilir; zayıf altyapı, karmaşık gümrük prosedürleri ve devlet kurumları arasındaki aşırı bürokrasi nedeniyle ticaret maliyetleri artarak, malların sınırlar arasında etkin bir şekilde hareket etmesini engelleyebilmektedir. Ticareti kolaylaştırma önlemlerinin değerlendirmesine, Dünya Bankası tarafından 2007, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 ve 2022 yıllarında yayımlanan LPE aracılığıyla ulaşılabilmektedir. LPE sıralamaları ve göstergeleri, ülkelere reform, düzenleme ve yenilik için argüman oluşturmaya yardımcı olabilecek sağlam ölçütler sunmaktadır. LPE ve göstergeleri, zayıf lojistik performansın maliyetlerini ortaya koyarak, ülkelerin küresel pazarlara etkili bir şekilde erişmesi için lojistik dostu olmayan kısır döngüyü kırmalarına yardımcı olmaktadır (Arvis vs., 2007, s. 1).

2023 yılında yayımlanan son LPE'ye 139 ülke katılım göstermiştir. Endekse katılan ülke sayıları yıllara göre Tablo 1.1'de gösterilmektedir. Bazı ülkelere yeterli sayıda değerlendirme alınamadığı için ülke sayıları her sene değişiklik göstermektedir.

Tablo 1.1

Yıllara göre LPE'ye katılan ülke sayıları ("Dünya Bankası", 2023)

Yıllar	2007	2010	2012	2014	2016	2018	2022
Katılımcı Ülke Sayısı	150	155	155	160	160	160	139

LPE anketinde her uygulayıcı/katılımcı, ticari ortağı olan sekiz ülkenin lojistik performanslarını, altı göstergenin tamamına göre çevrimiçi olarak değerlendirme yapmaktadır. Sekiz ülke seçilirken, katılımcının bulunduğu ülkenin en önemli ihracat ve ithalat pazarları, rastgele seçim ve denize kıyısı olmayan ülkeler için kendilerini uluslararası pazarlara bağlayan komşu ülkeler temel alınmaktadır (Arvis vd., 2012, s.

52). Düşük performanstan yüksek performansa kadar beş puanlık ölçeklerle derecelendirilen altı gösterge Dünya Bankası tarafından aşağıdaki gibi açıklanmıştır (Ojala ve Çelebi., 2015, s. 6):

1. *Takip ve İzlenebilirlik*: Sevkiyatları takip etme ve takip edebilme yeteneğini, gönderilerin izlenme verimliliğini, tam olarak nerede olduğunu ve hangi güzergâhlardan geçtiğini takip etmeyi ifade etmektedir (Hassan, 2024, s. 437).

2. *Lojistik Kalite ve Yetkinlik*: Taşıma operatörleri ve gümrük komisyoncuları tarafından sunulan lojistik hizmetlerin yeterliliğini ve kalitesini ölçmektedir. Ayrıca bu gösterge, müşteri hizmet kalitesiyle ilgili tarafların nasıl davrandığını ve organizasyonlar ile tüketiciler arasındaki ilişkilerin nasıl optimize edildiğini belirtmektedir (Hassan, 2024, s. 437).

3. *Uluslararası Taşımacılık (Uluslararası Sevkiyatlar)*: Rekabetçi fiyatlı gönderilerin ya da sevkiyatların düzenleme kolaylığını ölçmektedir. Bu bileşen hesaplaması, uluslararası gereksinimlere ve makul fiyatlara göre ithalat ve ihracat prosedürlerinin ne kadar basit bir şekilde gerçekleştirilebileceğine bağlıdır (Htun, 2021, s. 34).

4. *Gümrükleme*: Ticareti artırmak ve malların varış noktasına ulaşmasını sağlamak, verimli bir altyapı ile birlikte düzenli gümrük prosedürlerini gerektirmektedir. Gümrükleme sürecinin verimliliğini ve etkinliğini, gümrük kurumları ve gümrük işlemlerinin hızı, basitliği ve öngörülebilirliğini ölçmektedir. Bu, mevcut ticaret mevzuatının uygulanması ve mal ve hizmetler üzerindeki ithalat/ihracat vergilerinin toplanması ile ilgili çeşitli idari prosedürlere dayanmaktadır (Martí vd., 2014, s. 2984).

5. *Zamanlama*: Lojistik hizmet sağlayıcılarının planlanan ve beklenen zaman aralıklarında alıcıya ulaşma sıklığını ölçmektedir. Yüksek rekabet düzeyinde, teslimat programlarına uyulmaması kabul edilemez hale gelmiştir.

6. *Altyapı*: Ülkenin telekomünikasyon, bilgi teknolojileri, limanlar, demiryolları gibi ulaşım altyapısı, ticaret ve taşıma ile ilgili altyapının kalitesini ölçmektedir. Altyapı hizmetlerinin geliştirilmesi, ulaşım maliyetlerini düşürerek, lojistik süreçleri optimize ederken aynı zamanda, enerji maliyetlerini azaltarak üretim maliyetlerini de önemli ölçüde düşürmektedir. Bu durum, firmaların daha büyük ölçeklerde üretim

yapmasına ve küresel pazarlarda rekabet edebilmesine olanak tanımaktadır (Brooks, 2010, s. 1).

LPE raporuna göre, altı gösterge iki kısımda incelenmektedir. İlki gümrük, altyapı ve hizmet kalitesini içeren politika düzenlemeleridir. İkincisi ise takip ve izlenebilirlik, zamanlama ve uluslararası taşımacılığı içeren hizmet sunumu performans çıktılarıdır (Erkan, 2014, s. 1248).

LPE puanları, puan dilimlerine göre dört performans grubuna bölünmektedir. Bu bölümlenedeki amaç, politika yapıcılarının bireysel ülke puanları ve sıralamalarına odaklanmalarından ziyade, geniş tanımlanmış ülke gruplarına odaklanmalarının daha bilgilendirici ve faydalı olmasıdır. Tablo 1.2’de ülkelerin LPE puanlarına göre hangi performans grubunda yer aldıkları yer almaktadır.

Tablo 1.2

LPE ülke sınıflandırması (Turna, 2024, s. 61)

Performans Grubu	LPE Değeri
Zayıf Lojistik Performans Gösterenler	$0 \leq LPE \leq 2.24$
Kısmi Performans Sergileyenler	$2.25 \leq LPE \leq 2.99$
Tutarlı Performans Sergileyenler	$3 \leq LPE \leq 3.49$
Lojistik Dostu	$3.50 \leq LPE \leq 5$

Tablo 1.2’de yer alan grupelemeye göre;

•*Zayıf lojistik performansı gösterenler (LPE’nin en alt %20’lik dilimi):* Gümrük veya altyapıda temel reformların uygulanmasının zor olduğu, kaliteli hizmetlere yatırım yapmak için teşvik bulunmayan, yönetim sorunları olan, ciddi lojistik kısıtlamaları olan coğrafi olarak zorlayıcı (denize kıyısı olmayan) ülkeleri içermektedir (Arvis vd., 2007, s. 20). En az gelişmiş ülkeler arasında yer alan ve lojistik kısıtlamalarla karşı karşıya kalan ülkeleri kapsamaktadır (Hassan, 2024, s. 438).

•*Kısmi Performans Sergileyenler (LPE’nin üçüncü ve dördüncü %20’lik dilimleri):* Bazı temel reformları uygulayan, sektörler arası çalışmada zorluklar bulunan, değişime direnç gösteren, yönetim sorunları bulunan, genellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde görülen lojistik kısıtlamalara sahip ülkelerdir (Arvis vd., 2010, s. 23).

•*Tutarlı Performans Sergileyenler (LPE’nin ikinci %20’lik dilimi):* Reformları tutarlı bir şekilde uygulamak için idari engelleri kolaylıkla aşabilen, giriş engellerini

ortadan kaldırabilen, rekabetçi bir hizmet sektörünü destekleyen ülkelerdir (Arvis vd., 2007, s. 21).

•*Lojistik Dostu (LPE'nin en üst %20'lik dilimi)*: Küresel olarak entegre hizmet sektörü bulunan, sorunsuz prosedürler ve yüksek kaliteli altyapı sahibi, ana reformları (gümrük, altyapı, hizmetler) uygulamak için güçlü birlik ya da ortak yönetimi bulunan, çoğu yüksek gelire sahip olan en iyi performans gösteren ülkelerdir (Arvis vd., 2007, s. 21). "Lojistik dostu" ülkelerde, üreticiler ve tüccarlar lojistik faaliyetlerini üçüncü taraf sağlayıcılara devrederek, kendi ana faaliyetlerine odaklanırken daha karmaşık tedarik zincirlerini etkin bir şekilde yönetmektedirler (Arvis vd., 2014, s. 3).

Ülkelerin bir yıl içindeki karşılaştırmalarını anlamak için gruplar arasındaki ortalama puanlar ve dağılım ölçüleri kritik öneme sahiptir. Politika yapımcılar için, birbirine yakın gruplandırılmış ülkelerin geniş tanımlı gruplarına odaklanmak, tek tek ülke puanları ve sıralamalarından daha aydınlatıcıdır.

LPE'nin yayımlanan 2023 raporuna ait veriler 6 Eylül-5 Kasım 2022 tarihleri arasında toplanarak, 139 ülke hakkında 4090 değerlendirme içermektedir (Arvis vd., 2023, s. 12). Ayrıca 2020-2021 yıllarında yayımlanması planlanan rapor, koronavirüs pandemisinin sebep olduğu taşımacılık aksaklıkları ve küresel tedarik zinciri krizi nedeniyle 2023 yılına ertelenmiştir.

2023 raporunda genel olarak, LPE kapsamındaki ülkelerin puan profili, 2018'den bu yana daha zorlu çalışma ortamına rağmen istikrarlı kalmıştır. Bu durum, lojistik hizmet sağlayıcılarının değişen koşullara uyum sağlama yeteneğini yansıtmakla birlikte, LPE raporları arasındaki temel verilerin sağlamlığını da göstermektedir (Arvis, vd., 2023, s. ix). Çünkü anket, son krizden doğrudan etkilenmeyen yapısal faktörleri (altyapı kalitesi veya gümrük gibi) yakalayabilmektedir. Tablo 1.3'te LPE'nin ilk on ve son on ülkeleri sıralanmaktadır.

Tablo 1.3

LPE 2023 raporuna göre ilk ve son on ülke (Arvis vd., 2023, s. viii)

Sıra	İlk On Ülke	Skor	Sıra	Son On Ülke	Skor
1	Singapur	4.3	130	Suriye	2.3
2	Finlandiya	4.2	131	Venezuela	2.3
3	Danimarka	4.1	132	Küba	2.2

Tablo 1.3 (devamı)

4	Almanya	4.1	133	Yemen	2.2
5	Hollanda	4.1	134	Angola	2.1
6	İsviçre	4.1	135	Kamerun	2.1
7	Avusturya	4.0	136	Haiti	2.1
8	Belçika	4.0	137	Somali	2.0
9	Kanada	4.0	138	Afganistan	1.9
10	Hong Kong, SAR	4.0	139	Libya	1.9

Yayımlanan son 2023 yılı raporunda en yüksek puan alan ilk on ülke yüksek gelirli ekonomiye sahip ülkelerdir. Listenin ilk sırasında 4.3 puanla Singapur yer almakta ve bu ülke uzun süredir lojistik verimlilik, altyapı kalitesi ve gümrük süreçlerindeki etkinliğiyle öne çıkmaktadır. Onu Finlandiya, Danimarka ve Almanya gibi Avrupa'nın lojistikte güçlü ülkeleri takip etmektedir. Bu ülkelerin ortak noktası; gelişmiş ulaştırma altyapıları, dijitalleşmiş tedarik zincirleridir. İlk on ülkenin tamamı ya yüksek gelirli ekonomilerden ya da küresel ticarete stratejik konuma sahip ülkelerden oluşmaktadır. Diğer yandan en düşük LPI skoru alan ülkeler çoğunlukla düşük ve orta-düşük gelirli, farklı kıtalarda yer alan; terör, silahlı çatışma, doğal afet ve siyasi istikrarsız vb. gibi olaylardan etkilenen kırılgan ekonomilere sahiptir; siyasi istikrarsızlık, altyapı yetersizliği ve güvenlik sorunlarıyla mücadele etmektedir. Bu durum lojistik süreçlerin verimliliğini ciddi biçimde sınırlamakta ve ticaretin sürdürülebilirliğini zorlaştırmaktadır. Listenin birinci sırasındaki Singapur 4.3 puan alırken, son sıradaki Libya sadece 1.9 puan almıştır. Bu skorlar, lojistik performansın yalnızca ekonomik kapasiteye değil, aynı zamanda yönetim kalitesine, altyapı yatırımlarına, siyasal ve bölgesel istikrara da doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 1.4'te OECD üyesi olan 38 ülkeye ait LPI skor ve sıralamaları belirtilmektedir:

Tablo 1.4

OECD üyesi ülkelerin LPI Sıralamaları (Arvis vd., 2023, s. 32-33)

Ülke	Skor	Sıra	Ülke	Skor	Sıra
Almanya	4.1	3	İzlanda	3.6	26
Amerika Birleşik Devletleri	3.8	17	Japonya	3.9	13
Avustralya	3.7	19	Kanada	4.0	7

Tablo 1.4 (devamı)

Avusturya	4.0	7	Kolombiya	2.9	66
Belçika	4.0	7	Kosta Rika	2.9	66
Birleşik Krallık	3.7	19	Letonya	3.5	34
Çekya	3.3	43	Litvanya	3.4	38
Danimarka	4.1	3	Lüksemburg	3.6	26
Estonya	3.6	26	Macaristan	3.2	51
Finlandiya	4.2	2	Meksika	2.9	66
Fransa	3.9	13	Norveç	3.7	19
Güney Kore	3.8	17	Polonya	3.6	26
Hollanda	4.1	3	Portekiz	3.4	38
İrlanda	3.6	26	Slovak Cumhuriyeti	3.3	43
İspanya	3.9	13	Slovenya	3.3	43
İsrail	3.6	26	Şili	3.0	61
İsveç	4.0	7	Türkiye	3.4	38
İsviçre	4.1	3	Yeni Zelanda	3.6	26
İtalya	3.7	19	Yunanistan	3.7	19

Tablo 1.4'e göre, OECD ülkeleri genel olarak küresel ortalamanın üzerinde performans sergilese de grup içinde farklı yapıda ülkeler bulunmaktadır. Tabloya göre, Finlandiya, Almanya, Danimarka, Hollanda ve İsviçre gibi ülkeler en yüksek LPI skorlarına sahip olup, lojistik sistemlerinde ileri düzeyde dijitalleşme, güçlü ulaştırma altyapısı ve etkin dış ticaret süreçleri ile öne çıkmaktadır. Bu ülkeler, lojistik performanslarını sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle entegre ederek küresel tedarik zincirlerinde stratejik bir konum elde etmektedirler. Türkiye'nin 3.4 puanla 38. sırada yer alması, Türkiye'nin coğrafi konumu sayesinde lojistik potansiyeli yüksek bir ülke olduğunu, ancak bu potansiyelin tam olarak değerlendirilebilmesi için altyapı, dijital dönüşüm ve sınır ötesi koordinasyon alanlarında ilerleme kaydedilmesi gerektiğini göstermektedir. Genel olarak, OECD ülkeleri içindeki bu farklılıklar, ülkelerin ekonomik gelişmişlik düzeyleri, ulaşım altyapısına yapılan yatırımlar ve lojistik sektöründeki yenilikçilik kapasitesiyle yakından ilişkilidir. Bu nedenle LPI skorları, yalnızca lojistik etkinliği değil, aynı zamanda ülkelerin ticaret politikalarının, altyapı planlamalarının ve küresel tedarik zincirlerindeki rekabetçilik düzeylerinin de bir yansıması olmaktadır.

2018'de olduğu gibi, LPE anketi çevresel sürdürülebilirlik ve lojistik performans ile anketör ülkelere ihracat yaparken emisyon seviyeleri, rota seçimi, araçlar vb. çevre dostu seçenekleri ne sıklıkla talep ettiklerini sorarak ilişkilendirmektedir. Bu sorudaki ifadeler, çok sayıda nakliye seçeneği ve bunların çevresel etkisini ölçmenin çeşitli alternatiflerini barındırmaktadır. Lojistikte çevre dostu seçenekler, daha kısa rotalardan, motorlu taşıtların yakıt sistemlerinden veya taşıma emisyonlarını en aza indirmek için kapasite kullanımını daha verimli hale dönüştürmekten oluşmaktadır (Arvis vd., 2023, s. 5).

LPE anketi ilk yapıldığı zamanlarda, ticaret veya gümrük işlemleri için geçen süreleri kapsıyordu ve anket katılımcısının faaliyet gösterdiği ülkeye odaklanmaktaydı. Ancak, belirli bir ülke için elde edilen sonuçlar küresel anketlerin işlem süresi veya gecikmeleri ölçmede yetersiz olduğu görüldü. Bu nedenle, LPE anketi, lojistiğin daha genel özelliklerine odaklanmak amacıyla 2023 baskısından sonra sonlandırılmıştır (Arvis vd., 2024, s. 2).

Yayımlanan 2023 yılı LPE raporunda, diğer yıllara göre birçok değişiklik bulunmaktadır. Bu değişikliklerden ilki, ülke puan ve güven aralıklarının tek ondalık basamağa dönüştürülmesidir. Bu değişikliğin amacı, anketin ülke derecelendirmeleri için kullanılan Likert ölçeğinde tam sayılar bulunması, bu nedenle benzer ancak aynı olmayan yanıtlara sahip ülkelerin aynı puanları almasıdır. Farklılıklardan ikincisi, sonuçların açıklanması ile alakalıdır. Bu sonuç açıklaması, ülkeler arasındaki puanlarda meydana gelen küçük farklılıklardan ziyade benzer performansa sahip ülke gruplarına daha fazla odaklanmaktadır. Politik açıdan ülkeler arasındaki farklılıkları vurgulamak önemli olduğunda, analiz bu farklılıklara bireysel ülke düzeyinde değil de ülke grubu düzeyinde odaklanmaktadır (Arvis vd. 2023, s. 11). Üçüncü farklılık ise; 2018 yılına kadar, anketin sekiz ülkede lojistik performansının altı göstergesini değerlendirdikleri uluslararası bölüm; katılımcıların çalıştıkları ülkedeki lojistik ortam için niteliksel ve niceliksel veriler sağladıkları ulusal bölüm olmak üzere iki bölümü bulunmaktaydı. 2023 LPE anketinde, yalnızca anketin uluslararası kısmı kullanılmıştır. Katılımcıların anket yorgunluğunu önleyerek cevaplaması daha kolay bir anket oluşturulması ve anketin ulusal kısmının kapsadığı verilerin çoğunun, yeni tedarik zinciri izleme veri setlerinden daha kolay ve daha doğru bir şekilde elde

edilmesi sebebiyle ulusal anket 2023 yılına ait LPE’de kullanılmamıştır (Arvis vd., 2023, s.12).

2023 raporu, lojistik profesyonellerinin geleneksel anketten elde ettiği LPE ve dünya genelindeki ticaretin gerçek hızını ölçen yeni anahtar performans göstergeleri (KPI) ile genişletilmiş bir veri seti sunmaktadır. Yeni KPI'lar, konteyner hareketleri, hava kargolarını ve paketleri kapsayan küresel takip veri kümelerinden türetilmiştir. Ham veriler Dünya Bankası’na Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği tarafından desteklenen Cargo iQ, Marine Traffic, MDS Transmodal, TradeLens ve Dünya Posta Birliği gibi küresel takip girişimleri tarafından sağlanmıştır (Arvis vd., 2024, s. 3). Sadece ankete dayanan 2023 LPE raporundaki yeni KPI'lar, henüz ana LPE göstergelerinin (ülke puanları ve sıralamaları) oluşturulmasına dâhil edilmemiştir. KPI'lar liman veya havaalanı gecikmeleri gibi belirli bağlantıların zamanlamasını veya performansını ölçerken, anket tabanlı LPE, ülke genelindeki lojistik performansının altı göstergesi hakkında bir değerlendirme sunmaktadır (Arvis, vd., 2023, s. ix).

Genel olarak ele alındığında, LPE, genel performansın tüm bileşenlerde iyi performans gösterme yeteneğini yansıtmaktadır, çünkü göstergeler arasında tamamlayıcılık bulunmaktadır. Gümrük, sınır yönetimi, altyapı ve ulaştırma düzenlemeleri alanlarındaki reformlar arasında, birbirini destekleyici nitelikte güçlü sinerjiler mevcuttur. Başarılı ülkeler, lojistik performansının temel belirleyicilerini eş zamanlı olarak iyileştiren bütüncül bir yaklaşım sergilerken, bütünsel olmayan yaklaşımlar genellikle kalıcı iyileşmeler sağlamamaktadır (Arvis vd., 2007, s. 1). Bir bileşendeki zayıf performans, genel performansı aşağı çekmektedir.

1.2.2 Yeni Gelişen Pazarlar Lojistik Endeksi

2011 yılından itibaren her yıl düzenli olarak gelişmekte olan ülke piyasalarının (Kara, 2022, s. 80) lojistik yatırımlarını çekme potansiyeli, Agility Yeni Gelişen Pazarlar Lojistik Endeksi aracılığıyla karşılaştırılmaktadır (Bayraktutan ve Özbilgin, 2015, s. 103). Bu endeks, lojistik ve tedarik zinciri hizmet sağlayıcılarından Agility tarafından finanse edilerek, lojistik sektöründe araştırma ve analizler sunan bir kuruluş olan Transport Intelligence tarafından hazırlanmaktadır. Endeks sıralamaları, analizler ve uzman anketleri bir araya getirilerek, ülkelerin birbirleriyle karşılaştırılması, güçlü ve zayıf yönlerinin değerlendirilmesi ve kısa vadeli gelişim

potansiyellerinin ölçülmesi sağlanırken, gelişmekte olan ekonomiler arasındaki ilişkiler ve gelişmekte olan ülkeler ile gelişmiş ülkeler arasındaki ticaret akışlarını incelemektedir (“Agility”, 2014, s. 1). Endeks gelişmekte olan 50 ülkede lojistik pazarı için bir analiz sunmakta ve her pazarın karmaşıklığını, bağlantılılığını ve sunduğu fırsatları yansıtarak ülkelerin lojistik pazar gelişimi açısından performanslarını analiz etmektedir (“Agility”, 2025, s. 10).

2020 yılından itibaren yurtiçi lojistik fırsatları, uluslararası lojistik fırsatları, iş yapma temelleri olmak üzere üç temel alan incelenirken, 2022 yılında dijital hazırlık temel alanı eklenmiştir (“Agility”, 2022, s. 6). Bu endekste 550’den fazla ticaret ve lojistik sektörü uzmanının görüşlerini içeren bir anket yürütülmektedir. Tablo 1.5’te Yeni Gelişen Pazarlar Lojistik Endeksi’nin dört temel alanı ve bunların alt boyutları yer almaktadır.

Tablo 1.5

Yeni Gelişen Pazarlar Lojistik Endeksi temel alanları ve alt boyutları (“Agility”, 2025, s. 10)

Temel Alanlar	Alt Boyutlar
Yerel Lojistik Fırsatları	Yerel lojistik pazarları – büyüklük ve büyüme Ekonomi – büyüklük ve büyüme Nüfus – büyüklük ve büyüme Gelir eşitsizliği Kentleşme İşletme kümelerinin gelişimi
Uluslararası Lojistik Fırsatları	Uluslararası lojistik pazarları – büyüklük ve büyüme Lojistik yoğun ticaret – büyüklük ve büyüme Altyapı kalitesi ve bağlantılılık Sınır prosedürleri – zaman ve maliyet
İş Yapma Temelleri	Düzenleyici ortam Kredi derecelendirmesi Sözleşme uygulamaları ve yolsuzlukla mücadele çerçeveleri Enflasyon ve fiyat istikrarı Suç ve şiddet maliyetleri Pazar erişilebilirliği ve yerel istikrar

Tablo 1.5 (devamı)

Dijital Hazırlık	Emisyon yoğunluğu Yenilenebilir enerji karışımı Dijital iş modelleri ve çevrimiçi ticaret Girişimcilik riski Dijital beceriler ve beşerî sermaye İşletme finansmanı erişimi
------------------	--

Tablo 1.5’te yer alan yerel lojistik fırsatları, gelişen pazarların performansını ve yerel talebi sürdürebilme ve geliştirme potansiyelini ölçerken; uluslararası lojistik fırsatları, ticaret odaklı lojistik hizmetlere olan iç ve dış talebi ve pazarların sınır ötesi lojistik operasyonlarını kolaylaştırma kapasitesini ölçmektedir. İş yapma temelleri gelişen pazarların iş ortamının sağlamlığını, adil oluşunu ve gücünü, hukukun üstünlüğünü ve pazar bağımsızlığını ölçmektedir. Dijital hazırlık ise gelişen bir pazarın dijital odaklı, becerikli, yenilikçi ve sürdürülebilir bir ekonomi olma potansiyelini ve ilerlemesini analiz etmektedir (“Agility”, 2025, s. 10).

Endeksin ilk yapıldığı 2011 yılında 20 ülke varken, 2015 yılında 45 ülke ile genişleyerek, 2019 yılından itibaren 50 ülke ile devam etmektedir. Tablo 1.5’te son yayımlanan Yeni Gelişen Pazarlar Lojistik Endeksi’ne göre en iyi performans sergileyen gelişmekte olan ilk 5 ülke verilmektedir. Ayrıca kötü performans sergileyen son beş ülke de Tablo 1.6’te sıralanmaktadır.

Tablo 1.6

Yeni Gelişen Pazarlar Lojistik Endeksi’ne göre ilk ve son beş ülke (“Agility”, 2025, s. 11)

Sıra	Ülke	Yurtiçi Lojistik Fırsatları	Uluslararası Lojistik Fırsatları	İş Yapma Temelleri	Dijital Hazırlık	Genel Puan
1	Çin	8.58	9.65	6.37	8.47	8.58
2	Hindistan	7.59	7.49	6.03	5.76	6.94
3	Birleşik Arap Emirlikleri	5.53	5.90	8.53	6.55	6.31
4	Suudi Arabistan	5.61	6.07	7.45	5.82	6.08
5	Malezya	5.26	5.78	7.72	6.41	6.04
46	Libya	4.66	4.33	3.53	3.94	4.23
47	Angola	4.56	4.39	2.39	3.72	4.00
48	Mozambik	4.39	4.29	2.44	4.04	3.99

Tablo 1.6 (devamı)

49	Myanmar	4.21	4.26	3.62	3.35	3.96
50	Venezuela	4.97	4.02	0.34	3.67	3.69

Tablo 1.6'ya göre Çin, büyük bir iç pazar ve gelişmiş altyapısı ile yurtiçi lojistik fırsatlarında en yüksek puana sahiptir. Ayrıca Çin, ekonomik büyüklüğü ve gelişmiş lojistik altyapısı sayesinde uluslararası lojistik fırsatlar alanında da lider konumdadır. İş yapma temelinde, düşük vergi oranları, modern altyapı ve düzenleyici reformlar sayesinde Birleşik Arap Emirlikleri lider konumdadır. Agility 2025 raporunda son sıralarda yer alan Libya, Angola, Mozambik, Myanmar ve Venezuela; siyasi istikrarsızlıktan kaynaklanan krizler ve yatırım güveninin sarsılması, ekonomik kırılganlık, yetersiz altyapı, düşük dijitalleşme oranları ve zayıf iş ortamı gibi ortak sorunlardan dolayı geride kalmaktadır.

1.2.3 Diğer Lojistik Performans Göstergeleri

Birçok yönetici, temel yönetim görüşünü sağlamak ve uygun davranışları yönlendirmek için yerleşik ölçütlere güvenmektedir. Organizasyonda uzun süredir kullanılan ölçütler, zaman içindeki eğilimlerin izlenebilmesi ve takibin kolaylığı nedeniyle daha cazip gelmektedir. Ancak, çoğu şirketin öncelikleri zamanla pazar ve rekabet dinamikleri nedeniyle değişmektedir. Bu değişimleri dikkate alan şirketler ve yöneticiler, değişen organizasyonel durumlara uygun yeni veya farklı ölçütleri belirleyebilmeli ve seçebilmelidir (Griffis vd., 2007, s. 35).

Lojistik performans çok boyutlu olduğundan, performans ölçümü için tek bir ölçü yeterli olmamaktadır. Bunun yerine, araştırmacılar ve yöneticiler için amaç, kısa ve uzun vadeli perspektiflerde önemli olduğu düşünülen performans boyutlarının çoğunu, toplu olarak yakalayan bir dizi ölçü bulmaktır. Geleneksel lojistik performans ölçüleri, hizmet (sipariş döngü süresi, sipariş karşılama oranları, hasar oranları, sipariş toplamada hata oranları vb.), maliyet (sipariş başına maliyet, birim başına lojistik maliyeti, birim başına depolama maliyeti vb.), aktif kârlılık (lojistik varlıklarına yapılan yatırımın istenen finansal getirileri sağlama derecesi) (Brewer ve Speh, 2000, s. 82), müşteri memnuniyeti ve çalışan memnuniyeti gibi ölçümleri içermektedir (Chow vd., 1994, s. 24). Ancak bu ölçümler lojistik sektörünün üyesi olduğu tedarik zincirindeki firmaların etkileşimleri, tedarik zincirinin esnekliği, gibi birçok sorunu göz ardı etmektedir.

Lojistik literatürü içinde bazı performans ölçüm çerçeveleri bulunmaktadır. Literatürde Mentzer ve Firman (1994); lojistik performansının ölçümü ve kontrolü, performans ölçümlerini toplamak ve raporlamak için bilgi sistemleri, iyi performans ölçütlerinin ne olduğu, varyans analizi ve düzeltme faaliyetleri olmak üzere dört geniş alanı kapsayan bir performans ölçüm çerçevesi önermektedir.

Güvenilirlik, esneklik, maliyet tabanlı lojistik performans göstergeleri ve faaliyet tabanlı lojistik performans göstergeleri ölçüm çerçevelerinin arzu edilen özellikleri ana hatlarıyla belirtilerek belli bir dereceye kadar rehberlik sağlanmaktadır; ancak ölçüm ihtiyaçlarının her zaman evrensel olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

1.2.3.1. Güvenilirlik, esneklik ve maliyet tabanlı lojistik performans göstergeleri

Maliyet tabanlı hesaplama, esneklik ve güvenilirlik göstergeleri, lojistik performansın ölçümünde kullanılabilecek göstergelerdendir. Tanyaş, Sıcaş, İnaç ve Tan (2015) yaptıkları çalışmalarında lojistik performansı ölçmek için Tablo 1.7’de yer alan göstergeleri kullanmaktadırlar.

Tablo 1.7

Güvenilirlik, esneklik ve maliyet tabanlı lojistik performans göstergeleri (Tanyaş vd., 2015, s. 25)

Göstergeler	Performans Kriterleri
Güvenilirlik	Sipariş Tam Karşılama Oranı (%)= Hatasız (miktar, çeşit, zaman açısından) Gönderilen Siparişler / Toplam Siparişler
	Teslimat Güvenilirliği(%)= Teslim Edilen Miktar / Söz Verilen Miktar
	Zamanında Teslimat Oranı (%)= Söz verilen tarihte (müşteri ile anlaşılan) Teslim Edilen Sipariş Sayısı / Toplam Sipariş Sayısı
	Hasarsızlık Oranı (%)= Hasarsız Gönderilen Siparişler / Toplam Siparişler
Maliyet	Tedarik Zinciri Maliyeti Oranı (%)= Toplam Tedarik Zinciri Maliyeti(TL) / Toplam Satış Geliri (TL)
Esneklik	Sipariş Miktar Değişikliği Karşılama Oranı(%)= Karşılanan Sipariş Miktarı Değişikliği Sayısı / Toplam Sipariş Miktar Değişikliği Sayısı
	Acil Siparişleri Karşılama Oranı (%)= Karşılanan Acil Sipariş Sayısı / Toplam Sipariş Sayısı
	Özel Sipariş Karşılama Oranı (%)= Karşılanan Özel Sipariş Sayısı / Toplam Özel Sipariş Sayısı
	Sipariş Ürün Değişikliği Karşılama Oranı(%)= Karşılanan Sipariş Ürün Değişikliği Sayısı / Toplam Sipariş Ürün Değişikliği Sayısı

Maliyet muhasebesi ölçütleri, özellikle verimliliğin çeşitli boyutlarını değerlendirmede faydalı olabilmektedir. Ancak, bu ölçütler bir organizasyondan diğerine her zaman karşılaştırılabilir değildir. Muhasebe uygulamalarındaki değişiklikler, aynı organizasyon içinde zaman içinde yapılan karşılaştırmaları engelleyebilmektedir (Chow vd., 1994, s. 24). Hem finansal ölçütler hem de maliyet muhasebesi verileri için ortak zorluklar bulunmaktadır. Bu tür veriler genellikle gizli kabul edildiğinden, birçok firma dışarıya bilgi vermekte isteksiz davranmaktadır. Ayrıca, organizasyonlar ya da zaman dilimleri arasında karşılaştırma yaparken, standartlar veya muhasebe yöntemlerindeki farklılıklar sorun teşkil etmektedir (Dess ve Robinson, 1984, s. 266).

1.2.3.2. Faaliyet tabanlı lojistik performans göstergeleri

Lojistik, ham madde temininden, üretime ve müşteriye ulaştırılmasına kadar malların, yönetimi, taşınması, fiziksel dağıtımı, üretim planlaması, talep tahmini, satın alma ve stok yönetimi ve bunlarla ilgili bilgi akışı içeren geniş bir dizi faaliyeti kapsamaktadır (Hesse ve Rodrigue, 2007, s. 2). Lojistik faaliyetlerin amacı kalite standartları dâhilinde, malların üretim aşamasından itibaren, fiziksel dağıtım fonksiyonu ile malzeme yönetimi fonksiyonunun birbiriyle uyumlu olarak çalışmasının sağlanarak müşteriye kolaylıkla ulaştırılmasıdır (Kaya, 2003, s. 137). Tek bir lojistik faaliyet bile diğer faaliyetleri etkileyerek maliyetleri değiştirebileceği için, rekabet avantajı elde edebilmek için tüm faaliyetler planlı şekilde yönetilmelidir.

Lojistik performans ölçümleri faaliyet tabanlı olarak da yapılmaktadır. Bu faaliyetlerden bazıları envanter ve stok yönetimi, depolama, talep tahmini gibi faaliyetlerdir. Firmanın stratejilerine ve hedeflerine göre pek çok performans ölçüsü ortaya çıkmaktadır. Ayrıca araştırmacılar tarafından yapılan incelemeler sonucunda da çok sayıda performans ölçütü ortaya konulmaktadır. Bu performans ölçümlerinde başarı ve gelişimden bahsedebilmek için, firmanın stratejilerine uygun sistemi ve ölçüleri kullanması önem arz etmektedir.

Tablo 1.8’de lojistik performans ölçümü ile ilgili faaliyetlerine göre kullanılan ölçütlerin bir listesi bulunmaktadır. Tablo 1.8’de yer alan, değerlendirme için seçilen ölçüler, lojistik yöneticileri arasında öngörülen yakınlık, bilinirlik ve kullanımları nedeniyle seçilmiştir. Tanyaş vd. (2015) yaptıkları çalışmalarında lojistik performans

ölçümünde güvenilirlik, maliyet tabanlı ve esneklik göstergelerinin yanı sıra taşımacılık, depolama, stok yönetimi ve müşteri hizmetleri olarak dört lojistik faaliyeti de kullanılmaktadır.

Tablo 1.8

Lojistik faaliyetlere göre performans kriterleri (Baki ve Şimşek, 2004; Griffis vd., 2007, s. 38; Tanyaş vd., 2015, s. 26-27)

Lojistik Faaliyet	Performans Kriterleri
Nakliye	İthal edilen ürünün gümrükte bekleme süresi (gün), sevk edilen malların dolar bazında tutarı, transit süre (sefer süresi) (gün veya saat), yükleme hataları, zamanında teslimat yüzdesi, sevkiyat başına hacim/ağırlık/değer (desi/ton/tl), toplam tedarik zinciri çevrim süresi, araç içi ve dışı temizlik, araç doluluk oranı (%), acil yükleme, yüzde.....üzeri dolulukla taşıma yapan araç sayısı (adet), araç-mil başına yükleme sayısı, nakliye maliyetinin toplam lojistik maliyetindeki oranı (%), zamanında sevkiyat, taşımacılık kaynaklı karbon emisyonu miktarı (karbon ayak izi), nakliye dokümantasyonu hata sayısı (adet), toplama-yükleme doğruluğu, yükleme-boşaltma süresi (saat), birim sevkiyat başına kaç kg taşındığı, filo kapasite kullanım oranı (%), taşımacılık firesi (%).
Stok Yönetimi	Stok bulundurma maliyeti, envanter devir oranı, ürün bulunabilirlik oranı, arzın stokta kalma süresi, stok gün sayısı/stok devir hızı, stok bulundurmama, mevcut stok seviyesi, stok doğruluğu, stokların tüketilme süresi (hafta), ortalama geri sipariş doldurma süresi, tedarik zinciri içindeki toplam stok miktarı, Stok tükenmesi nedeniyle kaybedilen satışlar, yedek parça stok miktarı (TL vd.).
Depolama	Depo kapasitesinden yararlanma, depo işçi verimliliği, depo yerinin seçimi, depo çevrim zamanı (ortalama mal kabul, yerleştirme, toplama, hazırlama ve sevk süresi), depolama maliyetinin toplam lojistik maliyetindeki oranı (%), depo firesi (%), lokasyon hatası/lokasyon sayısı, depo sevkiyat doğruluğu (%), iş kazası kayıp gün sayısı, depo kaynaklı ekstra nakliye ücreti ödemesi, fazla mesai oranı, depo doluluk oranı (%), depo stok kayıt doğruluğu (%), denetim sonuçları.
Talep Tahmini	Talep tahmininin doğruluğu.
Üretim Planlama	Ana üretim programının etkinliği, üretimde esneklik, müşteriye göre üretim-teslimat.
Sipariş İşleme	Temin süresi, siparişin gecikme süresi, sipariş doğruluğu, sipariş döngü süresi, sipariş yerine getirme, ortalama sipariş döngü süresi, hatasız sipariş tamamlama, sipariş döngü süresi değişkenliği, sipariş prosedürü kolaylığı, ürünlerin toplama işlemi sırasında yapılan hataların yüzdesi, geri gelen siparişler.
Paketleme	Özel paketleme hizmeti sunma.
Malzeme Elleçleme	Verimlilik (elleçleme miktarı/adam-saat, toplama sayısı/alan), doğru ekipman kullanımı.
Satın Alma	Tedarikçi sayısı seçimi, tedarikçi geri çevirme oranı, satın alma sipariş çevrim süresi.

Tablo 1.8 (devamı)

Müşteri Hizmetleri	Kusursuz mal teslimi, günlük satış veya satın alma siparişi işlem sayısı, talepleri karşılama yüzdesi, sipariş işleme süresi, sipariş iadeleri, sipariş izlenebilirlik oranı, teslimat güvenilirliği, müşteri hizmetleri maliyetinin toplam lojistik maliyete oranı, esneklik, zamanında teslimat ve toplama, müşteri sorularına yanıt verme süresi, teslim performansı, teslim süresi, müşteri bilgi isteklerini cevaplama, tekrar gelen müşteri sayısı, her bir sipariş satırında talep edilen ürünlerin müşteriye teslim edilme oranı, müşteri hizmet seviyesi, teslimat kusurları, müşteri şikâyetleriyle ilgilenme, işlem, irsaliye, faturalama, dokümantasyon hataları.
Diğer	Dağıtım organizasyonunun etkinliği, lojistik maliyetlerin satışlara oranı, kişi başına saatte toplanan ürün sayısı, birim başına lojistik maliyet, lojistik maliyetlerin satışlara oranı.

Faaliyet tabanlı lojistik performans göstergeleri özellikle verimlilik ve etkinlik olmak üzere birçok alanda hedef gerçekleşmesini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ancak bireysel performans göstergelerine dar bir odaklanma, kolayca hatalı analizlere veya hatalı karar alma süreçlerine neden olabilmektedir. Araştırmacılar veri toplamada güçlük yaşayabilir ve veriler organizasyonlar arasında karşılaştırılabilir olmayabilmektedir (Chow vd., 1994, s. 24).

1.3. Lojistik Performansı Artırma Yöntemleri

Lojistik yöneticilerinin, tedarik zincirinin tüm üyelerinin operasyonel etkinliğini artırmak amacıyla kullanabilecekleri birçok teknik bulunmaktadır. Bu teknikler, belirli bir lojistik sürecinin nasıl işlediğini açıklamak, var olan ya da olası sorunların nedenlerini belirlemek, iyileştirme ve çözüm yolları sunmak için kullanılmaktadır. Balık kılçığı diyagramı ya da akış diyagramı, beyin fırtınası gibi diyagramlarla bir sürecin nasıl çalıştığını anlatmaya yardımcı olan araçlar, lojistik performansı artırmaya yönelik araçlardan bazılarıdır. Bu diyagramlar, bir durumun oluşmasının potansiyel sebepleri ile analiz edilen durum arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Gourdin, 2001, s. 249-251).

Kıyaslama (Benchmarking), performansı artırabilmek için kullanılan araçlardan biridir. Kıyaslama, sektördeki en iyi uygulamaları araştırarak, bu uygulamaların hayata geçirilmesi yoluyla yüksek performansa ulaşma süreci anlamına gelmektedir (Camp, 1989, s. 3). Kıyaslama ile bir organizasyonun performansını iyileştirmek için dünyanın herhangi bir yerindeki organizasyonun kullandığı en iyi uygulamalar tespit edilerek, uygulanabilmektedir (Kumar vd., 2006, s. 294). Lojistik sektöründe en iyi uygulama, müşterinin talep ettiği hizmet

seviyelerine, lojistik sağlayıcıya minimum maliyetle ulaşmak olarak tanımlanmaktadır. Kıyas olarak seçilen birim aynı kurumsal yapı içinde veya dışında olabilmektedir; müşteri, rakip, rakip olmayan veya tedarikçi olabilmektedir; tamamen farklı bir sektörde ve/veya farklı bir pazarda olabilir. Tek kriter, seçilen organizasyonun söz konusu görevleri diğerlerinden daha iyi yerine getirdiği konusunda genel olarak kabul görmesidir (Gourdin, 2001, s. 251-252).

Dünya Bankası'nın yayımlamış olduğu LPE raporunda lojistik performansı artırmak için tavsiyeler bulunmaktadır. LPE'si düşük olan ülkelerde, performansın iyileştirilmesinde altyapısal kapasitenin geliştirilmesi temel bir ön koşuldur (Arvis vd., 2023, s. 3). Bununla birlikte, lojistik alanında sürdürülebilir ve yüksek düzeyde bir performans elde etmek maksadıyla, kamu politikalarının ve özel sektörün gelişimini içeren daha kapsamlı ve bütüncül bir müdahale stratejisi gerekmektedir. LPE, politika yapıcılarının geleneksel "ticaret kolaylaştırması" yaklaşımının ötesine geçmeleri gerektiğini ileri sürmektedir. Söz konusu yaklaşım genellikle gümrüklerdeki fiziki altyapı ve bilgi teknolojilerine odaklanmakla birlikte, lojistik hizmetler piyasalarının da reforma tabi tutulması ve özellikle sınır kontrollerinde faaliyet gösteren kamu kurumları arasındaki koordinasyon sorunlarının minimize edilmesi gerekmektedir. (Arvis vd., 2007, s. 1).

Lojistik performansı ve verimliliği artırabilmek için uygulanabilecek diğer yaklaşımlar şunlardır (Tanyaş vd., 2015, s. 27);

- Ağ Tasarımı: Bir lojistik ağında, tedarikçiler, üretim tesisleri ve depolardan oluşan bir sistem, hammadde teminini, bu hammaddelerin bitmiş ürünlere dönüştürülmesini ve nihai ürünlerin müşterilere dağıtımını yönetmek amacıyla organize edilmektedir. Ağ tasarımı, müşteri talepleriyle ilgilenirken, üretim, tedarik, depolama ve taşımayla ilgili sabit ve değişken maliyetlerin toplamını en aza indirmek amacını taşımaktadır (Cordeau, Pasin ve Solomon, 2006, s. 60).

- Çağdaş Depo Tasarımı ve Yönetimi: Depo yönetiminin şirketler açısından temel amacı, tedarik zinciri boyunca operasyonel verimliliğin artması, maliyetlerin düşürülmesi, mal ve ürünlerin etkili ve verimli bir şekilde akışını sağlamaktır. Bu amaçlar, envanter seviyelerinin kontrol edilmesi, ürün hareketlerinin takibi ve depo düzeni ile operasyonlarının maliyetlerini en aza indirirken müşteri memnuniyetini en üst düzeye çıkaracak şekilde optimize edilmesini kapsamaktadır (Mohamud vd.,

2023, s. 61). Depoların kullanımı son zamanlarda daha yenilikçi teknolojilerin bu alana entegre edilmesiyle popülerlik kazanmıştır. Çağdaş depo tasarımları elektronik depo, gerçek zamanlı izleme sistemi ve depo güvenliğini artıran gerçek zamanlı konum sistemleri gibi birçok yeni fırsat sunmaktadır (Shashidharan ve Anwar, 2021, s. 1186).

- Çapraz Sevkiyat: Bir deponun geleneksel depolama ve sipariş toplama işlevlerini ortadan kaldıran, ancak yine de alma ve sevkiyat işlevlerine hizmet etmesine olanak tanıyan bir lojistik tekniğidir. Burada amaç, sevkiyatların minimum bekleme süresiyle araçlar arasında depolama yapılmadan doğrudan aktarılmasıdır (Bartholdi ve Gue, 2004, s. 235). Çapraz sevkiyat stratejisi, farklı boyutlardaki sevkiyatları aynı varış noktasına entegre etmeyi ve bu sayede kamyonların kapasitesini tamamlarken taşıma maliyetlerini azaltmayı ve şirketler için kâr elde etmeyi amaçlamaktadır. Aynı zamanda çapraz sevkiyat sayesinde sipariş döngü süresi azalmaktadır; bu da dağıtım ağının esnekliğini ve yanıt verme kabiliyetini artırmaktadır (Apte ve Viswanathan, 2000, s. 292).

- Etkin Paketleme: Etkin ve verimli ambalajlama sayesinde ürünün farklılaştırılması ile satışları artırma, maliyetlerin düşürülmesi, özellikle de ambalaj alımları ve atık yönetimi gibi lojistik maliyetlerin azaltılması sağlanarak, tedarik zincirinin verimliliğinin artırılmasına katkı sağlanmaktadır (García-Arca vd., 2006, s. 303). Depodaki tüm lojistik faaliyetler, paketlemenin nasıl yapılandırıldığı ve nasıl ele alındığına bağlı olduğu için paketleme, envanter sistemini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden paketleme, bir şirketin maliyeti ve verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Molina-Besch ve Pålsson, 2014, s. 139).

- Etkin Tüketici Yanıtı: Tedarik zinciri içerisindeki pazarlama ve lojistik süreçlerinin entegre bir perspektifle ele alınmasının gerekliliğini ön plana çıkarmakta ve işletmelerin farklı girişimler aracılığıyla bu faaliyetlerine bütüncül bir yaklaşım sergileyebilecekleri bir sistemin oluşturulmasını hedeflemektedir (Reyes ve Bhutta, 2005, s. 347). Müşteri taleplerinin maliyet etkin, daha hızlı ve tam zamanında karşılanması amacıyla, lojistik akışı dahilindeki tüm paydaşların eş zamanlı ve bütünsel bir biçimde bilgi paylaşımını mümkün kılan, tüketici odaklı bir sistemdir (Stock ve Lambert, 2001, s. 40).

- **Lojistik Bilişim Sistemleri:** Lojistik faaliyetlerle ilgili olarak dış taraflarca ihtiyaç duyulan operasyonları destekleyen günlük olaylar hakkında bilgi işlemeyi karşılayan, aynı zamanda yönetimsel ve stratejik faaliyetler için gerekli olan, bir organizasyonun dahili sistemidir (Siregar, 2018, s. 251). Lojistik bilgi sistemleri, lojistik veri ve bilgilerin yönetilmesinde kolaylık sağlarken, hammadde planlaması, analizi ve dağıtımı için doğru lojistik bilgilere ulaşmaya çalışan bir yönetim sistemidir. Böylece lojistik sektöründeki iş akışı, raporlarının hazırlanması ve malların dağıtımı kolaylaşmaktadır. Satış fiyatı, maliyet fiyatı ve stok bakiyesi gibi bilgilerin doğruluğu, bu bilgilerin kullanacak olan taraflarla ilişkilerin geleceği için oldukça önemlidir (Hidayat, 2014, s. 707).

- **Lojistik Köyler:** Bir lojistik köy, bir bölgedeki tüm ulusal ve uluslararası taşımacılık, lojistik ve mal dağıtım faaliyetlerinin ticari temelde çeşitli operatörler tarafından gerçekleştirildiği bir merkezdir. Lojistik köyler, taşımacılık, depolama ve dağıtım hizmetlerinden sorumlu kuruluşlar arasında ittifaklar oluşturmaktadır. Ayrıca, büyük bir şehrin yakınında bulunan bir lojistik köy, kentsel alanlarda mal hareketlerinden kaynaklanan trafik sıkışıklığı (Awasthi vd., 2011, s. 98), bölgesel rekabetçilik ve yaşam kalitesi gibi kentsel yük taşımacılık sorunlarına verimli bir çözüm sunabilmektedir (Ballis ve Mavrotas, 2007, s. 213). Taşımacılık ağlarında lojistik merkezlerinin kullanımı, taşıma maliyetlerini bağlantı yollarının sayısını, enerji tüketimini ve katma değerli hizmetleri önemli ölçüde azaltmaktadır (Ruiz-Meza vd., 2021, s. 1).

- **Müşteri İlişkileri Yönetimi:** Müşteri ilişkileri yönetiminin uygulanması, müşterileri kazanıp elde tutarak, rakiplerle rekabet etmek amacıyla inovasyon ve teknoloji kullanımı ile birleştirilmektedir. Lojistik sektöründe, şirketler müşteri ilişkileri yönetimi kullanarak en iyi hizmeti sunmaktadır ve rakipleriyle rekabet etmek için bu stratejiyi benimsemektedir (Sudirjo vd., 2024, s. 225).

- **Rota Optimizasyonu:** Taşıma operasyonlarının en az mesafe ve optimum araç kullanımı prensipleri doğrultusunda planlanması, araç kapasitelerinin etkin bir şekilde değerlendirilmesine ve dolayısıyla yakıt tüketiminin minimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bu optimizasyon, toplam taşıma maliyetlerinde kayda değer bir azalma potansiyeli yaratmaktadır. Mesafe ve yakıt tüketimindeki bu düşüş aynı zamanda CO₂ emisyonlarının da azalmasına katkıda bulunarak sürdürülebilir çevre

yönetimi hedeflerine ulaşılmasına önemli bir destek sağlamaktadır (Gümüş vd., 2022, s. 1104).

- Sürekli Gelişim ve İnovasyon: İnovasyon, lojistik ve tedarik zinciri gibi her özel alanda uygulanabilen, ürünler veya süreçlerle alakalı sorunlara çözümler bulma ve bu çözümleri ölçeklendirme yoluyla uyumlama ve iyileştirme aracı olarak tanımlanmaktadır (Betts ve Bloom, 2014, s. 5). Firmalar arası rekabetin artması ve sermaye yetersizliği gibi çevresel faktörlerin inovasyon ihtiyacı yarattığı ifade edilmektedir. Firmaların sermayeye erişememesi, onları kaynaklarını nasıl kullandıkları konusunda yaratıcı olmaya zorlamakta böylece firmaların lojistik süreçlerinde ve hizmet sunumlarında yenilik yapmalarına yol açmaktadır (Grawe, 2009, s. 369). Lojistik süreçlerindeki yenilikçilik, lojistik yeteneklerini farklılaştırmanın ve böylece sürdürülebilir rekabet avantajı elde etmenin önemli bir yolu olarak görülmektedir (Acar ve Günsel, 2010, s. 2).

- Tam Zamanında Yönetim Felsefesi: Tüm süreçlerin gerekli parçaları gerekli zamanda üretmesi ve süreçleri bir arada tutmak için sadece minimum stokun elde bulundurulması yoluyla üretim teslim süresinin büyük ölçüde kısaltıldığı bir yönetim felsefesidir (Sugimori vd., 1977, s. 555). Lojistik, tedarik zincirindeki taşıma ve depolama faaliyetlerini içerdiği için, firmalar süreçlerdeki israfı belirlemek ve hizmeti iyileştirmek amacıyla tam zamanında (JIT) felsefesini benimseyebilmektedir. Dağıtım ihtiyaçlarını karşılamak için gerekli olan iş gücü ve tesis gereksinimlerini planlamak, tedarikçi ve müşteri iş birlikleri sayesinde lojistik hizmet kalitesini artırmak gibi örnekler JIT felsefesinin sonucudur. Sonuç olarak, JIT'in israfı azaltma ve hizmet iyileştirmeye yönelik felsefi vurguları, iş lojistiğinin temel unsurları olan müşteri hizmetleri, sipariş işleme, envanter yönetimi ve taşımacılık gibi birçok alanda uygulanabilmektedir (Lai ve Cheng, 2009, s. 5).

- Tedarikçi İlişkileri Yönetimi: Pazara ürün tedarik eden herkes -üreticiler, ithalatçılar, toptancılar, perakendeciler ve kiralama şirketleri de dâhil olmak üzere- tedarik zincirinin bir parçasıdır (Parthiban vd., 2014, s. 2312). Lojistik başarı göstergesi olarak değerlendirilen tedarikçi performansı, tedarikçinin zamanında teslimat, maliyet, teknik destek gibi operasyonel faaliyetlerine odaklanmaktadır (Pikousova ve Prusa, 2013, s. 1). Tedarikçi seçimi, işletme performansını doğrudan etkileyen en kritik faktördür. Tedarikçiler, işletmelerin iş ortaklarıdır ve sergiledikleri

performans, tüm tedarik zincirinin başarısını şekillendirmektedir (Chan ve Kumar, 2007, s. 418).

- Tersine Lojistik: Ters Lojistik Konseyi'ne göre tersine lojistik, "değerin yeniden kazanılması veya uygun şekilde bertaraf edilmesi amacıyla hammadde, süreç içi envanter, bitmiş ürünler ve ilgili bilgilerin tüketim noktasından kaynağına doğru verimli ve maliyet etkin akışının planlanması, uygulanması ve kontrol edilmesi süreci" olarak tanımlanmaktadır (Meade ve Sarkis, 2002, s. 283). Tersine lojistik, çevresel etkisi düşük olan, finansal performansı ve müşteri memnuniyetini artıran sürdürülebilir iş uygulamalarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu da organizasyonlara sürdürülebilir rekabet avantajı sağlamaktadır (Fernando vd., 2022, s. 92). Çevresel ve ekonomik etkiler arasındaki ilişkinin giderek daha fazla önem kazanmasıyla birlikte tersine lojistik, çevre dostu standartlar ve kurallarla, kâr ve maliyetin geliştirilmesini birleştiren bir araç olarak değerlendirilmektedir.

- Ulaştırma Sistemlerinin Entegrasyonu: Taşıma faaliyeti gerçekleştirilirken en uygun taşıma modlarının kullanılması, taşıma maliyetlerini azaltarak, ekonomik verimliliği ve etkinliği önemli ölçüde artırmaktadır (Kitapçı, 2019, s. 71). Doğru taşıma modları seçildiğinde, enerji tüketiminin minimizasyonu yoluyla hava ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerde belirgin bir azalma sağlanmakta, daha düşük sera gazı emisyonlarıyla çevreye daha az zarar verilmektedir (Maersk, 2024). Ulaştırma sistemlerinin entegrasyonu, yük transfer süreçlerinde manuel elleçlemeyi minimize ederek operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırmaktadır. Bu durumun dolaylı bir sonucu olarak, yük hasarlarının azalmasıyla birlikte sigorta maliyeti hesaplamalarında dikkate alınan risk faktörleri de düşüş göstermektedir (Çancı ve Türkay, 2007, s. 238).

- Yalın ve Çevik Lojistik: Yalın lojistik, hammaddelerin, yarı mamullerin ve bitmiş envanterlerin hareketini ve coğrafi konumlandırmasını en düşük maliyetle kontrol edebilen sistemleri tasarlama ve yönetme yeteneğini ifade etmektedir (Wu, 2002, s. 19). Yalın lojistik aynı zamanda lojistik ağları tarafından üretilen israfı, aşırı envanter, gereksiz araç kilometreleri, yetersiz kullanılan araçlar ve teslimat sürecindeki gecikmeler gibi faktörleri en aza indirmeyi hedeflediğinden (Garza-Reyes vd., 2016, s. 1221), lojistik operasyonlarına yalın felsefe uygulamak, lojistik sistemlerindeki israf veya verimsizlikleri azaltmaktadır; böylece yalın lojistik sistemi

geliştirilmesinde küçük veya büyük iyileştirmeler yapılabilir (Jones vd., 1997, s. 162). Çevik lojistik ise pazarda meydana gelen değişimlere ve müşteri beklentilerine hızlı bir şekilde ayak uydurabilme yeteneğidir (Korucuk vd., 2023, s. 64). Bu yaklaşım, siparişlerin ve hizmet kalitesinin yükselmesini sağlayarak müşteri memnuniyetini artırmaktadır.

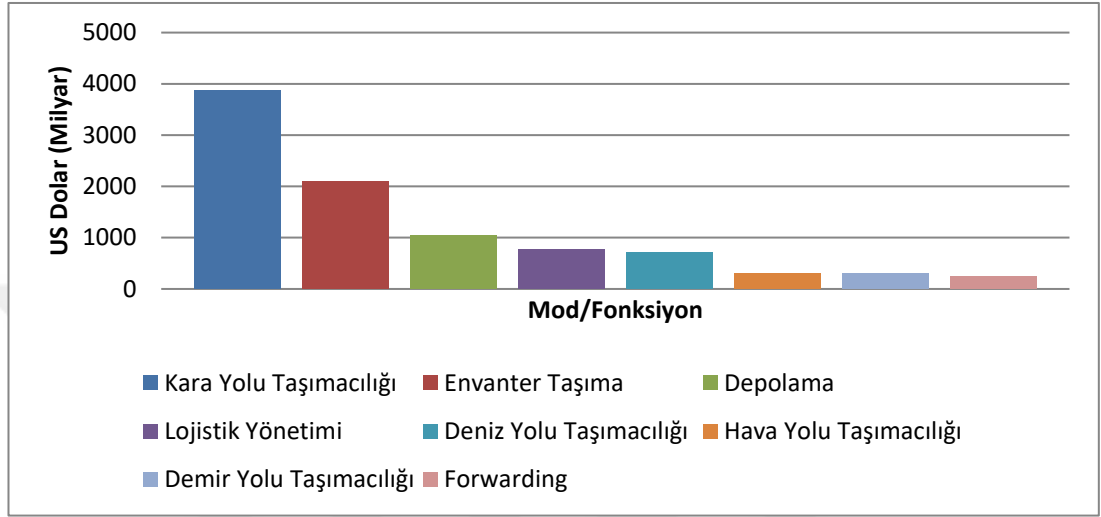
- Yeşil Lojistik: Yeşil lojistik kavramı, lojistiğin doğal çevre üzerindeki etkilerini yönetmenin pratik bir yolu olarak ortaya çıkmıştır (Wu ve Dunn, 1995, s. 22). Çevresel etkilerin azaltılmasına, ekonomik verimliliğin artırılmasına ve insanların yaşam kalitesinin iyileştirilmesine odaklanan uygulamaları içermektedir (Lai ve Wong, 2012, s. 267). Taşımayla ilgili özel uygulamalar, alternatif yakıt kullanımı, araç mesafesinin kısaltılması, daha az yakıt tüketen ulaşım modlarına geçiş, araçların rölantide kalma süresinin azaltılması, araçların birden fazla müşteri için ortak kullanımı ve daha yakıt tasarruflu araçların satın alınmasını içermektedir (Jayarathna vd., 2024, s. 1525). Ofis malzemelerinin ve ambalaj malzemelerinin geri dönüştürülmesi, depolara enerji verimli ısıtma ve aydınlatma sistemleri kurulması, plastik, su ve elektrik kullanımının azaltılması gibi uygulamalar, yaygın olarak tartışılan sürdürülebilir lojistik uygulamalardır (Colicchia vd., 2013, s. 200).

1.4. Lojistik Performans ve Ekonomi İlişkisi

Ulaşım sektörü, dünyanın önde gelen hizmetlerinden biridir. Bu hizmetlerin kurulumu ve kullanımı, ekonomik faaliyetleri büyük ölçüde kolaylaştırarak ulusal ve sosyo-ekonomik kalkınma hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olmaktadır (Abubakar vd., 2018, s. 104). Bu nedenle, öncelik CO₂ emisyonunu azaltmak ve düşük karbonlu, çevreyi kirletmeyen bir ekonomi oluşturmaktır. Lojistik, üretimden hizmete işletmelerin tümünde, kamu sektöründen özel sektöre kadar her alanda kritik bir rol oynamaktadır. Küreselleşme öncesinde rekabet sadece bölgesel düzeyde yaşanırken, günümüzde bu rekabet global bir boyut kazanmıştır. Bu değişim, özellikle son yıllarda uluslararası ticaretin gelişimi ve ülkelerin kalkınması açısından lojistiğin değerini önemli ölçüde yükseltmiştir (Rezaei vd., 2018, s. 158).

Lojistik, artan rekabet ve büyüyen küresel ekonomi ile stratejik öneme sahip bir sektör haline gelmektedir. Bu alana yapılan altyapı yatırımları sektörün büyümesinde oldukça önem arz etmektedir. Uluslararası ticaretin omurgalarından

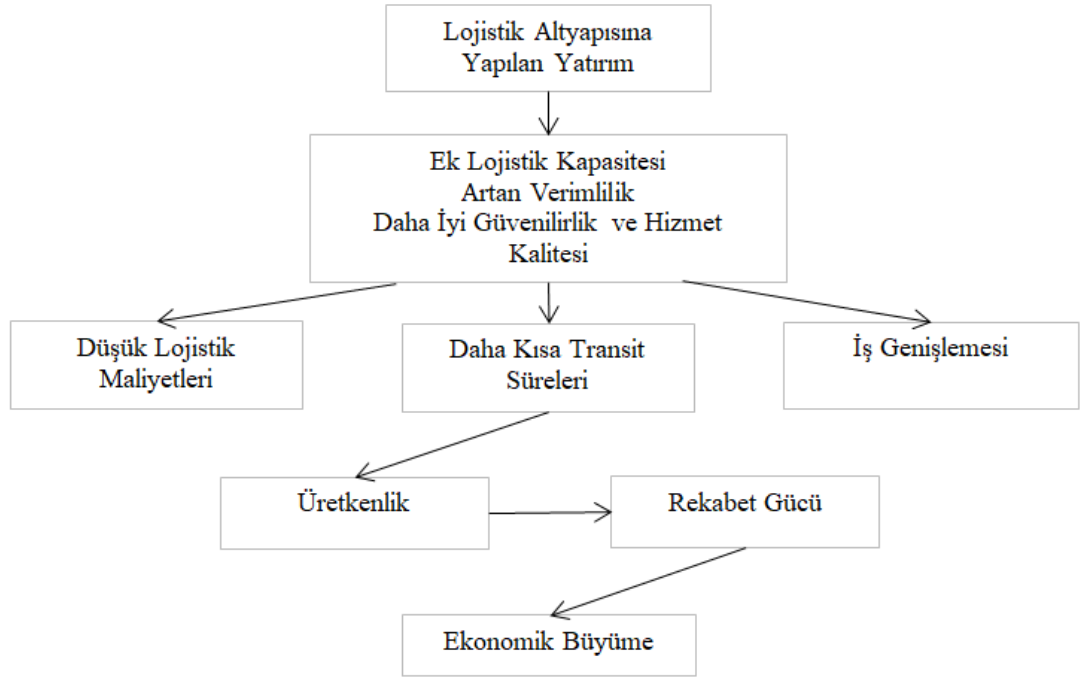
biri olan lojistik sektörünün dünya çapındaki değeri 2021 yılında 8 trilyon Euro'yu aşmıştır ve 2027 yılında bu rakamın 13 milyar Euro'ya ulaşması beklenmektedir. Buna paralel olarak, küresel toplam lojistik maliyetleri 2020'de 9 trilyon ABD dolarına yükselmiştir. Bu, o yılki 85 trilyon ABD doları olan küresel GSYİH'nin yaklaşık %11'ini temsil etmektedir (Statista, 2023).



Grafik 1.1 Mod ve fonksiyona göre 2019 küresel lojistik maliyetleri (“Armstrong & Associates Inc.”, 2023)

Araştırma ve danışmanlık firması Armstrong & Associates Inc.'e göre 2019 yılı küresel lojistik pazarında, kara yolu taşımacılığı, dünya genelindeki toplam lojistik maliyetlerinin %42'sini, oluşturmaktadır. Envanter ve depolamayla ilgili maliyetler toplam lojistik maliyetlerin üçte birini temsil ederken, kara yolu dışı modlar (deniz, demiryolu ve hava) toplam lojistik maliyetlerin %14'üne tekabül etmektedir (Grafik 1.1).

Şekil 1.1'de lojistik altyapısına yapılan yatırımların, bir dizi olumlu etki aracılığıyla ekonomik büyümeyi nasıl desteklediği görülmektedir.



Şekil 1.1 *Lojistiğin ekonomik büyüme üzerindeki etkisi* (Navickas vd., 2011, s. 234)

Şekil 1.1'e göre lojistik altyapı yatırım ve iyileştirmeler, menşe ve varış noktaları arasındaki mesafeleri azaltmaktadır, böylece seyahat sürelerini kısaltmaktadır, verimliliği yükselterek lojistik kapasitesini ve hizmet kalitesini artırmaktadır. Yolcular ve yük taşıyıcıları, doğrudan seyahat süresindeki tasarruflardan ve daha düşük araç işletme maliyetlerinden fayda sağlamaktadır. Şirketler ise daha ucuz ve daha güvenilir yük taşıma hizmetleri ile montaj ve teslimat maliyetlerindeki düşüşten doğrudan verimlilik kazancı elde etmektedir. Lojistik maliyetler düşürülerek, ulaşım ve taşımacılık süreleri kısalmış, farklı iş faaliyetlerinde büyüme fırsatlarının oluşmasına imkân tanınmıştır. Sonuç olarak lojistik altyapılara yapılan yatırımlar ülkelerin verimlilik ve rekabet gücünü artırarak, ekonomik büyümeye izin vermektedir.

Lojistik sektörüne yapılan sermaye yatırımları, ekonomik verimliliği optimize ederek işlem maliyetlerini minimize etmekte ve kaynak tahsisi ile üretkenlik seviyelerini yükseltmektedir (Navickas vd., 2011, s. 235). Ucuz ve kaliteli ulaşım hizmetleri, firmaları organizasyonlarını gözden geçirmeye ve stoklarını azaltmaya yönlendirerek teşvik edici bir rol oynamaktadır. Bu sayede, üretim ve dağıtım noktalarını bir araya getirerek ve üretim miktarlarını yükselterek ölçek ekonomilerinin avantajlarından yararlanabilirler (Gunasekera vd., 2008, s. 2371).

Gelişmiş lojistik ağlarına sahip ekonomiler, artan oranda ekonomik kazanımlar elde etmektedir. Lojistik, sıklıkla hammadde ve iş gücü dışında ‘üçüncü bir kâr kaynağı’ olarak kabul edilmekte ve lojistik sektörü, ulusal ekonominin ‘ana atardamarı’ olarak nitelendirilmektedir (Chu, 2012, s. 88). Bu bağlamda, lojistik sektörü, modern çağın ekonomik kalkınma stratejilerinin ayrılmaz bir bileşeni haline gelmektedir.



II. BÖLÜM

ÇEVRESEL BOZULMA VE ENERJİ

2.1. Çevresel Bozulma ve Lojistik Aktiviteler

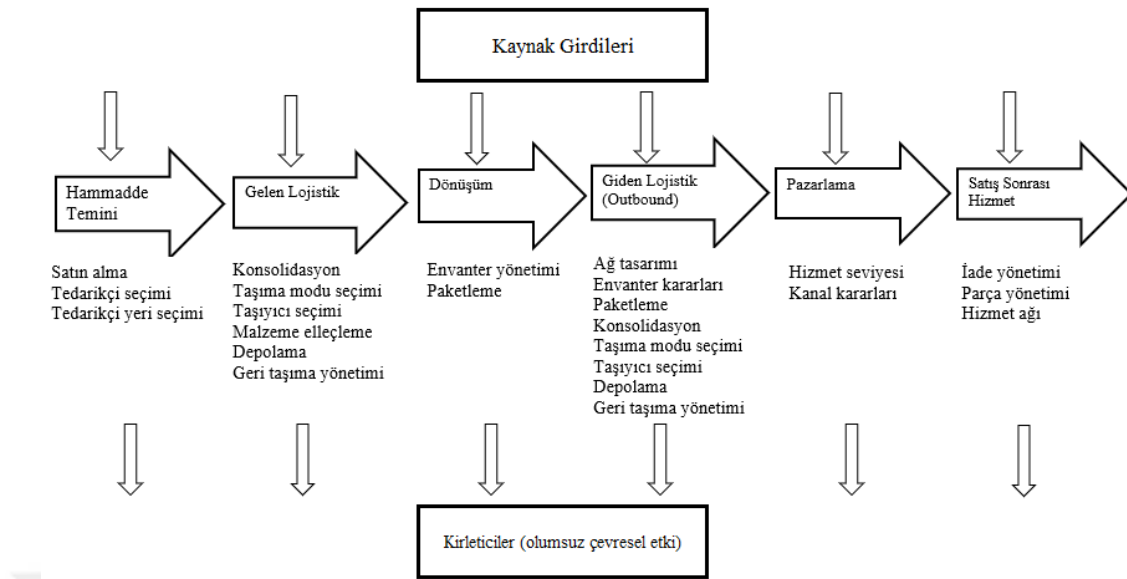
Çevresel bozulma; hava, su ve toprak gibi doğal kaynakların tükenmesi, ekosistemlerin yok edilmesi ve yaban hayatının ortadan kalkmasıyla çevre sağlığının kötüleşmesi anlamına gelmektedir (Tyagi vd., 2014, s. 1491). Çevresel bozulma, yoksulluk seviyelerini artırmakta, bulaşıcı hastalıkları çoğaltmakta, hava koşullarını değiştirmekte ve doğal çeşitliliği etkilemektedir (“Dünya Sağlık Örgütü”, 2019). Çevresel bozulmanın başlıca nedenleri, atmosferdeki CO₂ emisyonları ve ozon tabakasını incelten diğer sera gazlarıdır (Farooq vd., 2023, s. 18785). Hem iklim değişikliğini hem de okyanus asitlenmesini tetikleyen insan kaynaklı sera gazı emisyonları, doğal ekosistemlerin yaşanabilirliğini ve dayanıklılığını ve bu ekosistemlere bağımlı olan insan toplumlarını giderek daha fazla tehdit etmektedir (Malhi vd., 2020, s. 1).

Çevreye yönelik artan endişeler hem akademisyenlerin hem de politika yapıcıların, çevre kirliliğinin belirleyicilerini ve bunun çevresel bozulmayla ilişkili yönlerini tanımlamaya yönelik dikkatlerini çekmektedir. Çevresel bozulmayla ilişkili yönler, bir ülkenin izlediği enerji tüketimi ve ekonomik kalkınma hedefleriyle ilgilidir. Bu durum, çevresel kirliliğin belirleyicilerinin tanımlanmasında rol oynamış olsa da çalışmaların çoğu yalnızca toplam enerji tüketimi ve ekonomik büyümeyi çevre kirliliğiyle, özellikle de CO₂ emisyonlarıyla ilişkilendirerek analizleri sınırlandırmaktadır (Chandran vd., 2013, s. 446). Bununla birlikte, CO₂ emisyonları yalnızca gelir seviyesine değil, ulaşım sektörü (Ong vd., 2012, s. 533) enerji

tüketimi, dış ticaret (ticari dışa açıklık) ve finansal gelişme gibi başka faktörlere de bağlı olarak ortaya çıkabilmektedir (Öztürk ve Acaravcı, 2013, s. 262).

Ulaştırma sektörü, CO₂ emisyonlarının hızlı büyüyen kaynaklarından biri olarak görülmektedir (Sanchez Rodrigues ve Kumar, 2019, s. 370). Dünya genelinde 2023 yılı CO₂ emisyonlarına katkısı %38'lik payla enerji sektörü, %21 ulaştırma sektörü, %16 endüstriyel yanma yapmaktadır (Statista, 2024). Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde ise 2023 yılına ait CO₂ salınımlarının yaklaşık %24'ü enerji arzından, %25'i yurt içi taşımacılıktan, yaklaşık %20'si ise sanayi sektöründen kaynaklanmaktadır (Statista, 2025b). Lojistik sistemlerinin çevresel etkileri, doğal kaynakların daha fazla korunması, emisyonların azaltılması ve tersine lojistik araçları yoluyla malzemelerin geri dönüştürülmesi/yeniden kullanılması yönündeki gereksinimler açısından lojistik firmalarını giderek daha fazla zorlamaktadır (Bowersox, 1998, s. 2).

Lojistik ve çevre arasındaki etkileşim, şirketlerin değer oluşturma faaliyetlerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Porter'ın Değer Zinciri modelini temel alan Şekil 2.1, kaynak kullanımı ile ortaya çıkan kirlilik arasındaki bağlantıyı göstermektedir. İstenen faydaları elde etmek için kullanılan kaynaklar, tedarik zincirinin her aşamasında kaçınılmaz olarak kirleticilere dönüşmektedir. Örneğin, ürünleri koruyan ambalajlar kullanıldıktan sonra atık oluşturmaktadır. Lojistik operasyonlarının çevresel etkilerinin bilinçli yönetimi, bu negatif sonuçların önemli ölçüde azaltılmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 2.1 Çevreyi etkileyen lojistik kararları (Wu vd., 1995, s. 24)

Lojistik yöneticilerinin, aldıkları kararların pazarlama, üretim ve dış paydaşların (hükümet, tüketiciler vb.) beklentileriyle nasıl etkileştiğini dikkate alarak lojistik stratejilerini tekrar gözden geçirmeleri gerekmektedir. Tedarik zincirindeki diğer kararlardan etkilenmelerine rağmen, lojistik faaliyetlerinin doğrudan çevresel sonuçları olduğu için, lojistik yönetimi şirketin çevre yönetimi stratejisinde merkezi bir rol oynamaktadır. Şekil 2.1, çevreye etki eden bazı kritik lojistik kararları, hammadde edinimi, gelen ve giden lojistik, üretim, tersine lojistik ve pazarlama gibi çevreyi etkileyen bir dizi lojistik faaliyeti özetlemektedir. Şekilde, lojistik kararlar diğer iş faaliyetleriyle yakından bağlantılıdır. Örneğin, stok yönetimi, satın almadan hizmet parça yönetimine kadar lojistiğin temel bir unsuru olarak öne çıkmaktadır. Diğer faaliyet alanlarında alınan kararlar lojistiği ve dolayısıyla çevreyi etkileyebilmektedir. Örneğin konsantre deterjanlar gibi çevresel açıdan sürdürülebilir ürün tasarımları, ürün imalatında kullanılan kaynak miktarını azaltırken, daha kompakt bir yapıya sahip olmaları ve daha az depolama alanı gerektirmeleri nedeniyle lojistik verimliliği de artırmaktadır (Wu vd., 1995, s. 24).

Lojistik faaliyetler, çevresel etkileri olabilecek çeşitli unsurları içermektedir. Perakende şirketlerinde çevresel tedarik zinciri yönetimi girişimlerini ele alan bir makalede, Kotzab vd. (2011), hem lojistik faaliyetlerini hem de göstergeleri içeren sekiz çevresel tedarik zinciri kategorisi tanımlamaktadır. Bu kategoriler Tablo 2.1’de gösterilmektedir.

Tablo 2.1*Çevresel perakende tedarik zinciri yönetimi çerçevesi*

Çevresel Tedarik Zinciri Faaliyeti	
Temel Çevresel Tutum (1)	Perakendecinin çevresel konulara dair temel bakış açısını anlama.
Enerji Kullanımı (2)	Enerji tasarrufu sağlama ve daha çevre dostu enerji kullanımı ile ilgili alınan önlemlerin incelenmesi.
Girdi Malzemelerinin Kullanımı (3)	Kullanılan malzemelerin türünün (yenilenebilir veya yenilenemez kaynaklar) belirlenmesi, girdilerde geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılıp kullanılmadığının belirlenmesi.
Ürün (4)	Ürünleri çevre dostu hale getirmek için gerçekleştirilen faaliyetlerin belirlenmesi; hem ürünün kendisi hem de kullanımı, yeniden kullanım ve geri dönüşümünün kolaylaştırılması açısından değerlendirme.
Ambalaj (5)	Ürün ve taşıma ambalajlarının miktarını azaltmak için gerçekleştirilen faaliyetlerin ve çevre dostu malzeme kullanımının belirlenmesi.
Taşımacılık (6)	Çevresel açıdan dağıtım kanallarının yapılandırılması, taşımacılık mesafelerinin azaltılması ve taşımacılığın çevresel etkilerinin değerlendirilmesi. Ayrıca, taşınan ürünlerin toplam hacmini etkileyen boyut küçültme faaliyetlerinin gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğinin incelenmesi.
Tüketim (7)	Perakendecilerin müşterileri daha çevre dostu ürünler tüketmeye teşvik etmek ve çevreye zarar veren ürünlerin kullanımını ortadan kaldırmak için yürüttüğü faaliyetlerin haritalandırılması.
Atık (8)	Perakendecinin malzeme kullanımını azaltma ve mümkün olduğunca malzemeleri yeniden kullanma çabalarının incelenmesi, bu kapsamda diğer paydaşlarla iş birliği yapıp yapmadığı ve müşterilerin atıklarının geri dönüşüm sürecine nasıl dâhil edildiğinin değerlendirilmesi.

Tablo 2.1’de görülebileceği üzere, çevresel tedarik zinciri yönetimi, enerji tasarrufu, sürdürülebilir malzeme kullanımı, çevre dostu ürünlerin geliştirilmesi ve ambalaj atıklarının azaltılması gibi konulara odaklanmaktadır. Ayrıca, taşımacılık süreçlerinin çevresel etkileri değerlendirilerek lojistik verimlilik artırılmaya çalışılmaktadır. Perakendeciler, tüketicileri çevre dostu ürünleri tercih etmeye teşvik ederken, atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerine de katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, çevresel sürdürülebilirlik için tüm tedarik zinciri boyunca çeşitli önlemler alınmalıdır. Tablo 2.1’de belirtilenlerin dışında depolama faaliyetinde konum ve kapasite, taşıma ekipmanları, ısıtma, aydınlatma ve havalandırma gibi yollar önemli bir çevresel etkiye sahiptir (Marchant, 2010, s. 189).

2.1.1 Çevresel Bozulma ve Ulaştırma Sektörü İlişkisi

Uluslararası ticaret, taşımacılık ve lojistik sayesinde küresel ölçekte mümkün olmaktadır. Lojistik, yük taşımacılığı, depolama, sınır geçişleri, stok yönetimi, gümrükleme gibi bir dizi faaliyeti kapsamaktadır. Dünyadaki ülkeler arasında mal, bilgi, sermaye, teknoloji ve insanların yoğun hareketiyle birlikte sipariş akışı artmakta ve bu da lojistik hizmetlerin gelişimini teşvik etmektedir. İyileştirilmiş lojistik performans, ekonomik büyümenin ve rekabet gücünün anahtarı olmasına rağmen çevresel kirlilik ve CO₂ emisyonu ile ilgili bir endişe kaynağı olmaktadır. Lojistik şirketleri küresel düzeyde CO₂ emisyonlarını azaltma hedeflerine ulaşma çabasının bir parçası olarak sera gazı azaltma konusunda daha yoğun bir baskı ile karşı karşıya kalmaktadırlar (Mckinnon, 2010, s. 1).

İklim değişikliğini 2°C ile sınırlama hedefiyle, dünya sera gazı emisyonlarının hızlı bir şekilde azaltılması gerekmektedir. Genel olarak, bu hedefe ulaşmak için AB'nin 2050 yılına kadar emisyonları 1990 seviyelerinin %80-95 altına indirmesi gerekmektedir ("European Commission", 2011). Makro düzeyde, lojistik performansı ulusal CO₂ emisyonları üzerinde önemli etkilere sahiptir; çünkü sevkiyat operasyonlarıyla ilgili faaliyetler doğrudan çevreyle ilişkilidir.

Taşımacılık sektörü, fosil yakıtlara olan güçlü bağımlılığı nedeniyle AB devletlerinde sera gazı emisyonlarının önemli bir kaynağıdır. Taşımacılıktan kaynaklanan emisyonlar 2019 yılında AB üye devletlerindeki toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %25'inden sorumluyken, zaman içinde, genel sera gazı emisyonları 1990 yılına göre bütün sektörlerde %24 azalmış, ancak taşımacılık emisyonları %33 artmıştır. Sonuç olarak, taşımacılığın sera gazı emisyonlarındaki payı gittikçe yükselmiştir ("Avrupa Çevre Ajansı", 2022, s. 25). Bu nedenle, ülkeler çevre sorunlarını çözebilmek amacıyla birtakım önlemler aramaktadır. Kaynakları çok daha verimli kullanarak ekonomik ilerlemesini, rekabet gücünü ve yüksek kaliteli hizmet sunumunu teşvik edecek bir sistem, ülkelerin ulaşım ve taşımacılık politikasının temel hedeflerinden biri olmalıdır.

Teknolojik ilerlemeler karşısında, e-ticaret giderek daha popüler hale gelmiş ve özellikle koronavirüs pandemisi sırasında büyük önem kazanmıştır. E-ticaret sayesinde ticaret hacminin yükselmesi, daha yüksek CO₂ emisyonlarına dolayısıyla çevre kirliliğinin artmasına neden olmaktadır. Avrupa Çevre Ajansı, 2021 yılında

yayımlamış olduğu raporda, ulaşım sektörünün son otuz yılda sera gazı salınımında istikrarlı bir artış gören tek sektör olduğunu vurgulayarak bu faaliyetten kaynaklanan CO₂ emisyonlarının azaltılmasını gerektiğini belirtmektedir (“Avrupa Çevre Ajansı, 2021, s. 9). 1990 yılında 23 milyar ton olan CO₂, 2021 yılında yaklaşık 37 milyar tona ulaşarak %62 artmıştır (“ClimateWatch”, 2024).

Ulaşım sektörü, 2018 yılında küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık beşte birini oluştururken; karayolu taşımacılığı, ulaşım emisyonlarının dörtte üçünü oluşturmaktadır. Karayolu taşımacılığından kaynaklanan emisyonların %45’lik kısmı binek araçlardan (otomobil ve otobüs); %29’luk pay yük taşıyan kamyonlardan; %11’i havacılıktan; %10’u uluslararası deniz taşımacılığından %1’i demiryolu taşımacılığından, %2’lik kısmı diğer taşımacılık türlerinden kaynaklanmaktadır (Ritchie, 2020).

Ulaştırma sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları aynı zamanda bu emisyonların en hızlı büyüyen kaynağını da oluşturmaktadır. Yayılan ana sera gazları CO₂, metan ve nitroz oksitleri içermektedir (Al-Jabir ve Isaifan, 2024, s. 5). Bu nedenle, araştırma ve uygulamada, karbon bilincine sahip yeşil lojistik ve tedarik zinciri operasyonlarının geliştirilmesi, tedarik zinciri dayanıklılığını artırırken, CO₂ emisyonlarını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır (Lei, 2024, s. 2). Karayolu taşımacılığı, AB ülkelerinde toplam ulaşım emisyonlarının en yüksek payına sahiptir. 2022 yılında, AB’nin tüm ulaşım sera gazı emisyonlarının %73’ünü oluşturmaktadır (“European Environment Agency”, 2024).

Karayolundan sonra en büyük emisyon salınımını gerçekteşiren hava yolu taşımacılığı, azot oksitler, is (kurum), sülfat parçacıkları ve su buharı ile çevresel bozulmaya etki eden ek unsurlar barındırmaktadır. Bu bileşenler, yüksek irtifalarda uçuş sırasında kondens izlerinin ve tahmin edilmesi ve modellenmesi çok zor olan sirüs bulutlarının oluşumuna neden olmaktadır (Woodcock vd., 2007, s. 1079).

İklim değişikliği dünya üzerindeki tüm ülkeler için büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Lojistik sektörü zamanla gelişmekte ve lojistiğin yönetimi giderek zorlaşmaktadır, bu da yeni, sürdürülebilir kavramlara olan ihtiyacı doğurmaktadır. Ulaşımın çevre üzerindeki olumsuz etkilerine ilişkin artan endişeler, sürdürülebilir bir ekonomi bağlamında geleceğin gelişme trendleri olarak görülen yeşil lojistik konseptinin ortaya çıkmasına neden olmuştur (Popescu vd., 2024, s. 1). Yeşil lojistik,

çevresel hedeflerle bağlantılıdır; taşımacılık sektörünün sürdürülebilir gelişimini, hava kalitesinin iyileşmesini, kazaların ve CO₂ emisyonlarının azaltılmasını teşvik etmektedir. Küresel tedarik zincirindeki ticaret akışlarını kolaylaştıran birçok nakliye firması, çevresel endişelere yanıt vermek amacıyla yeşil nakliye uygulamalarını benimseyerek operasyonlarını çevre dostu hale getirmeye başlamıştır. Yeşil nakliye uygulamaları, taşımacılıkta atık azaltma, nakliye rotalarının karbon ayak izinin hesaplanması, nakliye sırasında çevreye verilen zararı azaltmayı amaçlayan alternatif taşıma ekipmanlarının kullanılması ve kaynak tasarrufuna vurgu yapan çevre yönetim uygulamalarıdır (Mariano vd., 2017, s. 168). Yeşil nakliye fikri günden güne yükselen bir kavram olup, lojistik şirketleri sorunları tespit etmekte ve şirketler kirletici araçların değiştirilmesi, çevreye daha az zarar veren araçların tercih edilmesi ve ekolojik süreçlerin optimize edilmesi vb. gibi çözümler aramaktadır (Čižiūnienė vd., 2024, s. 2). Lojistik, tedarik zinciri boyunca operasyonları içeren karmaşık bir faaliyet olduğundan ve yeşil lojistik kavramı sadece şirket üzerinde değil, aynı zamanda toplum genelinde de önemli bir etkiye sahip olduğundan, bu kavramla ilgili faaliyetler lojistik faaliyetlerin çevre üzerindeki etkisini ölçmeyi ve en aza indirmeyi hedeflemelidir (Larina vd., 2021, s. 184).

Lojistik açısından CO₂ emisyonlarını azaltmak için bütüncül bir yaklaşımın uygulanması gerekmektedir. Ekonomik faaliyetler, taşımacılık yoğunluğu (yerel tedarik, CO₂ emisyon vergisi vb.), trafik yoğunluğu (tedarik zincirleri arasında yük konsolidasyonu, daha büyük kapasiteli araçlar vb.), enerji yoğunluğu (eko-sürüş, aerodinamik araçlar vb.) ve emisyon yoğunluğu (elektrikli, hibrit ve biyoyakıtlı araçlara geçiş vb.), gibi unsurlar da dikkate alınmalıdır (Mariano vd., 2017, s. 169).

2.1.2. Çevre ve Lojistik ile İlgili Uluslararası Düzenleme ve Protokoller

Ülkeler, sera gazlarını azaltmak için ulusal ve uluslararası düzeyde birtakım düzenlemeler yapmaktadır. Bu düzenlemeler kısa, uzun ve orta vadeli düzenlemeler olarak değişim gösterebilmektedir. CO₂ azaltma girişimlerinde bulunan ülkeler tarafından benimsenmesi gereken orta vadeli potansiyel çözümler arasında; trafiği azaltan etkili yerleşim geliştirme ve planlama, çevre dostu taşıma modları kullanımını teşvik etme, ekonomik önlemler, araç verimliliğini artırmaya yönelik düzenlemeler bulunmaktadır (Rodt vd., 2010, s. 76).

AB'ye üye devletler, ulusal emisyon projeksiyonlarına göre, önümüzdeki yıllarda ulaşım emisyonlarında genel bir düşüş beklemektedir. Bu projeksiyonlar, mevcut politikalar ve önlemlerden beklenen emisyon azaltımları ile planlanan önlemlerin sağlayabileceği ek azaltımlar arasında ayırım yapmaktadır. Projeksiyonlar için gereklilikler, Enerji Birliği Yönetişimi ve İklim Eylemi Tüzüğü'nde belirlenmiştir ("European Environment Agency", 2024). Çevresel düzenlemeler, teşvik edici çevresel düzenlemeler ve zorunlu çevresel düzenlemeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu iki çevresel düzenlemenin lojistik endüstrisine etki mekanizmaları önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Xu ve Xu, 2022, s. 1).

Birleşmiş Milletler Çevre Programı – (UNEP): Stockholm'de 1972 yılında Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansı'nda kurulması kararlaştırılmıştır ("MFA", 2025a). Ulaşım faaliyetlerinin yoğunlaşmasından kaynaklanan hareketlilik ve emisyon arasındaki bağı kopartmaya yönelik stratejik girişimlerde bulunmaktadır. UNEP, düşük karbon yoğunluklu ulaşım sistemlerinin, çevresel kirliliğin azaltılmasının yanı sıra, istihdam olanaklarının artırılması, kentsel güvenlik düzeyinin yükseltilmesi, altyapısal kapasitenin güçlendirilmesi ve yerel ekonomik dinamiklerin teşvik edilmesi gibi çok yönlü faydalar sağlamasını amaçlamaktadır ("UNEP", 2025a). UNEP, Temiz Yakıtlar ve Araçlar Ortaklığı, Küresel Yakıt Ekonomisi Girişimi, İklim ve Temiz Hava Koalisyonu ve Birleşmiş Milletler Yol Güvenliği Fonu aracılığıyla temiz ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerine geçişi teşvik etmektedir ("UNEP", 2025b).

Kyoto Protokolü: 1997 yılında kabul edilerek, 2005 yılında uygulanmaya başlanan protokol, iklim değişikliği ile mücadele kapsamında atılması gereken adımları netleştirerek, hedefe ulaşmada meydana gelen uyumsuzluklar halinde birtakım yaptırımlar içermektedir ("İklim Değişikliği Bakanlığı", 2025a). Kyoto Protokolü, sanayileşmiş ülkeleri ve ekonomileri, 1990 yılındaki emisyon seviyelerine göre sera gazı salımlarını azaltma hedefleriyle yasal olarak bağlayan ilk uluslararası anlaşma olma özelliği taşımaktadır ("Birleşmiş Milletler", 2022b, s. 15). Protokol'e taraf devletler, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) ve Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) iş birliğinde, Montreal Protokolü kapsamında düzenlenmeyen hava ve deniz yolu yakıtlarından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının sınırlandırılması veya azaltılması için çaba göstereceklerini taahhüt etmişlerdir. Ayrıca enerji, ulaştırma,

sanayi, tarım, ormancılık ve atık yönetimi sektörlerinde, iklim değişikliğini hafifletmeye yönelik önlemler ile iklim değişikliğine yeterli uyum sağlamaya yönelik önlemleri içeren ulusal ve uygun durumlarda bölgesel programlar, sistematik olarak geliştirilecek, uygulanacak, kamuoyuyla paylaşılacak ve periyodik olarak güncelleneceği belirtilmiştir (“UNFCCC”, 1998, s. 2-9). Protokolde belirlenen 2008-2013 yılları arasındaki ilk taahhüt dönemi ve Doha Değişikliği’nde belirtilen 2013-2020 yılı ikinci taahhüt dönemi 2020 yılı itibari ile sona ermiştir (“UNFCCC”, 2012, s. 4), ancak protokol hukuken yürürlüktedir.

Yenilenebilir Enerji Direktifi: Bu yönerge, rüzgâr, güneş, aerothermal, jeotermal, hidrotermal ve okyanus enerjisi, hidroelektrik, biyokütle, düzenli depolama gazı, atık su arıtma tesisi gazı ve biyogazlar dâhil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji kullanımının teşvikine yönelik bütüncül bir çerçeve sunmaktadır. Spesifik olarak, bu düzenlemeler, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin brüt nihai enerji tüketimi içindeki toplam payı ve ulaşım sektöründeki payı için zorunlu ulusal hedefler belirlemektedir (“Food and Agriculture Organisation”, 2025). Yenilenebilir enerjiyi düzenleyen toplam üç adet direktif bulunmaktadır. Yenilenebilir Enerji Direktifi’nin 2009 yılında yürürlüğe girmesiyle birlikte, AB’de enerji tüketimindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının oranı kayda değer bir artış göstermiştir. 2010 yılında %12 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının oranı, 2023 yılında %24’e yükselmiştir. Ayrıca, 2023 yılında İsveç, enerji tüketiminde yenilenebilir enerjilerin %66’lık payıyla AB ülkeleri arasında ilk sırada yer almıştır. İsveç’i, %50 ile Finlandiya ve %44 ile Danimarka takip etmiştir (“European Commission”, 2025a). Yenilenebilir Enerji Direktifi (ile ulaştırma sektörü için iki alternatif hedeflenmiştir; ilki, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerjinin payı %29 olmalıdır. İkincisi ise yenilenebilir yakıtların kullanımıyla karbon yoğunluğu %14 oranında azaltılmalıdır (“European Parliament”, 2025).

Sera Gazı Protokolü: 1997 yılında Dünya Kaynakları Enstitüsü (WRI) ve Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi’nin kurumsal sera gazı muhasebesi ve raporlaması için uluslararası bir standart ihtiyacını fark etmesiyle ortaya çıkan çok paydaşlı (sivil toplum kuruluşları-iş dünyası) bu protokol, işletmeler ve hükümetler için iklim değişikliğine sebep olan emisyonları hesaplayarak yönetmelerine yardımcı olacak standartlar, araçlar ve eğitimler sunmaktadır (“Greenhouse Gas Protocol”,

2025). Sera gazlarının kaynağına göre Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3 olmak üzere kategorilere ayrılmaktadır (“WRI”, 2025). Kapsam 1, raporlayan şirketin sahip olduğu veya kontrol ettiği kaynaklardan kaynaklanan doğrudan emisyonlar; Kapsam 2, şirket tarafından satın alınan veya edinilen elektrik, buhar, ısıtma veya soğutmanın üretiminden kaynaklanan emisyonlar; Kapsam 3 ise şirketin değer zincirinde meydana gelen diğer tüm dolaylı emisyonlardır (“Greenhouse Gas Protocol”, 2011, s. 140). Sera Gazı Protokolü, taşımacılık ve diğer sektörlere yönelik emisyon hesaplama ve raporlama konularında eğitim materyalleri ve araçlar sunmaktadır.

Paris İklim Anlaşması: Kyoto Protokolü’nün 2020 yılında taahhütlerin sona ermesinden sonraki süreçte iklim değişikliği rejimini düzenleyerek iklim değişikliğini yönetmek amacıyla 2015 yılında kabul edilen ve 2016 yılında yürürlüğe giren anlaşma, temelde Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi’ne dayanmaktadır (“İklim Değişikliği Bakanlığı”, 2025b). Paris Anlaşması’nın uzun dönemli hedefi, küresel ortalama sıcaklık artışını sanayileşme öncesi döneme göre 2°C’nin altında (mümkünse 1.5°C seviyesinde) tutulmasıdır, bu seviyenin tolere edilebilir olduğu düşünülmektedir (“MFA”, 2025b). Sera gazı emisyonlarını azaltmanın en umut verici yollarından biri, enerji için fosil yakıt (petrol, kömür) kullanımını azaltarak, yerini alabilecek yenilenebilir teknolojiler geliştirmektir. Bu hedef, ulaşımın elektrikleştirilmesi ve elektrik üretiminde kömür veya doğal gaz kullanmak yerine rüzgâr ve güneş enerjisinin kullanılmasını gerektirmektedir (Erickson ve Brase, 2020, s. 16). Paris Anlaşması doğrudan, ulaştırma ve taşımacılık konusunda özel bir madde içermese de ulaşım sektörünün dönüşümünü teşvik eden genel hükümler barındırmaktadır. Özellikle karbon azaltımı, temiz enerji, finansman ve teknoloji transferi ile ilgili maddeler, sürdürülebilir ulaşım projeleri için temel çerçeveyi oluşturmaktadır.

Avrupa Yeşil Mutabakatı: 2019 yılında AB tarafından açıklanan bu mutabakat, 2050 yılında iklim-nötr ilk kıta olmayı hedeflemiş ve bu hedef doğrultusunda sanayi, ulaştırma, enerji, tarım, vergilendirme gibi alanlarda yeni büyüme strateji ve politikaları benimseyeceğini açıklamıştır (“Ticaret Bakanlığı”, 2025). Yeşil Mutabakat Eylem Planı, sınırda karbon düzenlemeleri, yeşil finansman, sürdürülebilir tarım, yeşil ve dögüsel ekonomi, sürdürülebilir akıllı ulaşım gibi ana başlıklar dâhilinde 32 hedef ve 81 eylem içermektedir (“Ticaret Bakanlığı”, 2021, s.

9). Mutabakat, 2050 yılında ulaşım sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarının 1990 yılı seviyesine göre %90 azaltılmasını hedeflemektedir (“Avrupa Birliği Başkanlığı”, 2024). Mutabakat kapsamında Sürdürülebilir ve Akıllı Ulaşım Stratejisi oluşturulmuştur. Bu strateji kapsamında 2030 yılına kadar; fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmak amacıyla, en az 30 milyon sıfır emisyonlu otomobil ve 80 bin sıfır emisyonlu kamyon hizmete girecek; Avrupa’da en az 100 iklim-nötr şehir olacak; AB içinde 500 km’den kısa mesafedeki planlı toplu taşıma karbon nötr olacak; tüm büyük ve orta büyüklükteki şehirler kendi sürdürülebilir kentsel ulaşım planlarını oluşturacak; yüksek hızlı demir yolu trafiği iki katına çıkacak; iç su yolları ve kısa mesafe deniz taşımacılığı %25 oranında artacaktır. Ayrıca 2035 yılına kadar sıfır emisyonlu büyük uçaklar, pazara sunulmaya hazır hale gelecektir. 2050 yılına kadar ise sürdürülebilir ve akıllı ulaşım için yüksek hızlı bağlantıya sahip, tam işlevsel birçok modlu Trans-Avrupa Ulaşım Ağı oluşturulacak; demir yolu taşımacılığı iki katına çıkacaktır (“European Commission”, 2020, s. 2).

AB’nin, 1990 seviyelerine kıyasla 2030 yılına kadar net sera gazı emisyonlarını en az %55 oranında azaltma hedefi bulunmaktadır (“European Commission”, 2025b). Mutabakat kapsamında oluşturulan ‘Fit For 55’ teklifler paketi, AB’yi %55’lik hedefe uygun hale getiren, 2030 yılı ve sonrası için yeşil dönüşümün sağlanması hedefi olan, birbiriyle bağlantılı teklif setidir (“AKİB”, 2021, s. 1). Teklif, Alternatif Yakıt Altyapı Düzenlemesi, ReFuelEU Havacılık Girişimi, FuelEU Denizcilik Girişimi, Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi’nin Genişletilmesi, Otomobil ve Hafif Ticari Araçlar için CO₂ Emisyon Standartları (2035 itibarıyla tüm yeni araçların %100 sıfır emisyonlu olması örneğin elektrikli veya hidrojenle çalışması) gibi önlemler içermektedir (“European Commission”, 2025c). Bu önlemler, taşımacılık sektörünü karbondan arındırmak için hem altyapı geliştirmeyi hem de yakıt dönüşümünü hedeflerken, aynı zamanda sosyal ve ekonomik adaleti gözetmeyi amaçlamaktadır.

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO): Uluslararası güvenlik, çevresel ve işletme standartlarını belirlemek amacıyla Birleşmiş Milletler’e bağlı uzman bir ajans olarak 1944 yılında kurulan ICAO’nun 193 üye ülkesi bulunmaktadır. Uçak gürültüsü, uçak motoru emisyonları, CO₂ emisyonlarını azaltmaya yönelik önlemler, havalimanı arazi kullanımı gibi çevresel konularla ilgili standart, politika ve rehber

geliştirmektedir (“UK Civil Aviation Authority”, 2025). Ayrıca uçuş emniyeti ve güvenliğini sağlamak, havaalanı güvenliğini sağlamak, haksız rekabeti engellemek, üye ülkelerin haklarını korumak, hava kazalarının soruşturulması, sivil havacılığın gelişimini sağlamak gibi görevleri bulunmaktadır (“MFA”, 2025c). Havacılık sektöründe çevre ve sürdürülebilirlikle ilgili ICAO’nun aktif rol oynadığı birtakım projeler gerçekleştirilmektedir:

Uluslararası Havacılık için Karbon Dengeleme ve Azaltma Planı (CORSIA): Havacılık sektörüne özgü ilk küresel piyasa temelli düzenleme olan CORSIA, ICAO'nun karbon nötr büyüme hedefi doğrultusunda, teknolojik yenilikler, operasyonel iyileştirmeler ve sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF) gibi sektörün emisyon azaltma çabalarını güçlendirmektedir (“ICAO”, 2025a). Yurtiçi havacılık faaliyetlerine uygulanmayan bu önlemler, uluslararası havacılıktan kaynaklanan CO₂ emisyonlarını dengeleyerek bu emisyon seviyelerini sabitlemeyi amaçlamaktadır (“Federal Aviation Administration”, 2025).

Devlet Eylem Planları ve Yardım: Bu girişim, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) üyesi tüm devletlerin, uluslararası havacılık sektörünün uzun vadeli iklim değişikliği stratejilerini oluşturmalarını desteklemektedir. Ayrıca, ulusal düzeydeki ilgili tüm paydaşların bu sürece dâhil olmasını teşvik ederek, işbirliği içinde niceliksel bir başlangıç senaryosu belirlemelerini, ICAO'nun sunduğu emisyon azaltma önlemlerinden uygun olanları seçmelerini ve bu önlemlerin beklenen sonuçlarını hesaplamalarını sağlamayı hedeflemektedir. Ayrıca ICAO, 193 Üye devletine Devlet Eylem Planlarını geliştirme sürecinde destek olmak ve temel gereklilikleri karşılamak amacıyla, CO₂ Emisyonlarını Azaltmaya Yönelik Devlet Eylem Planlarının Geliştirilmesi Rehberi’ni hazırlamıştır (“ICAO”, 2025b).

Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları (SAF) Teşviği: SAF, çevresel sürdürülebilirlik standartlarına uygun olarak yenilenebilir kaynaklardan veya atıklardan elde edilen havacılık yakıtlarıdır. ICAO tarafından yapılan analizlere göre, SAF uluslararası havacılık sektörünün karbon emisyonlarını azaltma konusunda en büyük potansiyele sahiptir. ICAO, 2030 yılına kadar SAF, düşük karbonlu havacılık yakıtları ve diğer temiz havacılık enerjileri kullanarak uluslararası havacılık kaynaklı CO₂ emisyonlarını %5 oranında azaltmayı hedeflemektedir (“ICAO”, 2025c).

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO): 1948 yılında başlangıçtaki adı Hükümetler Arası Denizcilik Danışma Örgütü olan, 1982 yılında adı Uluslararası Denizcilik Örgütü olarak değiştirilen kuruluş, denizciliğe ilişkin teknik konulara dair hükümet düzenlemeleri, deniz güvenliği ve gemilerden kaynaklanan deniz kirliliğinin önlenmesi ile ilgili konularda standartların benimsenmesini teşvik etmek ve kolaylaştırmak amacıyla kurulmuştur (IMO, 2025a).

2023 IMO Gemilerden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Azaltılması Stratejisi: IMO, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 13'ü destekleyerek iklim değişikliği ve etkilerine karşı acil önlem alınmasını teşvik etmektedir. IMO'nun uluslararası deniz taşımacılığında kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltma ve mümkün olan en kısa sürede ortadan kaldırma taahhüdünü ortaya koyan Temel Strateji'yi 2018 yılında kabul etmiştir. 2023 IMO Sera Gazı Stratejisi, üye devletler için bir çerçeve oluşturarak uluslararası deniz taşımacılığında sera gazı emisyonlarını azaltma hedeflerini ve ilkeleri belirlemektedir. Bu strateji, uluslararası deniz taşımacılığında karbon yoğunluğunun (taşınan yük başına CO₂ emisyonlarının) 2030 yılına kadar ortalama en az %40 oranında azaltılmasını; ayrıca, sıfır veya sıfıra yakın sera gazı emisyonlu teknoloji ve yakıtların benimsenme oranının, 2030 itibarıyla deniz taşımacılığında kullanılan enerjinin en az %5'ini oluşturmasını hedeflemektedir (IMO, 2025b).

MARPOL: Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesi Uluslararası Sözleşmesi, gemilerden kaynaklanan operasyonel veya kazara nedenlerle deniz çevresinin kirlenmesinin önlenmesini kapsayan uluslararası bir sözleşmedir (IMO, 2025c). MARPOL Ek VI, kükürt oksitler, partikül madde ve nitrojen oksitler dâhil olmak üzere gemilerin egzoz gazında bulunan hava kirleticilerini sınırlar ve ozon tabakasını incelten maddelerin kasıtlı salımını yasaklamaktadır (IMO, 2025d).

2.2. Enerji Tüketimi ve Lojistik Performans İlişkisi

Lojistik ve enerji sektörünün yakıtlara olan ortak bağımlılığı ve bu sektörlerin iklim değişikliği üzerindeki etkisi, çevresel zararları azaltmaya yönelik eylemlerin önemli bir motivasyon kaynağıdır. Bu sektörler arasındaki bağ sonucunda salınan emisyon, yenilenebilir enerji kaynaklarına ve sürdürülebilir ulaşım uygulamalarına geçişi zorunlu kılmaktadır.

Günümüzde dünya ulaşımı çoğunlukla içten yanmalı motorlara dayanmakta, bu motorlar ise petrol türevli sıvı yakıtları kullanmaktadır (Kalghatgi, 2018, s. 103). Fosil yakıt rezervlerinin azalması, petrol fiyatlarındaki artış ve çevresel düzenlemeler, içten yanmalı motorlar için alternatif, petrol bazlı olmayan yakıtların geliştirilmesinde rol oynamaktadır (Fernando vd., 2006, s. 376). Ulaşım araçları için alternatif yakıtlar üzerine araştırmalar yapılarak; dimetil eter, biyodizel, sentetik doğal gaz, hidrojen, etanol, butanol, bioetanol, Fischer–Tropsch dizelleri, saf bitkisel yağlar ve hidrojenle işlenmiş bitkisel yağ gibi birçok yakıt potansiyel alternatif yakıtlar olarak değerlendirilmektedir (Bart, Palmeri ve Cavallaro, 2010, s. 720).

Ulaşım sektöründe sera gazı emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğinin etkilerini hafifletmek için araçların elektrifikasyonu küresel sürdürülebilir enerji dönüşümünün temel stratejilerinden biridir (Yuan vd., 2021, s. 1). Elektrikli araçlar iklim değişikliğini azaltması (Zhang vd., 2018, s. 1), daha düşük işletme maliyeti ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltması nedeniyle enerji güvenliğini artırması (Zhu vd., 2019, s. 1) gibi avantajlar sunmaktadır.

Nüfus, gelir ve enerji talebi artışına yönelik senaryolar, önümüzdeki yıllarda enerji ve doğal kaynaklar üzerindeki baskının artacağını, özellikle yükselen ve gelişmekte olan ekonomilerde bu etkinin daha belirgin olacağını göstermektedir (Voigt vd., 2014, s. 47). Ekonomik küreselleşmenin ivme kazanmasıyla birlikte, ulaşım sektörünün enerji tüketimindeki artış, önemli bir odak noktası haline gelmiştir. Sürdürülebilir kalkınmanın temel bir unsuru olarak, ulaşım sektöründeki enerji yoğunluğunun azaltılması, enerji güvenliği kaygılarının giderilmesi ve iklim değişikliğiyle mücadele çabaları açısından kritik öneme sahiptir (Dong vd., 2016, s. 2). Lojistik endüstrisi, ekonomik kalkınmayı teşvik etmek ve bu faaliyetlerin çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için karbon yönetimi uygulamaları konusunda artan bir baskı ile karşı karşıya kalmaktadır (Herold ve Lee, 2017, s. 79).

Depolama ve envanter kontrolü gibi lojistik faaliyetler çeşitli sektör ve endüstrilerde yürütülse de lojistikle ilgili emisyonların çoğu taşıma faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Taşımacılık emisyonlarının büyük bir kısmı, fosil yakıtların, uçak, tren, otomobil, kamyon, otobüs ve gemi gibi araçlarda yakılmasından kaynaklanmaktadır. Ulaştırma faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonlar, 2022 yılında toplam brüt ABD sera gazı emisyonlarının en büyük

kısmını (%28) oluşturmıştır (“Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı”, 2024, s. 21).

Enerji tüketimi, insan yapımı sera gazı emisyonlarının açık ara en büyük kaynağıdır ve 2021 yılında küresel emisyonların %75’ini oluşturmaktadır. Enerji tüketiminde, elektrik ve ısı üretiminin payı yaklaşık %30 iken, ulaşım yaklaşık %14 ve imalat/inşaat yaklaşık %13’tür. Ulaştırma sektöründeki en büyük sera gazı emisyon payının %12.1’ini kara yolu taşımacılığı, %0.7’sini hava yolu taşımacılığı, %0.3’ünü deniz yolu taşımacılığı, %0.3’ünü boru hattı taşımacılığı, %0.2’sini demir yolu taşımacılığı ve %0.1’ini diğer taşımacılık türleri oluşturmaktadır (Ge vd., 2024). CO₂ emisyonları açısından kara yolu taşımacılığı baskın bir konumdur. 2024 yılında sadece CO₂ emisyonlarında %74.3 kara yolu taşımacılığı, %6.1 deniz yolu taşımacılığı, %3.5 hava yolu taşımacılığı, %4.5 yurt içi deniz yolu taşımacılığı, %6.3 yurt içi hava yolu taşımacılığı, %4 diğer taşımacılık türleri ve %1 demir yolu taşımacılığından kaynaklanmaktadır (Statista, 2025a). Kara taşımacılığının emisyonlara olan yüksek katkısı, bu sektörü etkileyen faktörlerin detaylı olarak analiz edilmesini ve emisyon azaltım stratejilerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

2022 yılı verilerine göre, kara yolu taşımacılığındaki doğrudan CO₂ emisyonlarının %35’inden fazlası, toplam araç filosunun %8’inden daha azını oluşturan kamyon ve otobüslerden kaynaklanmıştır. Ağır ticari araçların elektrifikasyon oranı 2023 yılında düşük seviyelerde seyrederek otobüs satışlarının %3’ünü, kamyon satışlarının ise %0.9’unu oluşturmaktadır (“IEA”, 2024b, s. 65). Bu durumu iyileştirmek amacıyla, 2024 yılında birçok hükümet, ağır ticari araçların enerji verimliliğini artırmayı ve elektrikli kamyon ile otobüslerin kullanımını teşvik etmeyi hedefleyen politikalar uygulamaya koymuştur.

AB, 2024 yılında ağır ticari araçlara yönelik emisyon standartlarını revize ederek, bu araçlardan kaynaklanan emisyonların 2030 yılına kadar %45 oranında azaltılmasını hedefleyen daha katı bir düzenleme getirmiştir. Benzer şekilde, ABD’de 2027 yılından itibaren ağır ticari araç emisyonlarını düşürmeye yönelik standartları sıkılaştırmıştır. Bu düzenlemelerin, 2032 yılına kadar sıfır emisyonlu araç satışlarının toplam araç satışlarının %60’ına ulaşmasına katkıda bulunması öngörülmektedir (“IEA”, 2024b, s. 65). Ancak tüm bu çabalara rağmen motorlu

ulaşımda petrol bağımlılığını sürmektedir. Ulaşım daha enerji verimli hale gelmiş olsa da enerji ihtiyacının %91'ini hâlâ petrolden karşılamaktadır (“IEA”, 2025).

Ulaştırma sektöründeki toplam nihai enerji tüketimi 2023 yılında yaklaşık 122 EJ seviyesine ulaşmış ve küresel toplamın %27'sini oluşturmuştur. Sektör, 2023 yılında yaklaşık 8 Gt CO₂ emisyonundan sorumlu olmuştur (“IEA”, 2024b, s. 63). 2019 ile 2023 yılları arasındaki dönemde, enerji kaynaklı toplam emisyonlarda yaklaşık 900 milyon ton artış kaydedilmiştir. Söz konusu dönemde, fotovoltaik enerji sistemleri, rüzgâr enerjisi, nükleer enerji, ısı pompaları ve elektrikli taşıtlar gibi temiz enerji teknolojilerinde yaygınlaşma olmazsa, emisyonlardaki bu artışın üç katına ulaşacağı öngörülmektedir (“IEA”, 2024a, s. 3).

Lojistik faaliyetler, yönlendirdiği ekonomik faaliyetin yanı sıra yakıt tüketmekte ve sera gazı emisyonlarını artırarak çevreye olumsuz etkiye bulunmaktadır. Ulaşım ve lojistiğin, enerji tüketimi ve emisyonlar üzerindeki etkisini aktivite etkisi, yapısal etki ve enerji verimliliği olmak üzere üç etki belirlemektedir (Larson, 2021, s. 6). Ulaşımda, enerji kullanımı ve emisyonların ana etkeni, sevk edilen yük hacmi yani lojistik hizmetlerine olan taleptir. Buna aktivite etkisi denilmektedir. Birleşmiş Milletler Nüfus Bölümü'ne göre, küresel insan nüfusunun 2030 yılında 8.5 milyara, 2050 yılında yaklaşık 10 milyara, 2100 yılında ise yaklaşık 11 milyara ulaşacağını tahmin etmektedir (“Birleşmiş Milletler”, 2022a). Bu nüfus artışına ayak uydurabilmek için, küresel GSYİH da artmaktadır; 1980 yılında yaklaşık 27 trilyondan, 2022 yılında yaklaşık 90 trilyona çıkmıştır (Sabit 2015 US\$) (“Dünya Bankası”, 2024). Nüfusun arttığı ve büyümeye devam eden küresel ekonominin olduğu bir dünyada aktivite etkisi artmaktadır. Yapısal etki, yükün hareketinde ulaşım modları arasındaki değişimlerle ilgilidir. Örneğin, yükün demiryolu ile taşınması, özellikle uzun mesafelerdeki ağır yükler için, kamyonla taşımaya kıyasla (Mariano vd., 2017, s. 168) genellikle yakıt açısından daha verimli olmaktadır. Son olarak, enerji verimliliği etkisi, belirli hacimdeki yükün başlangıç noktasından varış noktasına taşınması için daha az enerji tüketimi ve daha az emisyon sağlayan politikalar, uygulamalar ve teknolojiler tarafından yönlendirilmektedir. Bu etkinin dinamikleri arasında yakıt vergilerinden, daha verimli içten yanmalı motor teknolojisine ve daha aerodinamik araç tasarımına (Larson vd., 2013, s.110) kadar her şey yer almaktadır.

III. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Veri Seti ve Değişkenler

Ulaştırma sektörünün karbon emisyon yoğunluğu, bu sektördeki ekonomik kalkınmanın karbon bağımlılığını değerlendirmek için kritik bir göstergedir. Farklı bölgelerdeki sosyoekonomik koşullar ve kaynaklardaki farklılık nedeniyle, ulaştırma sektörünün karbon emisyon yoğunluğu mekânsal değişiklikler gösterebilmektedir. Karbon emisyon yoğunluğunun seviyesi öncelikle lojistik performans, ekonomik kalkınma, enerji tüketim yapısına bağlıdır. Ancak, kentleşme oranı, nüfus, sanayi yapısı, ticaret gibi faktörler ile ulaştırma sektörünün gelişim düzeyi, çalışan sayısı, işletme ölçeği ve iş gücü verimliliği gibi sektöre özgü faktörler de farklı enerji kullanım biçimleri ve ekonomik faaliyetler aracılığıyla karbon emisyon yoğunluğunu etkilemektedir. Bu çerçevede, söz konusu faktörlerin etkilerini ölçümleyebilmek amacıyla lojistik performans, çevresel bozulma ve enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi değerlendirmede kullanılan özellikler şu şekildedir:

LPE'nin altı göstergesi (Takip ve İzlenebilirlik (LPI1), Lojistik Kalite ve Yetkinlik (LPI2), Uluslararası Taşımacılık (LPI3), Gümrükleme (LPI4), Zamanlama (LPI5), Altyapı (LPI6)): Lojistik performansın bir göstergesi olarak Zaman ve Shamsuddin (2017); Khan vd. (2019); Magazzino vd. (2022); Özçelik vd. (2023) ve Ahmad vd. (2024) tarafından kullanılmaktadır. Dijitalleşme ve otomasyon, etkin gümrük süreçleri, gelişmiş altyapılar, taşıma süreçlerinin optimizasyonu, depolama ve dağıtım süreçlerinin optimizasyonu, lojistik faaliyetlerde yetkinlik, sürdürülebilir lojistik operasyonları gibi unsurlarla lojistik faaliyetlerin karbon salınımı üzerindeki etkisini yansıtmaktadır.

Ulaşım sektörü petrol ürünleri nihai tüketimi (OIL): Chandran vd. (2013) ve Azlina vd. (2014) tarafından enerji tüketiminin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Lojistik performansı doğrudan etkileyerek karbon emisyon yoğunluğunu şekillendirmektedir. Ulaştırma sektörünün enerji tüketimi toplam enerji tüketiminin yaklaşık %27'sini oluşturduğundan ("IEA", 2024b, s. 63), ulaştırma sektörünün CO₂ emisyonlarının belirlenmesindeki rolünü anlamak büyük önem taşımaktadır.

Ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları (CO): Çevresel bozulmanın bir göstergesi olarak Magazzino vd. (2022) ve Rehman vd. (2023) tarafından kullanılmaktadır. Analiz edilen CO₂, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik olup, sektörün enerji verimliliği ve çevreci uygulamalarının etkinliğini değerlendirmede önemli bir gösterge sunmaktadır.

GSYİH (GDP): Hayaloğlu (2015) ve Magazzino vd. (2022) tarafından ekonomik büyümenin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Ülkelerin ekonomik büyüklüğü, ulaşım ve lojistik sektörlerine yapılan yatırımları, altyapı gelişimini ve teknolojik inovasyon kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, GSYİH'nın incelenmesi, ekonomik büyüklüğün ulaşım sektöründeki faaliyetler ve dolayısıyla sektörel karbon ayak izi üzerindeki dolaylı etkilerini anlamada kritik bir rol oynamaktadır.

Ticari Dışa Açıklık (TRD): Zaman vd. (2016) ve Khan vd. (2019) tarafından kullanılmaktadır. Ticari dışa açıklık, küresel tedarik zincirleri ve üretim süreçleri aracılığıyla karbon emisyonlarını hem doğrudan (taşımacılık gibi) hem de dolaylı olarak (tüketim kalıpları, üretim yeri değişiklikleri gibi, çevresel regülasyonlar) etkileyebilmektedir. Bu nedenle, karbon emisyonlarını analiz ederken ticari dışa açıklık değişkeni, küresel ekonomik faaliyetlerin çevresel etkilerini anlamak için önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada ticari dışa açıklık bir ülkenin toplam ihracat ve ithalatının, o ülkenin GSYİH'sına oranlanmasıyla elde edilmektedir. Değer hesaplanırken sabit 2015 US\$ kullanılmaktadır. Tablo 3.1 değişkenleri ve elde edildikleri kaynakları tablo halinde özetlemektedir.

Tablo 3.1*Değişkenler ve kaynakları*

Değişkenler	Kaynak
LPI1 (Takip ve İzlenebilirlik) LPI2 (Lojistik kalite ve yetkinlik) LPI3 (Uluslararası taşımacılık) LPI4 (Gümrükleme) LPI5 (Zamanlama) LPI6 (Altyapı)	Dünya Bankası (WB)
OIL (Ulaşım sektörü petrol ürünleri nihai tüketimi (TJ))	Uluslararası Enerji Ajansı
CO (Ulaşım sektöründen kaynaklanan CO ₂ emisyonları (MtCO _{2e}))	Uluslararası Enerji Ajansı
GDP (GSYİH (Sabit 2015 US\$))	Dünya Bankası (WB)
TRD (Ticari Dışa Açıklık (%))	Dünya Bankası (WB)

Analiz yapılırken 2007, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 ve 2022 yıllarına ait veriler kullanılmaktadır. 2020 yılında yayımlanması gereken LPE raporu, pandeminin neden olduğu aksaklıklar ve küresel tedarik zinciri krizi nedeniyle 2023 yılında yayımlanmıştır ancak LPE verileri Dünya Bankası veri tabanında 2022 yılı içerisinde yer aldığı için, 2022 yılına ait veriler kullanılmaktadır. Analizde yer alan 38 OECD üyesi ülke, Tablo 3.2’de sıralanmaktadır.

Tablo 3.2*Analize dâhil edilen ülkeler*

Ülkeler	
Almanya	İzlanda
Amerika Birleşik Devletleri	Japonya
Avustralya	Kanada
Avusturya	Kolombiya
Belçika	Kosta Rika
Birleşik Krallık	Letonya
Çekya	Litvanya
Danimarka	Lüksemburg
Estonya	Macaristan
Finlandiya	Meksika
Fransa	Norveç
Güney Kore	Polonya
Hollanda	Portekiz

Tablo 3.2 (devamı)

İrlanda	Slovak Cumhuriyeti
İspanya	Slovenya
İsrail	Şili
İsveç	Türkiye
İsviçre	Yeni Zelanda
İtalya	Yunanistan

Çalışmada LPE'nin altı göstergesi, ulaşım sektörü petrol ürünleri nihai tüketimi, ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları ayrı ayrı hedef değişken olarak incelenmektedir. Hedef değişken dışında kalanlar ise özellik olarak kullanılmaktadır. Değişken türü sürekli veridir ve verilerde herhangi bir eksiklik bulunmamaktadır. Analiz, yazılım programı Python 3.12'de rassal orman algoritması kullanılarak yapılmaktadır.

3.2. Yöntem

Breiman (2001) tarafından önerilen rassal orman algoritması hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılabilen, karar ağacı teorisine dayalı bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Rassal orman, orijinal örneklemden çoklu örneklem çıkarmak için önyükleme yöntemini kullanan, her bir önyükleme örnekleme için karar ağacını modelleyen ve ardından nihai tahmin sonuçları için çoklu karar ağacının tahminlerini birleştiren istatistiksel bir öğrenme teorisidir. Model, geri koymalı örnekleme yaparak ve farklı ağaç evrimlerinde öngörücülerin kombinasyonunu rastgele değiştirerek karar ağaçlarının çeşitliliğini artırmaktadır (Zhang vd., 2021, s. 471).

Literatürde Rassal Orman, Rastgele Orman ya da Tesadüfi Orman olmak üzere üç şekilde isimlendirilebilmektedir. Rassal orman algoritması gelecekteki verilerde kullanılmak üzere iyi doğruluk sağlayan bir sınıflandırma/regresyon kuralı oluşturmak ya da özelliklerin, hedef değişkenin tahminine olan katkılarını değerlendirmek üzere iki farklı amaç için kullanılmaktadır (Probst, 2019, s. 2). Yani aday tahmin edici değişkenlerin eldeki tahmin problemi için uygunluğunu, başka bir deyişle, bunların yanıt değişkeninin tahminine olan katkılarını değerlendirmektir.

Rassal orman algoritması, çoklu karar ağaçlarının oluşturulması ve sonuçlarının entegrasyonu yoluyla aşırı öğrenme (overfitting) riskini minimize

etmektedir. Nispeten az sayıda hiperparametreye sahip olması ve kolay parametre ayarlanabilirliği, yüksek boyutlu veri analizinde etkin ve güvenilir bir metodoloji olarak öne çıkmasını sağlamaktadır (Fang, Lu ve Li, 2021, s. 5). Bu algoritma yüksek boyutlu verileri yöneterek, gürültü ve aykırı değerlerin varlığında bile sağlam ve doğru tahminler sağlayabilmektelerdir (Yu vd., 2025, s. 7).

Rassal orman algoritması, verilerin belirli bir olasılık dağılımını takip etmesini veya belirli bir modelden türetilmesini gerektirmez. Bu algoritma, hızlı ve kolay uygulanabilirliği (Biau, 2012, s. 1063), güçlü yorumlanabilirlik özelliğine sahip olması, verideki aykırı değerlere ve eksikliklere karşı yüksek tolerans göstermesi, değişkenler arasındaki çoklu doğrusallık (multicollinearity) ve model aşırı öğrenmesi gibi sorunları etkili bir şekilde önlemesi gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, çok sayıda girdi değişkeninin önemini ölçerek güçlü tahmin yetenekleri sunmaktadır (Liu vd., 2019, s. 2603). Bu yöntemin önemli bir teorik özelliği, ağaç sayısı arttıkça tahminlerde tutarlılık sağlamasıdır (Denil vd., 2013, s. 1260).

Rassal orman, önce rastgele seçilen örneklerden karar ağaçları oluşturmaktadır. Her bir ağaç bağımsız şekilde tahmin yapmaktadır, daha sonra tüm tahminler arasından en uygun çözüm belirlenmektedir (Louppe, 2014, s. 69). Söz konusu metodoloji, her ağacın mimarisini, ormanın ağaç sayısı gibi yapısal özelliklerini ve boyutunu ve ayrıca rastgelelik özelliğini kontrol eden çeşitli hiperparametreleri içermektedir (Probst vd., 2019, s. 1).

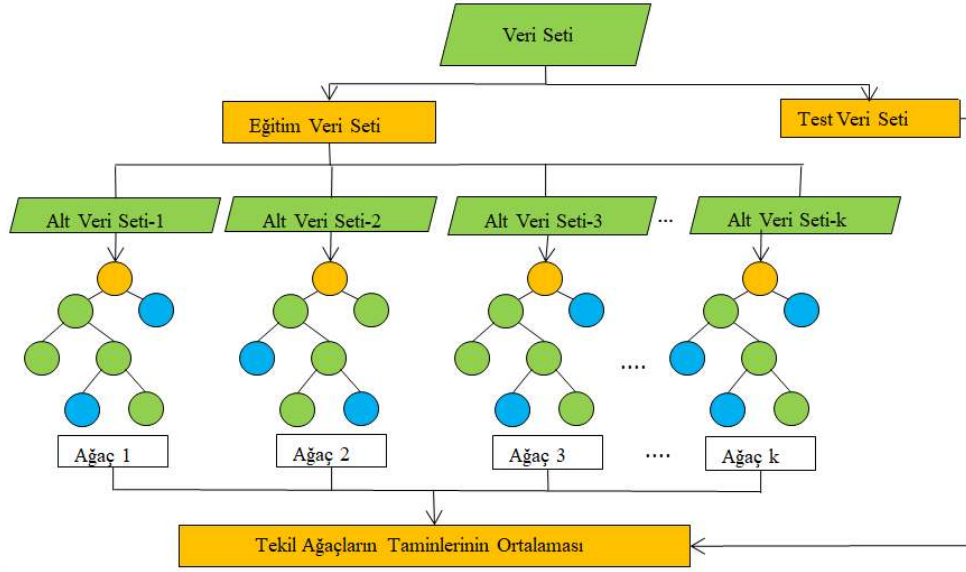
Diğer makine öğrenimi yöntemleriyle kıyaslandığında, rassal orman algoritması, değişkenlerin önemini otomatik olarak değerlendirebilme kapasitesine sahip olup, değişkenlerin tahmin üzerindeki önemine dair açık ve net içgörüler sunmaktadır (Verikas vd., 2011 s. 330). Rassal orman algoritması, tıbbi araştırmalar ve büyük veri uygulamaları başta olmak üzere çeşitli disiplinlerde kayda değer katkılar sunmaktadır (Rigatti, 2017, s. 34). RO, gürültülü ortamlarda bile ilgili özellikleri tespit etme yeteneğine sahip görüldüğünden, yüksek boyutlu özellik uzaylarıyla çalışmaya son derece uygundur ve bu nedenle rassal orman algoritmasının oldukça geniş bir kullanım alanı mevcuttur (Scornet, 2017, s. 144); DNA'ya bağlanan proteinlerin tanımlanması (Nimrod vd., 2009); video nesnelerinin segmentasyonu (Chen, Liu ve Fuh, 2006); hava ve iklim değişkenlerinin kardiyovasküler hastalıklar üzerindeki etkisi (Castronuovo vd., 2023); bitki örtüsü

türlerinin mekânsal olarak dağıtılmış çevresel ölçümler temelinde tahmin edilmesi (Peters vd., 2009); kuş ve memeli türlerinin dağılımının tahmini (Hernandez vd., 2008); Çek dili modellemesi (Oparin vd., 2008); bilgisayarlı tomografi verilerine dayalı Alzheimer hastalığı teşhisi (Ramírez vd., 2009); uydu görüntülerine dayalı tarımsal uygulamaların sınıflandırılması (Watts vd., 2009); hava görüntülerinin (Joelsson vd., 2006) ve çok bantlı uydu görüntülerinin (Akar ve Güngör, 2012) sınıflandırılması; kimyada fenolik antioksidanların analizi (Gupta vd., 2006); göz kaslarından başka hiçbir kasları çalışmayan ALS hastalarının tek ya da çift göz kırpmalarının sınıflandırılması (İkizler ve Ekim, 2025); el yazısı rakamların tanınması (Bernard, Adam ve Heutte, 2007); vücut eklemlerinin 3B konumlarını hızlı ve doğru bir şekilde tahmin edilmesi (Shotton vd., 2013) gibi uygulama alanları bulunmaktadır.

Rassal orman, aşağıdaki aşamalar izlenerek oluşturulmaktadır (Basuchoudhary, Bang ve Sen, 2017, s. 25):

- Veri seti "eğitim örneği" ve "test örneği" olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.
- Algoritma, eğitim örneğinden n gözlemden oluşan rastgele bir örnek seçmektedir.
- P özellik arasından algoritma, her ağaçta bölünme için aday belirlerken rastgele m özellik seçmektedir. Böylece her düğüm farklı değişkenler üzerinden bölünerek ağaçlar çeşitlendirilmektedir.
- Ağacın her düğümünde algoritma, hatayı en aza indirmek için (her düğümde ortalama kare hatayı en aza indirmek) her bölünmedeki en iyi tahminci değişkeni seçmektedir.
- Algoritma, her düğümdeki hataları azaltmada minimum iyileşmeye ulaşılan veya düğümdeki minimum gözlem sayısına ulaşılan kadar ağaç oluşturmaktadır.
- Sonuç olarak, tüm karar ağaçlarının ürettiği çıktılar, probleme göre ya bir çoğunluk oyu (sınıflandırma için) ya da ağırlıklı/aritmetik ortalama (regresyon için) ile birleştirilerek kesin tahmin elde edilmektedir (Petropoulos vd., 2020, s. 1100).

Yukarıda bahsedilen rassal orman algoritmasının yapısal prensibi Şekil 3.1 yardımıyla görselleştirilmektedir.



Şekil 3.1 *Rassal orman algoritma mimarisi* (Guo vd., 2023, s. 3)

Rassal orman algoritması, çok sayıda avantaj sunmasının yanı sıra birtakım dezavantajlara da sahiptir. Geleneksel karar ağaçlarında tek bir ağaç yapısı görselleştirilebilirken, rassal ormanda bu mümkün olmamakta ve süreç adımlarının izlenebileceği bir çıktı bulunmamaktadır. Bu durum, algoritmanın anlaşılabilirliğini geleneksel karar ağaçlarına kıyasla güçleştirmektedir. Ek olarak, oluşturulan tüm karar ağaçlarının hafızada saklanması ve süreç sonrası uygulama sonuçlarının elde edilmesi, daha yüksek bir bellek gereksinimine yol açmaktadır (Gönen Halıcı, 2024, s. 44).

Çalışmada, çok değişkenli ve zaman serisine dayalı veri yapısına uygun, aynı zamanda değişken önem düzeylerini yorumlamaya elverişli bir makine öğrenimi yöntemi tercih edilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda çeşitli algoritmalar değerlendirilmiş; ancak nihai olarak rassal orman yöntemi tercih edilmiştir. Rassal orman, yüksek boyutlu ve potansiyel olarak gürültülü veri setleriyle baş edebilme kapasitesi, aşırı öğrenmeye karşı dayanıklı yapısı ve değişken önem düzeylerini anlamlı biçimde sunabilme özelliği sayesinde bu çalışmanın amaçlarına uygun bulunmuştur. Ayrıca rassal orman algoritması, parametreler arasında özel bir dağılım varsayımında bulunmadığı için değişkenlerin normal dağılması veya aynı ölçeklerde olması gerekmemektedir. Bu durum, farklı birim ve ölçeklerde ölçülen enerji tüketimi, emisyon, GSYİH gibi değişkenlerin yer aldığı veri yapısında büyük bir avantaj sağlamaktadır. Her bir değişkenin modele katkısını ölçebilen değişken önemi

skorları üretmektedir. Bu özellik hem yorumlamayı kolaylaştırmakta hem de politika önerilerinin temellendirilmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, rassal orman algoritması; yüksek doğruluk, model kararlılığı, parametre ayarlarının göreceli olarak daha basit olması ve değişken önem düzeylerinin açık bir biçimde yorumlanabilmesi gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. Bu tercih, çalışmanın hem tahmin gücünü artırmakta hem de elde edilen sonuçların politika yapıcılar açısından anlamlı ve yorumlanabilir olmasına katkı sağlamaktadır.

Rassal orman algoritmasını kullanarak lojistik performans, ulaştırma sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları, ulaşım sektörü petrol ürünleri nihai tüketimi arasındaki ilişkiyi analiz etme süreci beş adımdan oluşmaktadır:

1. Veri yükleme ve ön işleme: 38 ülkeye ait verilerin programa yüklenerek, GDP, OIL, CO ve TRD için log dönüşümü uygulanmıştır. Ayrıca veri, %80 eğitim ve %20 test olarak bölünerek, lojistik performans ile alakalı özellikler StandardScaler ile ölçeklendirilmiştir.
2. Hiperparametre optimizasyonu: Rassal orman algoritması max_features, n_estimators (200, 300, 500, 800), min_samples_split (2, 5, 10, 15) ve max_depth (10, 15, 20, none) değerlerini belirlemek amacıyla beş katlı İzgara Araması Çapraz Doğrulama (GridSearchCV) kullanılarak optimize edilmiş, en iyi hiperparametrelerle model, tüm eğitim verisiyle eğitilmiştir.
3. Performans değerlendirme: Test verisi üzerinde MSE, MAE, RMSE ve algoritmanın genelleme performansını ölçmek için ise R² hesaplanmıştır.
4. Değişken önemi analizi: TreeSHAP ile değişkenlerin tahminlere katkısı hesaplanmıştır. MDI önem dereceleri hesaplanarak, değişkenlerin varyans azalmasına etkisi değerlendirilmiştir.
5. Sonuçların raporlanması ve görselleştirilmesi: Performans metrikleri (MSE, MAE, RMSE, R²) her hedef değişken için kaydedilmiştir. TreeSHAP, MDA ve MDI önem dereceleri her değişken için tablo halinde raporlanmıştır. Ayrıca her hedef değişkene ait TreeSHAP değerleri arı sürüsü grafiği ile görselleştirilmiştir.

Yukarıda sıralanan beş adım, hedef değişken olarak kullanılan takip ve izlenebilirlik, lojistik kalite ve yetkinlik, uluslararası taşımacılık, gümrükleme,

altyapı, zamanlama, ulaşım sektörü petrol ürünleri nihai tüketimi ve ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları için ayrı ayrı uygulanmaktadır.

3.3. Algoritma Parametrelerinin Belirlenmesi

Başlangıç parametrelerinin ayarlanması, algoritmanın performansını önemli ölçüde etkileyen zahmetli ancak hayati bir görevdir (Zhang vd., 2021, s. 471). Ayarlama (tuning), dikkate alınan bir veri seti için bir öğrenme algoritmasının optimal hiperparametrelerini bulma görevidir. Rassal orman, varsayılan ayarlarda yani parametrelerde yoğun ayarlamalar yapılmadan ve verilerin ölçeklendirilmesine ihtiyaç duyulmadan iyi sonuçlar verdiği bilinen bir algoritmadır (Fernández-Delgado vd., 2014, s. 3136). Probst vd. (2019) yaptığı çalışmada algoritmaların hiperparametrelerinin ayarlanabilirliğini ölçmekte ve rassal ormanın Destek Vektör Makineleri gibi diğer algoritmalara kıyasla çok daha az ayarlanabilir olduğu sonucuna varmaktadır. Bununla birlikte, yazılım paketinin varsayılan hiperparametre değerleri kullanıldığında, ayarlama yoluyla küçük bir performans kazancı elde edilebilmektedir. Algoritma aday tahmin edici sayısı, farklı şekillerde belirtilebilen ağaç boyutu ya da derinliği ve ağaç sayısı olmak üzere birkaç parametreye bağlıdır. Dikkate alınan tüm hiperparametreler rassal ormanın performansı üzerinde bir etkiye sahip olabilmektedir. Bu parametreler için uygulanan varsayılan değerlerin tahmin konusunda iyi ampirik performans sağladığı yaygın bir inanıştır ve bu kısmen rassal ormanın bu kadar popüler olmasının nedenidir (Scornet, 2017, s. 144).

Rassal orman algoritmasında yaygın olarak vurgulanan temel hiperparametrelerden biri aday tahmin edici sayısı (max_features)'dir; bu parametre, her bir ağaç bölünmesinde rastgele seçilen aday değişkenlerin sayısını belirlemektedir. Max_features değerinin düşük tutulması, ağaçlar arasında çeşitliliği artırarak modelin genel kararlılığını güçlendirebilmektedir. Bu durum, özellikle etkisi orta düzeyde olan ancak güçlü değişkenler tarafından gölgelenme riski taşıyan değişkenlerin modelde daha etkin kullanılmasını sağlamaktadır. Ancak max_features değerleri çok düşük olduğunda, her bölünme için rastgele seçilen küçük bir değişken grubundan seçim yapılmaktadır. Bu durum, aslında çok iyi olmayan değişkenlerin seçilme olasılığını artırdığı için, bu tür değişkenlere dayanılarak oluşturulan ağaçlar, ortalama olarak daha düşük performans gösterebilmektedir. Yani, önemli olmayan

değişkenler bile bölünmelerde kullanılabilir hale gelmektedir (Probst, 2019, s. 3). Bu bağlamda, modelin hem genelleme kapasitesini artırmak hem de bireysel tahmin doğruluğunu korumak adına, `max_features` değerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi kritik öneme sahiptir.

Bir ormandaki ağaç sayısı (`n_estimators`), modelin performansını hassas biçimde ayarlamayı gerektiren bir parametre değildir; ancak yeterince yüksek seçilmesi gereken bir parametredir (Scornet, 2017, s. 157). Çok fazla özellik varsa, ormandaki ağaç sayısı varsayılan düşük bir değerde bırakılmamalıdır çünkü daha fazla ağaç, her bir özelliğin öneminin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için daha fazla fırsat sunmaktadır. İdeal ağaç sayısını bulmak için farklı ağaç sayılarıyla denenerek, tahmin hatası, değişken önem ölçüsü vs. gibi ölçütler önemli ölçüde değişmeyene kadar ağaç sayısını artırmaya devam edilmelidir. Daha az ağaç aynı tahmin doğruluğunu vermekte, ancak değişkenlerin önemini daha az güvenilir bir şekilde hesaplamaktadır. Yani, değişkenlerin hangisinin gerçekten önemli olduğunu doğru belirlemek için yeterli sayıda ağaç olması önem arz etmektedir (Boulesteix vd., 2012, s. 496). Kısaca, daha fazla ağaç daha güvenilir sonuçlar verdiği için genellikle daha iyidir, bu yüzden ağaç sayısı gerçek bir ayarlanması gereken parametre olarak görülmemektedir; mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır.

Ağaçların boyutunu (Minimum Düğüm Boyutu ya da `min_samples_split`; Maksimum hücre/katman sayısı: `max_depth`) kontrol eden parametreler de ayar parametreleri olarak görülmelidir, ancak sonuçlar üzerindeki etkilerinin, her bölmede seçilen aday tahmin edici sayısının etkisinden daha düşük olması beklenmektedir. Bir düğümün bölünmesi için sahip olması gereken minimum boyut, maksimum katman sayısı veya bölme kriteri için bir eşik değeri gibi ağaçların boyutunu kontrol etmek için kullanılabilecek çeşitli parametreler bulunmaktadır (Boulesteix vd., 2012, s. 496).

Bir algoritmanın farklı hiperparametre değerleriyle performansını değerlendirmek için önemli bir araç k-katlı çapraz (k-fold cross validation) doğrulamadır. Girdi verilerinin çeşitli alt kümeleri üzerinde birden fazla modelin eğitilmesinden oluşmaktadır. Bir modelin yeni ve daha önce hiç görmediği verilerdeki genel eğilimleri ve benzerlikleri ne kadar iyi yakalayabildiğini anlamak için kullanılmaktadır (Tchakoucht vd., 2024, s. 993). Hesaplama süresini en aza

indirmek, düşük yanlılık, düşük varyans ve yüksek model doğruluğunun dengelenebileceği K değeri, literatürde genellikle beş veya on olarak seçilmektedir (Marcot ve Hanea, 2021, s. 2011; Shebl vd., 2024, s. 578). Tüm çapraz doğrulama prosedürünün birkaç kez tekrarlanmasının sonuçlarının ortalaması alınması, tahminin varyansı azaldığı için daha güvenilir sonuçlar sağlamaktadır (Seibold vd., 2018, s. 1196).

Hiperparametre optimizasyon metotları, derin öğrenme modelinin mimarisini ve iç parametrelerini optimize etmek için kullanılır. Bu metotlar, önceden belirlenmiş ve sınırlandırılmış kaynaklar dâhilinde verilen arama uzayı yapılandırmasından optimal hiperparametre kombinasyonlarının değerlendirilmesini sağlamaktadır (Elshaw vd., 2019, s. 2). Hipermetre uzayında arama yöntemleri üç şekilde yapılmaktadır;

Izgara arama (Grid Searching), model eğitimi sırasında tüm olası hiperparametre değerleri kombinasyonlarını değerlendirmeye ve en iyisini seçmeye dayanmaktadır (Yaloveha vd., 2022, s. 116). Belirlenen alt ve üst sınırlarda birtakım işlemlerle kapsamlı parametre belirleme işlemi yapan ızgara arama, tüm kombinasyonları değerlendirerek en verimli parametreleri elde etmeyi amaçlayan kolay uygulanabilir bir yöntem olmasına rağmen, kapsamlı taraması nedeniyle büyük veri setlerinde maliyeti artırmaktadır (Sungur ve Bakır, 2024, s. 51).

Rastgele Arama (Random Search), deneme yapılandırması, hiperparametrelerin bağımsız ve rastgele seçilmesiyle oluşturulmaktadır. Rastgele aramanın uygulanması zahmetsizdir ve yüksek boyutlu hiperparametre uzayında verimli sonuçlar vermektedir; ayrıca ızgara aramadan daha iyi çözümler sunmaktadır (Yaloveha vd., 2022, s. 116).

Bayes optimizasyonu (Bayesian optimization), bir fonksiyonun minimumunu bulma yöntemidir (Xia vd., 2017, s. 229). Bayes optimizasyonu, optimize edilmiş bir gözlem-uyum olasılık modeline dayanmaktadır. Bu model, girdi uzayındaki her noktada belirtilen amacın potansiyel değerini tahmin etmektedir (Sun vd., 2020, s. 5). Amaç fonksiyonunun geçmiş değerlendirme sonuçlarına dayanarak amaç fonksiyonunu en aza indiren değeri bulmak için alternatif bir fonksiyon oluşturulmaktadır. Izgara ve rastgele arama optimizasyon yöntemlerinin en büyük dezavantajı, geçmiş bilgileri göz ardı etmeleridir. Ancak, Bayes optimizasyonu bir

sonraki değeriendirilmesi gereken parametre yapılandırması konusunda en iyi kararı vermektedir (Sameen vd., 2019, s. 766).

Her hedef değışken için, Tablo 3.3'te verilen eğitim parametreleri kullanılarak en iyi parametreler belirlenmiştir.

Tablo 3.3

En iyi parametreler

Hiperparametreler	LPI1	LPI2	LPI3	LPI4	LPI5	LPI6	OIL	CO
max_features	sqrt	sqrt	0.33	sqrt	sqrt	sqrt	sqrt	sqrt
n_estimators	200	300	200	800	200	200	200	800
min_samples_split	5	5	15	2	15	5	2	2
max_depth	20	15	10	20	10	10	10	20

Tablo 3.3, farklı hedef değışkenler için yapılan ızgara aramasıyla yapılan model optimizasyonunun sonuçlarını özetlemektedir. Her bir hedef değışken için, modelin en iyi performansı gösterdiği gibi hiperparametre değeri belirlenmiştir. Bu, modelin her bir hedef değışkeni en doğru şekilde tahmin etmek için farklı ayarlara ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır.

3.4. Performans Değeriendirme Kriterleri

R-kare (R^2), bir regresyon modelinde hedef değışkendeki dalgalanmaların ne kadarının özellikler tarafından açıklandığını gösteren istatistiksel bir ölçüdür (Krzywinski ve Altman, 2015, s. 1104). Başka bir deyişle, modelin verilere ne kadar iyi uyduğunu göstermektedir. R^2 değeri 0.50 ile 0.99 arasında olan bir model, özellikle açıklayıcı değışkenlerin büyük kısmı istatistiksel olarak anlamlıysa, sosyal bilimlerdeki araştırmalar için genellikle yeterli kabul edilmektedir (Ozili, 2023, s. 7). Model değeriendirme kriterlerinde, R^2 bire ne kadar yakınsa, tahmin edilen ve gözlemlenen değeri arasındaki benzerlik o kadar yüksek ve modelin tahmin doğruluğu o kadar fazladır (Guo vd., 2023, s. 7). Denklemlerde yer alan m gözlem sayısını, X_i tahmin edilen i 'inci değeri, Y_i gerçek (doğru) i 'inci değeri temsil etmektedir. $\bar{Y}$ ise gerçek değerielerin ortalamasıdır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^m (\bar{Y} - Y_i)^2}$$

MAE (Ortalama Mutlak Hata), hedef değışkenin tahmin edilen değeri ile gözlemlenen değeri arasındaki ortalama mutlak farkı göstermektedir. MAE,

hesaplama yapılırken büyük ya da küçük bütün hataları aynı derecede önemli kabul etmektedir. Yani, büyük bir tahmin hatası da küçük bir tahmin hatası da MAE değerini aynı şekilde etkilemektedir (Karunasingha, 2022, s. 610). En iyi değeri sıfırken en kötü değeri artı sonsuzdur (Chicco vd., 2021, s. 5).

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |X_i - Y_i|$$

RMSE (Kök Ortalama Karesel Hata), bir regresyon modelini değerlendirmek için kullanılan bir diğer metriktir. Hata terimlerinin büyüklüğü hakkında MSE ile aynı bilgiyi vermektedir, ancak birimi hedef değişkenin birimiyle aynı olduğu için yorumlaması daha kolaydır. Tahmin edilen ve gözlemlenen değerler arasındaki sapmayı ölçmek için kullanılmaktadır (Guo vd., 2023, s. 7). Ancak MAE'den farklı olarak, hataların karesi alındığı için büyük tahmin hatalarını daha önemliymiş gibi ele almaktadır. Bu nedenle RMSE, aykırı değerlere karşı daha hassastır ve tahminlerdeki büyük hatalardan daha fazla etkilenebilmektedir (Karunasingha, 2022, s. 610). Yani, model çok büyük bir hata yaptığında, RMSE değeri bu hatayı MAE değerine göre daha önemli göstermektedir. Sıfıra yakın RMSE değeri, tahmin hatasının düşük olduğunu göstermektedir (Zhang vd., 2021, s. 475). RMSE'nin hedef değişkenin biriminde olması, bu hatayı doğrudan hedef değişkenin ölçeğiyle karşılaştırılmasını sağlamaktadır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2}$$

MSE (Ortalama Karesel Hata), tespit edilmesi gereken aykırı değerler varsa MSE kullanılmaktadır ve en iyi değeri sıfırken en kötü değeri artı sonsuzdur (Chicco vd., 2021, s. 5).

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2$$

Yalnızca MSE, RMSE veya MAE değerlerine bakarak bir regresyon modelinin kalitesini yorumlamak zordur, çünkü bu ölçütlerin üst sınırı $+\infty$ 'dir. Bu değerler modelin genel kalitesi hakkında çok fazla bilgi vermemektedir; değerler hem çok iyi hem de çok zayıf bir regresyon modelini ifade edebilmektedir.

3.5. Performans Değerlendirme Sonuçları

Çalışma, makine öğrenimi algoritmalarından biri olan rassal orman kullanılarak gerçekleştirilmiştir. On farklı değişken (p) ve 264 gözlem (n) içeren veri seti, %20 test, %80 eğitim verisi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu ayırım hem algoritmayı öğrenmek hem de bağımsız veriler üzerinde test etmek için standart bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Sonuçların yeniden üretilebilirliğini sağlamak için sabit bir random_state değeri atanmıştır.

Tablo 3.4'te elde edilen sonuçlar, farklı lojistik performans göstergeleri ve emisyon hedef değişkenleri için rassal orman algoritmasının performansını özetlemektedir.

Tablo 3.4

Rassal orman performans metrikleri

	LPI1	LPI2	LPI3	LPI4	LPI5	LPI6	OIL	CO
MSE	0.1976	0.0838	0.3449	0.1102	0.2732	0.0700	0.0124	0.0598
MAE	0.3140	0.2059	0.4520	0.2418	0.4204	0.1968	0.0795	0.1118
RMSE	0.4446	0.2895	0.5873	0.3230	0.5227	0.2647	0.1114	0.2447
R²	0.8449	0.9375	0.7460	0.9141	0.7581	0.9435	0.9943	0.9839

Tablo 3.4'e göre, sekiz farklı hedef değişken için algoritmanın performans ölçütleri incelendiğinde, genel olarak modelin yüksek bir açıklayıcılığa sahip olduğu görülmektedir. R² değerleri özellikle OIL ve CO değişkenlerinde oldukça yüksek olup, modelin bu değişkenleri neredeyse tam doğrulukla açıkladığını göstermektedir.

Hata metrikleri incelendiğinde, MSE ve RMSE değerlerinin özellikle OIL ve CO değişkenlerinde oldukça düşük olduğu bu değişkenlerde modelin tahmin hatasının minimal düzeyde gerçekleştiğini göstermektedir. Benzer şekilde MAE değerleri de tüm değişkenlerde makul seviyededir; özellikle OIL ve CO değişkenlerinde düşük hata oranları elde edilmiştir. LPI ve LPI5'e ait MAE değerleri, diğer hedef değişkenlere kıyasla daha yüksektir ve algoritmanın LPI3 ve LPI5 üzerindeki tahmin performansının görece daha zayıf olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, rassal orman modelinin genel olarak başarılı bir performans sergilediği, özellikle OIL ve CO değişkenlerinde çok yüksek doğruluk düzeyine ulaşmaktadır. LPI değişkenleri arasında ise LPI6 ve LPI2 en iyi tahmin edilen göstergeler olarak öne çıkarken, LPI3 ve LPI5 görece daha düşük bir açıklayıcılığa

sahiptir. Bu bulgular, modelin genel geçerliliğini ve değişkenler arasındaki farklı açıklama düzeylerini ortaya koyarak, analiz sonuçlarının güvenilirliğini desteklemektedir.

3.6. Değişken Önem Düzeyleri

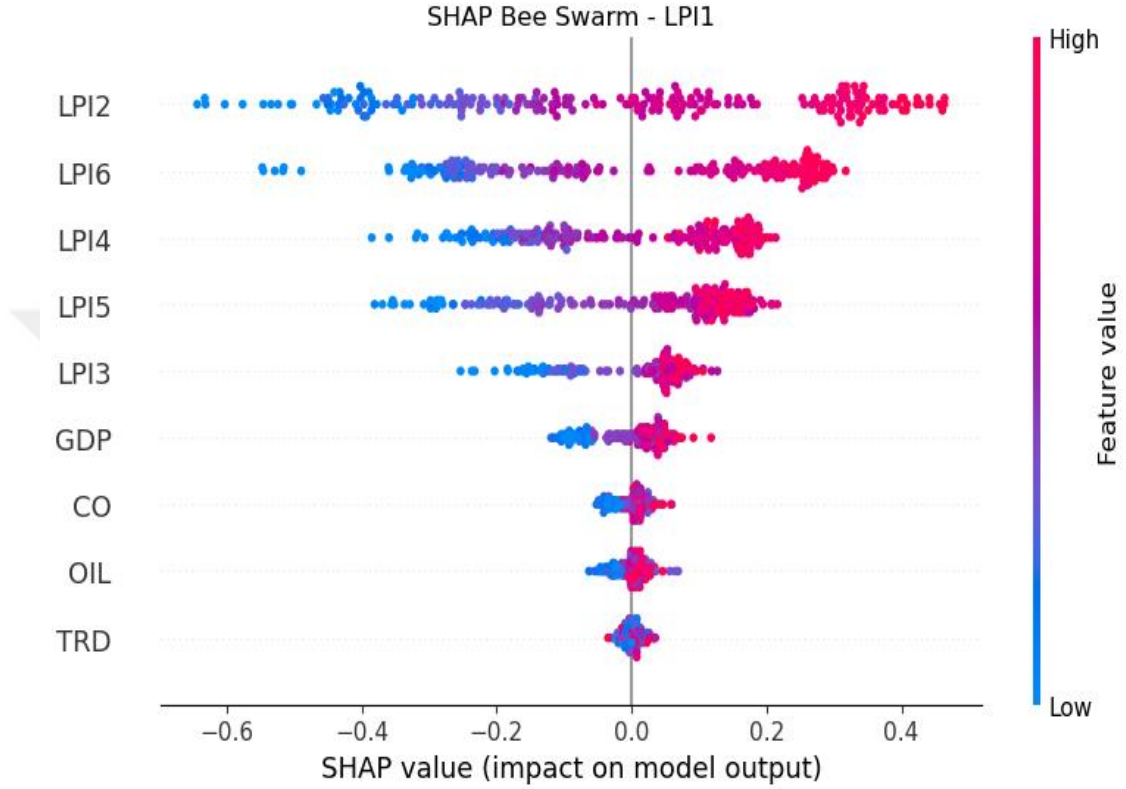
Makine öğrenimi yüksek tahmin doğruluğuna sahip olsa da tahmin süreci doğrudan gözlemlenemez nitelikte olduğundan, kara kutu model alanına girmektedir (Zhu vd., 2024, s. 7). Ağaç tabanlı topluluk yöntemlerinde modellerin yorumlanabilirliğini artırmak amacıyla kullanılan değişken önem ölçüsü, her bir değişkenin topluluktaki tüm bireysel ağaçlar tarafından kaç kez seçildiğini saymaktır (Strobl vd., 2007, s. 3). Rassal Orman algoritmasında birçok değişken önem ölçüsü bulunmaktadır. Belirli bir değişken boyunca gerçekleştirilen tüm bölmelerle ilişkili kazancı toplayan Düğüm Safsızlığındaki Ortalama Azalma (MDI) veya diğer adıyla Gini Önemi ya da Entropy, çoğunlukla sınıflandırma problemlerinde kullanılmaktadır. Test kümesindeki belirli bir değişkenin bilgilerini karıştıran ve karıştırılmış test kümesindeki hata ile orijinal test kümesindeki hata arasındaki farkı hesaplayan Ortalama Doğruluk Azalması (MDA) diğer adıyla Permütasyon Önemi'dir. MDA, bir özellik rastgele karıştırıldığında modelin ortalama karesel hatasındaki artışı hesaplayarak bir özelliğin önemini ölçmektedir. Bu yöntem, bir özellik bozulduğunda tahmin doğruluğunun ne kadar azaldığını değerlendirmektedir. Hata ne kadar büyük artarsa, özellik o kadar önemlidir, çünkü bu, özelliğin modelin tahmin performansında kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Öte yandan MDI özelliğin verileri bölmek için kullanıldığı her düğümdeki safsızlık azalmasını değerlendirerek özellik önemini nicelendirmektedir. Ağaç oluşturma sürecinde safsızlığı azaltmaya önemli ölçüde katkıda bulunan özellikler daha önemli kabul edilmektedir (Yu vd., 2025, s. 7). Tanımı gereği MDI, ağaç yapısına güçlü bir şekilde bağlı olduğundan yalnızca ağaçlar için hesaplanabilen bir önem ölçüsüdür, oysa MDA, herhangi bir tahmin modeli için kullanılabilen permütasyon öneminin bir örneğidir (Scornet, 2023, s. 2). Permütasyon öneminin sağlam bir istatistiksel teoriye dayanmadığı, daha ziyade bir tahmin edicinin bir modeldeki etkisini değerlendirmek için sezgisel bir yaklaşımı temsil etmektedir. Özellikle, permütasyon önemi, bir tahmin edicinin yanıt değişkeniyle olan ilişkisinin yönü veya şekli hakkında bilgi

vermemektedir. Sadece iki değişken arasında bir tür bağlantı olduğuna dair bir göstergedir (Rothacher ve Strobl, 2024, s. 601).

Lundberg ve Lee (2017) tarafından yayımlanan, oyun teorisini makine öğrenimi modellerinin yorumlanmasıyla birleştiren Shapley Eklemeli Açıklamalar (SHAP), her bir model özelliği için o özelliğin tahmin sonucuna katkı değerini belirleyen bir değeri üretmektedir (Cao ve Hu, 2024, s. 4). Diğer bir ifadeyle SHAP, öngörücü modellerdeki özelliklerin önemini açıklamaktadır. Pozitif veya negatif SHAP değeri, özelliğin tahmin sonucunun olasılığını olumlu ya da olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir (Li vd., 2022, s. 184). Makine öğrenimi modellerinin tahminlerine değişkenlerin katkı yönünü ve büyüklüğünü gösteren sayısal değerleri belirlemektedir ve bu değişken katkılarının görselleştirilmesini sağlamaktadır (Akbulut vd., 2023, s. 3). SHAP, özellikle karmaşık veri setlerinde model içindeki özellik önem sıralamaları ve özellikler arası etkileşimler hakkında değerli bilgiler elde edilmesini sağlayarak modelin karar verme süreçlerinin açıklanmasına katkıda bulunmaktadır (Zhu vd., 2024, s. 8). SHAP, oyun teorisinden gelen Shapley değerlerini kullanarak belirli bir tahmini açıklamaktadır ve her özelliğe bir önem değeri (SHAP değeri) atamaktadır (Antwarg vd., 2021, s. 3). SHAP değerinin görselleştirilmesi için kullanılan arı sürüşü grafiği; hedef değişkenin skorunu tahmin ederken hangi değişkenleri en önemli olarak gördüğünü ve bu değişkenlerin değerlerinin tahmin sonucunu nasıl etkilediğini göstermektedir. Grafikte yer alan, her nokta tek bir gözlemi temsil etmektedir. Renkler özelliğin değerini, X eksenindeki konumu ise o özelliğin model tahminine olan etkisini belirtmektedir (Cui vd., 2022, s. 8).

Modelde, değişken önem düzeylerini belirlemek için her bir özelliğin modelin çıktısına yaptığı katkıyı ölçen SHAP değerleri kullanılmaktadır. Karar ağaçları ve rassal orman gibi topluluk yöntemleri için ise hızlı ve kesin çözümler sunan TreeSHAP (Lundberg vd., 2020, s. 15) değeri kullanılmaktadır.

Grafik 3.1’de analiz sonucunda takip ve izlenebilirlik (LPI1) için elde edilen SHAP arı sürüsü grafiği yer almaktadır. Daha yüksek TreeSHAP değerleri, özelliklerin daha etkili olduğunu gösterirken, daha düşük değerler daha az etki olduğunu göstermektedir.

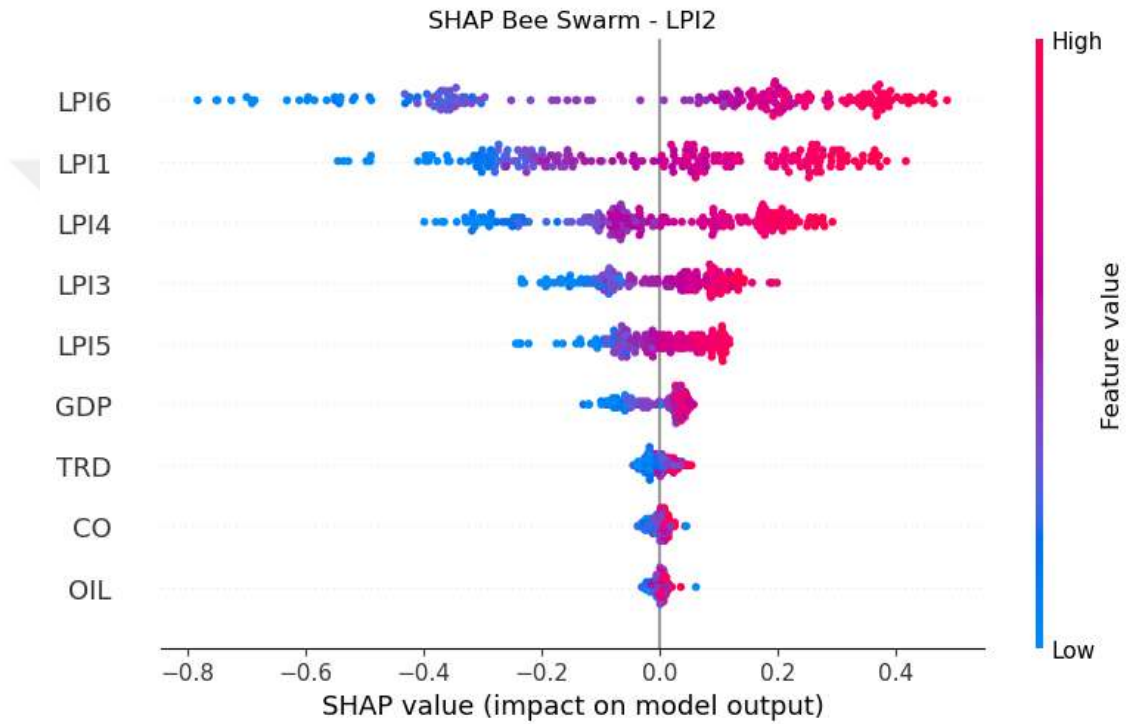


Grafik 3.1 LPI1 değişkeni için arı sürüsü grafiği

Grafik 3.1’de bulunan arı sürüsü grafiği, LPI1 değişkeninin tahmininde, her bir özelliğin etkisini göstermektedir. Y eksenindeki özellikler arasında CO, OIL, TRD, GDP, LPI2, LPI3, LPI4, LPI5 ve LPI6 bulunmaktadır. X eksenini, her bir özelliğin LPI1 için modelin çıktısına katkısının yönünü ve büyüklüğünü gösteren TreeSHAP değerlerini göstermektedir. Analiz sonuçları, TreeSHAP değerine göre LPI2’nin LPI1’i tahmin etmek için diğer değişkenlere kıyasla en önemli değişken olduğunu görülmektedir. Yüksek LPI2 TreeSHAP değerleri sıfır çizgisinin sağ tarafında, düşük LPI2 TreeSHAP değerleri ise sıfır çizgisinin sol tarafında yer almaktadır. Bu grafik ve değerler, LPI2’nin modelin tahminleri için kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Dolayısıyla, lojistik kalite ve yetkinlik arttıkça takip ve izlenebilirlik tahmini artarken, kalite düştükçe izlenebilirlik tahmini de düşmektedir. CO, OIL ve TRD değişkenlerinde kırmızı ve mavi noktalar sıfıra yakın ve bu özelliklerin renk

dağılımları daha az belirgin bir örüntü sergilemektedir; bu özelliklerin LPI1 tahmini üzerindeki etkilerinin daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Sonuçlar, LPI1 hedef değişken olduğunda lojistik ile ilgili özelliklerin modele hâkim olduğunu, ekonomik (GDP, TRD), çevresel ve enerji (CO, OIL) faktörlerinin ise daha az etkilere sahip olduğunu göstermektedir.

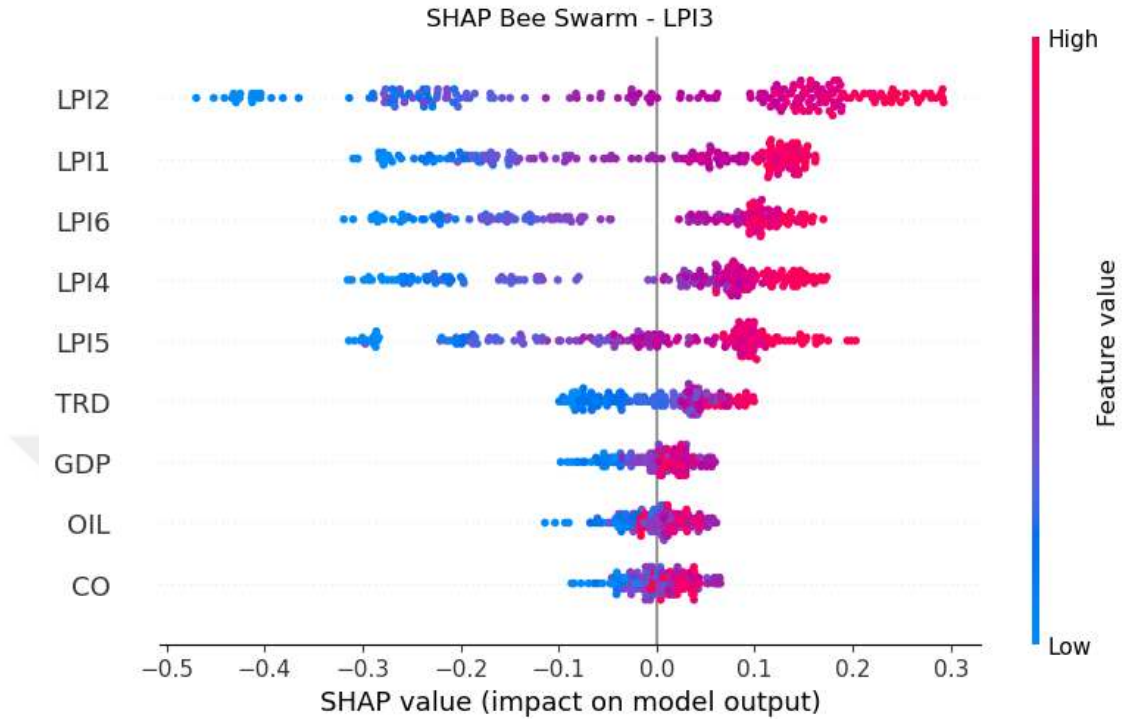
Grafik 3.2’de hedef değişken lojistik kalite ve yetkinlik (LPI2) için yapılan analizin sonuçları yer almaktadır.



Grafik 3.2 LPI2 değişkeni için arı sürüsü grafiği

Grafik 3.2, LPI ile ilgili tüm özelliklerin LPI2 tahminlerinin birincil itici güçleri olduğunu açıkça göstermektedir. Ancak LPI6 en yüksek değerlere sahip olarak LPI2 tahminleri üzerinde en güçlü etkiye sahiptir. Yüksek LPI6 değerlerinin model tahmini üzerinde pozitif bir etkisi bulunmaktadır; düşük LPI6 değerlerinin ise hedef değişken tahmini üzerinde negatif bir etkisi bulunmaktadır. TreeSHAP değerleri sıfıra çok yakın kümelandikleri için en az etkili olan değişkenler TRD, CO ve OIL’dir; yani grafik, bu değişkenlerin değerlerinin modelin tahmini üzerinde minimum etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

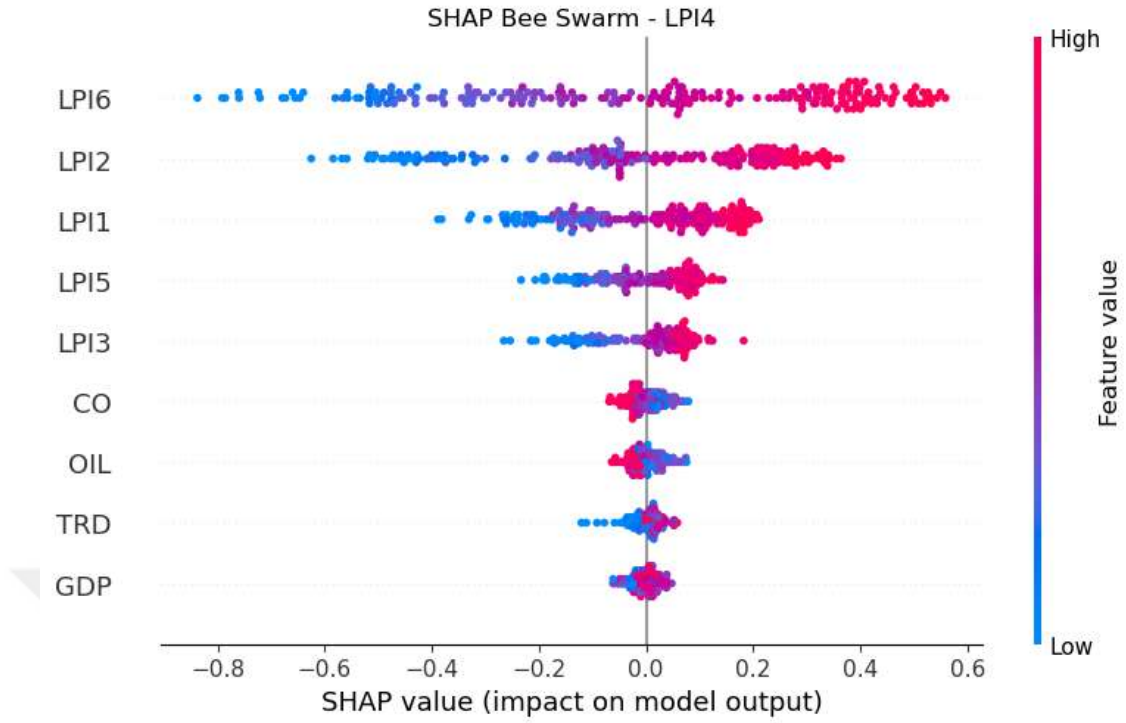
Hedef değişkenin uluslararası taşımacılık (LPI3) olduğu analiz çıktısı, Grafik 3.3'te yer almaktadır.



Grafik 3.3 LPI3 değişkeni için arı sürüsü grafiği

Grafik 3.3'e göre en önemli değişken, TreeSHAP değerlerinin en geniş yayılımına sahip olduğu için LPI2 olarak görünmektedir ve bu, model tahmini üzerinde önemli bir etkiye işaret etmektedir. Genel olarak, lojistikle alakalı özellikler pozitif TreeSHAP değerlerinde yoğunlaşarak hedef değişkenin tahmini üzerinde önemli bir pozitif etkiye sahiplerdir. Grafiğe göre lojistik özelliklerden sonra, LPI3 tahmine en büyük katkıda bulunan özellik TRD'dir. LPI3'ün tahminini lojistikle alakalı özelliklerden sonra, ekonomik özellikler etkilemekte; çevresel özellikler geri planda kalmaktadır.

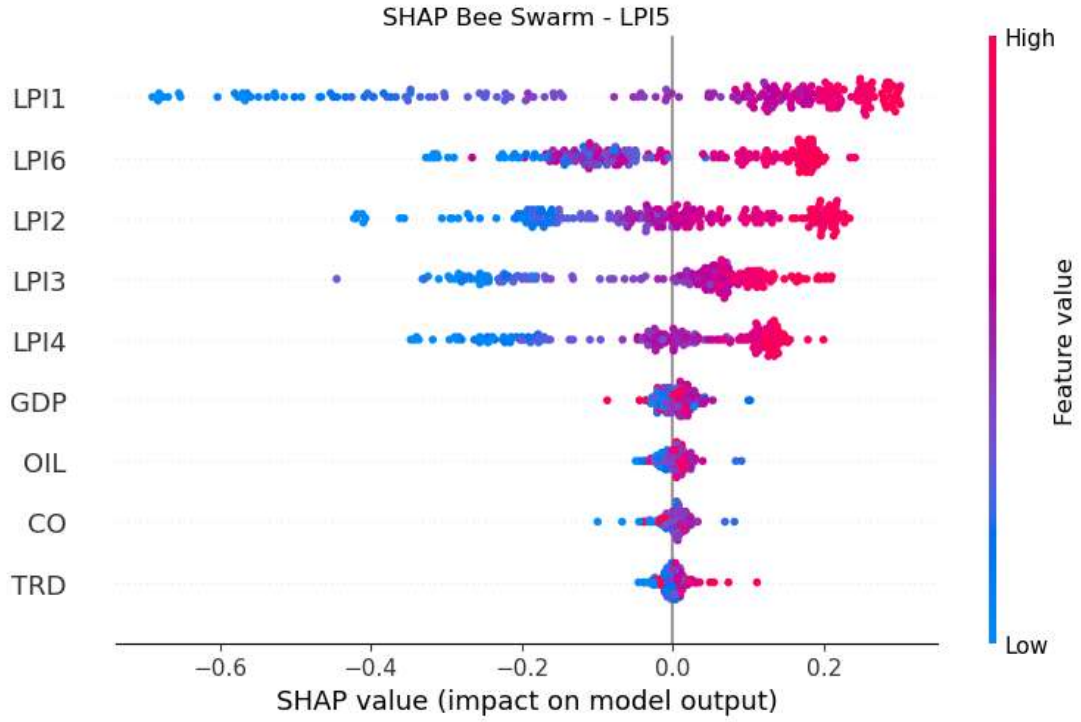
Gümrükleme (LPI4) özelliğinin hedef değişken olduğu analiz sonuçları Grafik 3.4'te gösterilmektedir.



Grafik 3.4 *LPI4 değişkeni için arı sürüsü grafiği*

Grafik 3.4’te değişkenler, LPI4 tahminine etkisi en fazla olandan en az etkili olana doğru sıralanmaktadır. Grafiğe göre LPI6 en üstte yer aldığı ve en geniş TreeSHAP değeri aralığına sahip olduğu için en önemli özelliiktir. Kırmızı noktalar sıfır çizgisinin sağında yoğunlaşmaktadır bu da modelin tahminleri üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. TreeSHAP grafiği, bu modelde LPI4’ü tahmin etmek için en önemli diğer itici güçlerin LPI2, LPI1, LPI5 ve LPI3 bileşenleri olduğunu ortaya koymaktadır. Ekonomik özelliklere gelindiğinde, CO ve OIL orta-alt sıralarda yer alırken dar TreeSHAP aralıkları ile sınırlı etki göstermektedir; yüksek CO ve OIL, sıfır çizgisinin sağında kalan düşük değerleriyle LPI4 tahminini düşürmektedir. TRD ve GDP ise LPI4 tahmininde en düşük öneme sahiptir; ekonomik özelliklerin dar yayılımları, veri setinde çevresel ve lojistik bileşenlere kıyasla arka planda kaldıklarını göstermektedir.

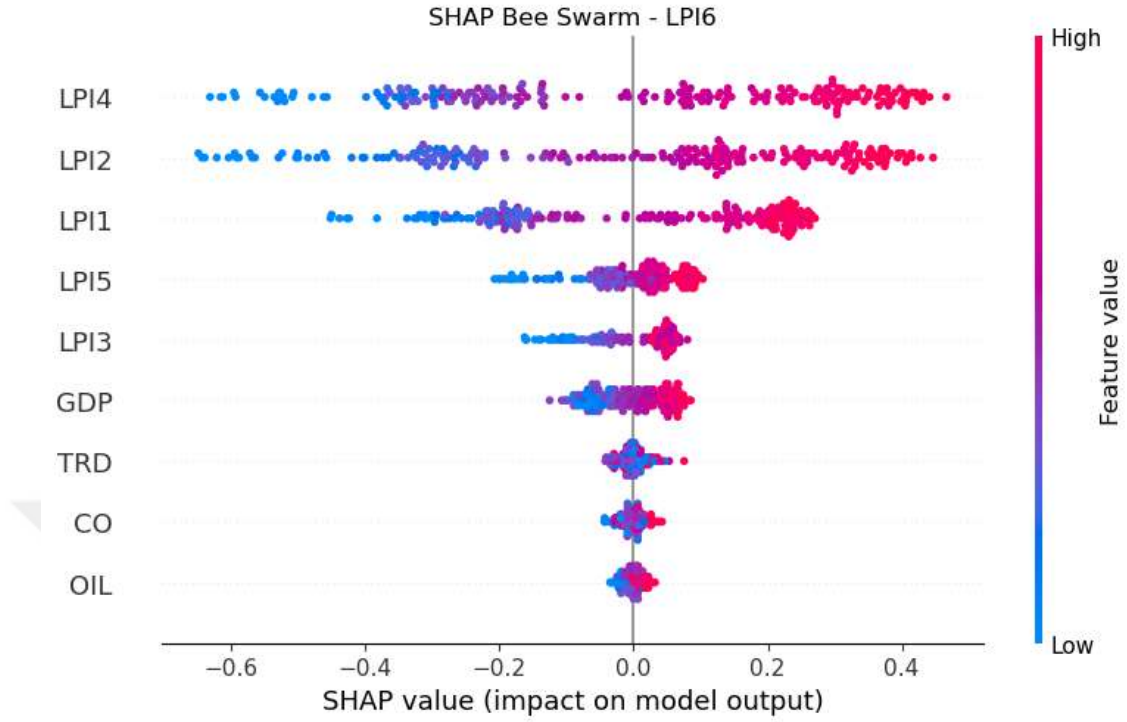
Grafik 3.5'te zamanlama (LPI5) hedef değişkeni için yapılan analizin sonuçları yer almaktadır.



Grafik 3.5 LPI5 değişkeni için arı sürüsü grafiği

Grafik 3.5, diğer LPI bileşenlerinin (LPI1, LPI6, LPI2, LPI3 ve LPI4) tahmin edilen LPI5'e güçlü bir etkide bulunduğunu açıkça göstermektedir. GDP, OIL, CO ve TRD'nin TreeSHAP değerleri neredeyse sıfır çizgisinin etrafında kümelenmiş olup, bu da modelin LPI5 tahmini için bu değişkenlerden kayda değer bir bilgi almadığını göstermektedir.

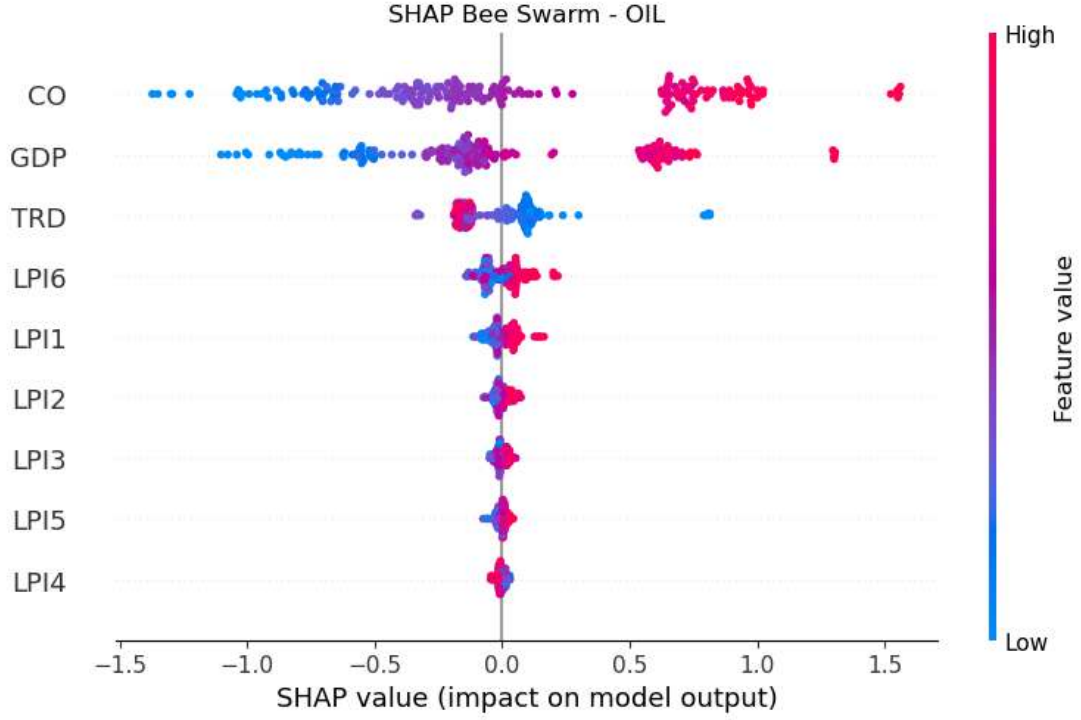
Hedef değişkenin altyapı (LPI6) olduğu analiz, Grafik 3.6'da yer almaktadır.



Grafik 3.6 LPI6 değişkeni için arı sürüsü grafiği

LPI2, LPI6 tahmini üzerinde güçlü bir etkiye sahip olan özelliktir (Grafik 3.6). Kırmızı noktalar (yüksek LPI4) sağda yoğunlaşmaktadır, yani yüksek LPI4, LPI6'yı güçlü şekilde artırmaktadır. Tersine, düşük LPI4 değerleri negatif TreeSHAP değerlerine sahip olma eğilimindedir ve tahmin edilen LPI6'yı aşağı itmektedir. TreeSHAP grafiği, bu modelde LPI6'yı tahmin etmek için en önemli diğer itici güçlerin LPI4, LPI2 ve LPI1 bileşenleri olduğunu ortaya koymaktadır. LPI5, LPI3 ve GDP de LPI6 tahminine pozitif katkıda bulunan özelliklerdir ancak diğer lojistik özelliklere kıyasla etkileri azdır. TRD, CO ve OIL, sıfır çizgisine çok yakın kümelenmektedir. Bu da bu özelliklerin LPI6 tahminine sınırlı katkı sağladıklarını göstermektedir.

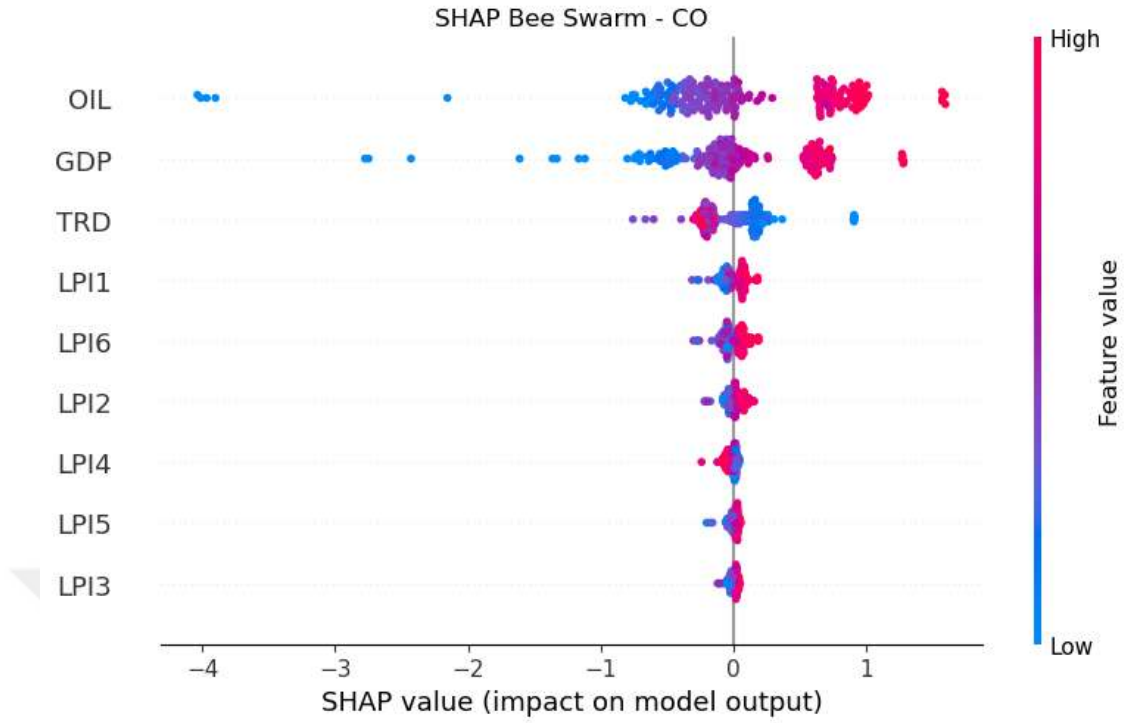
Grafik 3.7, hedef değişkenin OIL olduğu değişken önem derecesini görselleştirmektedir.



Grafik 3.7 OIL değişkeni için arı sürüsü grafiği

Grafik 3.7, farklı özelliklerin hedef değişken olan OIL'in model tahminini nasıl etkilediğini görselleştirmektedir. Grafikte CO ve GDP özellikleri TreeSHAP dağılımında oldukça yaygın bir örüntü sergilemektedir. Yüksek değerler sıfırın sağında toplanmaktadır; bu da yüksek karbon emisyonunun ve ekonomik büyümenin petrol tüketimi tahminini artırdığına işaret etmektedir. Düşük CO ve GDP değerleri sıfır çizgisinin solunda yoğunlaşmaktadır; yani düşük CO ve GDP, OIL'in tahminini azaltmaktadır. Bu, petrol tüketiminin çevresel emisyonlarla güçlü bir pozitif ilişkide olduğunu göstermektedir. TRD değişkeninde yüksek değerler sıfırın sağında konumlanmaktadır; bunun anlamı TRD düşük değerler alınca OIL tahmini artarken, TRD yüksek değerler alınca OIL tahmini azalmaktadır. LPI özelliklerinin SHAP değerleri daha dar bir aralıkta sıfır değerinin çevresinde toplanmaktadır. Bu durum, modelin bu özelliklerden güçlü sinyaller almadığını göstermektedir. Bu özelliklerin değişim göstermesi, modelin tahmin ettiği OIL'i çok fazla etkilemediği anlamına gelmektedir.

Grafik 3.8, CO değişkenin hedef değişken olarak seçildiği modele ait arı sürüsü grafiğidir.



Grafik 3.8 CO değişkeni için arı sürüsü grafiği

Hedef değişken olarak CO'nun yer aldığı bu analizde, sonuçlar lojistik özelliklerden ziyade ekonomik ve enerji tabanlı değişkenler tarafından yönlendirilen net bir özellik önem hiyerarşisi ortaya koymaktadır. TreeSHAP arı sürüsü grafiği (Grafik 3.8), OIL'in CO tahminlerini etkileyen baskın özellik olduğunu göstermektedir. Bu, emisyon tahminindeki değişimlerini açıklamada enerji tüketiminin baskın bir rol oynadığını göstermektedir. Bu sonucun aksine, sıfırın çevresine kümelenen LPI özellikleri çok az veya hiç etki göstermemektedir; bu da lojistik performans ölçütlerinin bu algorithmada CO'nun önemli öngörücüleri olmadığını açıklamaktadır. Algoritma CO'yu, lojistik performanstan ziyade enerji kullanımı (OIL) ve ekonomik çıktı (GDP) fonksiyonu olarak yakalamaktadır. Mavi noktaları sıfırın sağında bulunan TRD, CO₂ emisyon tahmini yükseltme eğiliminde olduğunu göstermektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Lojistik performans, sürdürülebilirliğin çeşitli unsurlarının hem öncüsü hem de sonucudur. Lojistik performans ekonomik faaliyeti teşvik ederek ulusal geliri yönlendirirken, CO₂ salınımı yoluyla sebep olduğu çevresel bozulma konusunda artan bir baskı ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma, lojistik performansının enerji ve çevresel bozulma üzerindeki etkisiyle ilgili önceki araştırmaların sonuçlarını açıklayarak genişletmektedir. Çalışma, çeşitli lojistik performans göstergelerini, ulaştırma sektöründeki petrol tüketimini ve ulaşımdan kaynaklanan CO₂ emisyonlarını tahmin etmede rassal orman algoritmasını kullanarak, bu hedef değişkenlerin tahminini etkileyen temel faktörleri belirlemektedir. Ayrıca OECD ülkeleri bazında ulaşım sektöründen kaynaklanan enerji tüketimi, ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları ve lojistik performansın etkilerini anlamak, ulaşım sektörü için uygun ulaşım politikalarını geliştirmek amacıyla politika yapıcılara daha spesifik ve operasyonel bir rehber sunulmasına olanak tanımaktadır.

Sekiz hedef değişken boyunca rassal orman algoritmasının genel performans değerlendirmesi, hedef değişkene ve hiperparametre ayarlarına bağlı değerlerde, genel olarak güçlü bir tahmin yeteneği göstermektedir. Tahmin gücü ve değişken önem ölçütlerine dayanarak her hedef değişken için en önemli itici güçler belirlenmektedir.

MSE değerleri, modelin ulaşım sektörü petrol ürünleri nihai tüketimi yani enerji tüketimi için en düşük hatayı elde ettiğini, LPE göstergesi olan uluslararası taşımacılığın ise hedef değişkenler arasında en yüksek hatayı sergilediğini göstermektedir. Yani model, uluslararası taşımacılık göstergesi için gerçeğe uzak tahminler yaparak, hataları en aza indirmekte zorlanmaktadır. Benzer şekilde, MAE değeri ulaşım sektörü enerji tüketiminin en doğru tahmin edilen değişken olduğu tutarlı bir yapıyı yansıtırken, uluslararası taşımacılık özelliği en büyük ortalama

sapmayı göstermektedir. Bu sonuç, enerji tüketimi tahmini gerçek değerlere yakinken, uluslararası taşımacılık tahminlerinin gerçek gözlemlerden genellikle uzak olduğunu göstermektedir. Hedef değişkenin biriminde yorum yapılmasına olanak veren RMSE değerleri, modelin enerji tüketimi üzerindeki üstün performansını daha da doğrulamaktadır.

Analiz sonucunda elde edilen R^2 skorları modelin ulaşım sektörüne ilişkin petrol tüketimi ve ulaşım sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyon modellerinin olağanüstü derecede yüksek bir kestirim gücüne sahip olduğunu ve bu iki değişkenin algoritma tarafından iyi açıklandığını göstermektedir. R^2 değerlerinin yüksek olması, bu modellerin ilgili değişkenlerdeki varyansı neredeyse tamamen açıklayabildiğini ve dolayısıyla bu alanlarda son derece güvenilir tahminler yapabildiğini göstermektedir. Yani modelin hem ulaşım sektöründe kullanılan enerji tüketimini hem de çevresel bozulma düzeyini etkileyen faktörleri güçlü bir şekilde açıklayabildiğini göstermektedir. Model LPI bileşenlerini sırasıyla lojistik kalite ve yetkinlik, altyapı, takip ve izlenebilirlik, gümrükleme değişkenlerini başarıyla tahmin edebilirken; zamanlama ve uluslararası taşımacılık göstergelerini açıklamakta görece zorluk çekmektedir ve daha fazla özellik mühendisliği veya hiperparametre optimizasyonundan faydalanabileceğini göstermektedir. LPI bileşenlerinin, petrol tüketimi ve emisyonlara kıyasla, modele dâhil edilmeyen başka faktörlerden de etkilendiğini düşündürmektedir.

Değişken önem düzeylerine göre her bir hedef LPE göstergesi için, diğer LPE göstergeleri tutarlı bir şekilde en etkili tahmincilerdir ve analiz sonuçları lojistik performans ölçütleri içinde yüksek derecede karşılıklı bir bağımlılık olduğunu gösterilmektedir. Bunun sebeplerinden biri bu göstergelerin yapısal özellikleri ve sistem içi ilişkilerinin benzer olmasıdır.

LPE göstergelerinden takip ve izlenebilirlik değişkenini en iyi tahmin edenler sırasıyla lojistik kalite ve yetkinlik, altyapı, gümrükleme ve zamanlamadır. Lojistik kalite ve yetkinlik, izlenebilirlik tahmininin birinci itici gücüdür çünkü sevkiyatların gerçek zamanlı takibi, lojistik firmalarının teknolojik kapasitesi, dijital altyapısı ve operasyonel yetkinliğiyle ilgilidir. Bir sevkiyatın nerede olduğu; ne kadar iyi takip edilebildiği, lojistik hizmetlerin kalitesi ve bu alandaki profesyonellerin yetkinliği, gümrük süreçlerinin şeffaflığı ve hızı, fiziksel altyapının güvenilirliği ile ilişkili

olmaktadır. Ekonomik ve çevresel göstergelerin ise takip ve izlenebilirlik üzerinde sınırlı bir rol oynadığını görülmektedir.

Benzer şekilde, lojistik kalite ve yetkinlik değişkeninin tahminine en fazla katkıda bulunan özellikler altyapı ve takip ve izlenebilirliktir. Çünkü bir ülkenin lojistik kalitesi, fiziksel altyapısının sunduğu olanaklar ve eş zamanlı izleme gibi kritik operasyonel süreçlerin ne kadar sorunsuz işlediği ile doğrudan belirlenmektedir. Lojistik kalite ve yetkinlik tahmininde lojistik özelliklerden sonra en etkili özellikler ise ekonomi ile alakalı olan özelliklerdir. Çevresel özelliklerin, lojistik kalite ve yetkinlik tahmini üzerinde çok daha zayıf veya bazı durumlarda ihmal edilebilir bir etkisi bulunmaktadır.

Uluslararası taşımacılık hedef değişken olduğunda yüksek lojistik kalite ve yetkinlik seviyesinin uluslararası taşımacılık tahminini desteklediği, düşük seviyelerin ise hedef değişkenin tahmininde daha az etki yarattığı gözlemlenmektedir. Uluslararası taşımacılığın verimliliği, büyük oranda lojistik altyapının kalitesi ve paydaşların (taşıma şirketleri, limanlar, gümrükler) yetkinliğine bağlı bulunmaktadır. Ekonomik büyüme, ticari dışa açıklık, yüksek enerji tüketimi ve yüksek çevresel bozulma ise, uluslararası taşımacılık tahmin skorunu artırıcı bir etkiye sahip olmakla beraber lojistik özelliklere göre daha az etkililerdir.

Gümrükleme değişkeni için en önemli özellik altyapıdır. Bunun başlıca sebebi lojistikte altyapının, gümrük süreçlerinin doğrudan gerçekleştiği fiziksel ortamı belirlemesidir. Kaliteli yollar, limanlar, depolama alanları ve teknolojik altyapılar, gümrük işlemlerinin hızını ve doğruluğunu doğrudan etkilerken; yetersiz altyapı ise işlem sürelerini uzatarak, hata ve gecikmeleri artırmaktadır. Dolayısıyla altyapı hem operasyonel verimlilik hem de hizmet kalitesi açısından gümrükleme performansının temel belirleyicilerindendir. Ekonomik büyüme, çevresel bozulma, enerji tüketimi, zamanlama ve ticari dışa açıklık ise gümrükleme performansını tahmin etmede çok zayıf birer faktör olarak değerlendirilmektedir. Algoritma, gümrükleme tahmininin, ülkenin genel ekonomik büyüklüğü veya enerji tüketiminden ziyade, doğrudan lojistik süreçlerin kalitesine ve fiziksel altyapının yeterliliğine bağlı olduğunu öğrenmiştir.

Algoritmada zamanlama tahmini için en baskın ve en önemli değişken, takip ve izlenebilirlik özelliğidir. Yüksek takip ve izlenebilirlik skorları, zamanlama tahmin

performansını çok güçlü bir şekilde artırırken, bu alandaki zayıflıklar tahmin performansını en çok düşüren faktördür. Takip ve izlenebilirlik göstergesinde, bir gönderinin konumunun, durumunun ve sürecinin gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilmesiyle, teslimat gecikmelerini önceden fark edilerek, sorunlara anında müdahale edilebilmektedir. Bu nedenle, takip ve izlenebilirlik düzeyi yüksek olan lojistik sistemlerde zamanlama daha iyi yönetilebilmektedir. Analize göre ekonomik ve çevresel özellikler zamanlama tahmini üzerindeki etkisinin büyüklüğü oldukça azdır ve asıl belirleyiciler kadar güçlü değildir. Algoritmaya göre zamanlama; doğrudan lojistik kabiliyetlere (izlenebilirlik, altyapı vb.) bağlıdır; enerji tüketimi ve ticari dışa açıklık ise bu özel denklemde çok zayıf bir etkiye sahiptir.

Altyapı değişkenini en iyi tahmin eden değişken gümrükleme özelliğidir. Gümrükleme süreçleri, bir ülkenin fiziksel ve kurumsal altyapısının etkinliğini doğrudan yansıtmaktadır. Gümrükleme işlemlerinin hızlı, dijital ve entegre biçimde yürütülebilmesi; liman, sınır kapısı, kara ve demiryolu bağlantıları, bilgi-iletişim sistemleri gibi altyapı unsurlarının güçlü olmasına bağlı bulunmaktadır. Başka bir ifadeyle, iyi işleyen bir gümrük sistemi, gelişmiş ulaşım koridorları, modern depolama alanları, etkin bilgi paylaşım ağları ve otomasyon teknolojileri ile desteklenir. Bunun tersi durumda, altyapı eksiklikleri gümrükleme süreçlerini doğrudan yavaşlatarak verimsiz hale getirmektedir. Bu nedenle modelde gümrükleme değişkeni, altyapının tahminini en fazla etkileyen özellik olmaktadır.

Altyapı tahminini ikinci en fazla etkileyen lojistik özellik olan lojistik kalite ve yetkinlik, kara yolları, limanlar, demir yolu sistemlerini ve bu sistemleri kullanan taşımacılık firmalarının, gümrük yetkililerinin, liman operatörlerinin ne kadar verimli, güvenilir ve profesyonel çalıştığını ifade etmektedir. Örneğin, bir ülkenin yolları, limanları ne kadar gelişmiş olursa olsun; eğer sürece dâhil olan lojistik firmaları ve kamu kurumları yetersizse, taşıma süreci aksayabilmektedir. Bu nedenle altyapının işlevselliği, lojistik sistemin kalitesine ve yetkinliğine bağlı bulunmaktadır. Çevresel bozulma ve enerji tüketiminin ise altyapı üzerindeki etkisi sınırlıdır. Makroekonomik faktörler olan GSYİH ve ticari dışa açıklık; çevresel bozulmanın göstergesi olan CO₂ emisyonları ve enerji tüketimi, lojistik performansın bileşenleri kadar baskın belirleyiciler değildir. Bu yüzden, ticaret ve ekonomik büyüme gibi ekonomik faktörlerin ve CO₂ emisyonu, enerji tüketimi gibi çevresel

faktörlerin küçük bir rol oynadığı LPE göstergelerini iyileştirmek için lojistikle ilgili özelliklere odaklanmaya doğru eğilim gösterilmelidir.

Çevresel bozulma, ulaşımda kullanılan enerji tüketimi tahmininde en önemli özellik olarak ön plana çıkmaktadır. Yapılan analiz sonucunda yüksek çevresel bozulmanın enerji tüketimi tahminini artırdığı, düşük çevresel bozulmanın ise enerji tüketiminin tahminini düşürdüğü sonucuna ulaşılmaktadır. Karbon emisyonları, fosil yakıtların özellikle de petrolün yakılması sonucu ortaya çıktığından, bu iki değişken arasında nedensel bir ilişki bulunmasıdır (Chandran vd., 2013; Popescu vd., 2024). Bu doğrusal ilişki, algoritmanın emisyonları güçlü bir öngörücü olarak değerlendirmesine yol açmaktadır. Ekonomik büyüme için de durum benzerdir. Düşük ekonomik büyüme seviyeleri, enerji tüketiminin tahminini düşürmektedir. Düşük ticari dışa açıklık değerleri, ulaşım sektörü petrol ürünleri nihai tüketimi hedef değişkeninin tahmin edilen değerinin artmasına katkıda bulunmaktadır; Amerika Birleşik Devletleri, Japonya gibi büyük ekonomiye sahip ülkelerde genellikle dışa açıklık oranı düşüktür. Aynı zamanda iç lojistik, şehirlerarası kara taşımacılığı ve otomobil sahipliği yüksek olduğundan ulaşımdan kaynaklı petrol tüketimi ve emisyon yüksek bulunmaktadır. Enerji tüketimi, LPI özelliklerinden güçlü sinyaller almamaktadır. Algoritma bu özellikleri dikkate almakta ancak bu özelliklerin değişim göstermesinin, modelin tahmin ettiği enerji tüketimini çok fazla etkilemediği anlamına gelmektedir. Petrol tüketimine ilişkin genel sonuçlar, Ahmad vd. (2024)'nin çalışmasına paralel olarak, doğru enerji tüketimi tahminleri için modelin lojistik metriklerindense, emisyon ve ekonomik faktörlere öncelik verilmesi gerektiğini göstermektedir.

Analiz sonucunda çevresel bozulmanın en baskın belirleyicisinin enerji tüketimi olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuç ulaşım sektöründeki emisyonların ana kaynağının fosil yakıt tüketimi olduğu gerçeğini pekiştirmektedir. Analiz sonuçlarına göre düşük enerji tüketiminin algoritma tahmininde karbon emisyonunu güçlü biçimde azalttığı görülmektedir. Yüksek enerji tüketimi ise emisyonu artırıcı etki gösterse de bu etki daha sınırlı düzeydedir. Bu, algoritmaya göre düşük tüketimin olumlu etkisi, yüksek tüketimin olumsuz etkisinden daha güçlü ve tutarlı bir şekilde yansımaktadır. Ekonomik büyümenin çevresel bozulma tahmininde önemli bir belirleyici olması ise, ekonomik aktivitenin artmasının ulaşım talebini ve dolayısıyla

emisyonları artırmasıyla açıklanmaktadır (Kim ve Min, 2011). Bir ekonomi büyüdükçe, daha fazla üretim ve tüketim olmaktadır, bu da lojistik faaliyetleri ve dolayısıyla emisyonu neden olan yakıt tüketimini artırmaktadır. Algoritmaya göre ticari dışa açıklığın düşük değerleri, çevresel bozulmaya tahminine pozitif yönde katkı sağlamaktadır. Bu durum, dış ticareti sınırlı ülkelerde üretim ve ulaşım faaliyetlerinin genellikle iç pazara yönelik ve daha az verimli teknolojilere dayandığını, dolayısıyla birim üretim başına daha yüksek emisyon üretildiğini düşündürebilmektedir. Başka bir ifadeyle, düşük ticari dışa açıklık değerleri, karbon yoğun bir ekonomik yapı ile ilişkilidir. Analize göre lojistik kalitesi, takip sistemi, taşımacılık altyapısı gibi lojistikle alakalı faktörler ise karbon emisyonu tahminini doğrudan ve güçlü şekilde açıklayamamaktadır.

Çevresel bozulmanın tahminine olan katkıda, ulaşım sektöründeki enerji tüketiminin baskın bir üstünlüğünü bulunmaktadır. Bu sonuç Chandran vd. (2013); Azlina vd. (2014); Saboori vd. (2014) ve Popescu vd. (2024)'nin çalışmalarında ulaştıkları sonuca paralellik göstermektedir. Petrol gibi fosil yakıtların yakılmasının doğrudan bir sonucu çevresel bozulma ve iklim değişikliği olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca ekonomik büyümenin çevresel bozulmayı artıracığı yönünde çalışmalar mevcuttur (Mariano vd., 2017; Saboori vd. 2014). Analizde bulunan çevresel bozulma ve ekonomik büyümeye ilişkin sonuçlar Mariano vd. (2017) ve Saboori vd. (2014)'nin çalışmalarıyla uyum sağlamaktadır.

Kim ve Min (2011) ve Saabori vd. (2014)'ün yaptıkları çalışmanın sonuçlarına paralel olarak ekonomik büyüme ve ticari dışa açıklık da enerji tüketimi için önemli faktörler olarak belirlenmektedir, çünkü ekonomik büyüme ve artan dış ticaret hacmi daha fazla mal ve insan taşınması anlamına gelmektedir; bu da doğrudan daha fazla enerji tüketimini tetiklemektedir.

Çalışmasında LPE göstergeleri ile ölçülen lojistik performansının çevresel bozulmayla bağlantılı olduğu sonucuna varan Zaman ve Shamsuddin (2017), Liu vd. (2018), Karaduman vd. (2020), Wan vd. (2022), Wang ve Dong, (2023) ve Chomjinda vd. (2024)'nin aksine, bu çalışmada LPE temelli göstergelerin hem emisyonu hem de petrol tüketimine etkisinin önemsiz seviyede olduğu görülmektedir. LPE bileşenlerinin petrol tüketimi ve emisyon değerleri üzerindeki doğrudan belirleyiciliğinin çok düşük çıkması, lojistik performansının kendisinin,

lojistik hacminin büyüklüğü kadar enerji tüketimini etkilemediğini, yani daha verimli lojistik operasyonlarının yakıt tüketimini azaltmada sınırlı bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir. Aynı şekilde LPE temelli göstergeler hedef değişken olduğunda, çevresel bozulma ve enerji tüketiminin de etkisi önemsiz seviyededir. Özçelik ve Töngür (2023) de paralel sonuçlara ulaşarak, petrol zengini olmayan MENA ülkelerinde lojistik performansındaki değişimin çevresel bozulma üzerinde net bir etkisi olmadığı; LPE ve alt göstergelerinin çevre dostu uygulamalarla doğrudan ilişkili olmadığı gözlemlenmiştir.

Bulgulardan OECD ülkeleri özelinde elde edilebilecek önemli politika çıkarımları bulunmaktadır. LPE bileşenleri arasındaki karşılıklı bağımlılık, altyapı veya lojistik kalite ve yetkinlik gibi bir alanlardaki iyileştirmelerin lojistik sistemi genelinde kademeli faydalar sağlayabileceğini ve genel verimliliği artırabileceğini göstermektedir. Hükümetler ve politika yapıcılar, lojistik performansını artırmak için ulaşım altyapısına ve iş gücü eğitime yatırım yapmaya öncelik vermelilerdir. Ulaşım sektörü petrol tüketimi ve emisyon arasındaki güçlü bağlantı, ulaşım da enerji tüketiminin çevresel sonuçlarını vurgulamaktadır ve elektrikli veya hidrojenle çalışan araçlar gibi daha temiz enerji alternatiflerini ve daha sıkı emisyon düzenlemelerini teşvik eden politikaları gerekli kılmaktadır. Ayrıca hükümet, çevre dostu tasarıma sahip araçlar için sübvansiyonlar, düşük faizli krediler ve vergi muafiyetleri sağlayarak yeşil taşımacılığı ve lojistik faaliyetleri teşvik etmelidir. Lojistik sektörü ile düzenleyici otoriteler veya hükümet arasında iş birliği sağlanarak, sertifika programları yoluyla lojistik ve iş faaliyetlerinin çevreci hale getirilmesi ve sürdürülebilir gündemin desteklenmesi gerekmektedir. Sanayide yeşil büyümeyi destekleyecek, düzenleyici otorite ve hükümet politikaları geliştirilmelidir. Ek olarak, GSYİH ve ticari dışa açıklığın tutarlı ancak ikincil rolü, ekonomik büyümenin ve ticaret açıklığının lojistik ve çevresel sonuçları dolaylı olarak etkilediğini ve dengeli ticaret politikalarının emisyonları artırmadan sürdürülebilir lojistik gelişimini destekleyebileceğini göstermektedir.

Gelecekteki araştırmalar için, ilk olarak, teknoloji benimseme oranları veya ulaşım da yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi ek değişkenleri dâhil etmek, modellerin açıklayıcı gücünü artırabilmektedir. Bu ilişkilerin zaman içinde nasıl dönüşüme uğradığı, özellikle lojistikte karbonsuzlaştırma veya dijitalleşme gibi

küresel eğilimlere yanıt olarak incelenebilir. Nedensel analiz tekniklerinin uygulanması, burada kullanılan öngörücü yaklaşımı tamamlayabilir ve bu ilişkileri yönlendiren mekanizmalara ilişkin daha derin içgörüler sağlayabilmektedir.



KAYNAKLAR

- Abubakar, M. A., Abdullahi, M. ve Bala, K. (2018). Analysis of the causality links between the growth of the construction industry and the growth of the Nigerian economy. *Journal of Construction in Developing Countries*, 23(1), 103-113.
- Abukhader, S. M. ve Jönson, G. (2004). Logistics and the environment: Is it an established subject? *International Journal of Logistics Research and Applications*, 7(2), 137-149.
- Acar, Z. ve Günsel, A. (2010). The effects of process innovation in logistics service. Kakouris, A. (Ed.). *In Proceedings of the 5th European Conference on Innovation and Entrepreneurship*, National and Kapodistrian University of Athens, 1-9.
- Agility (2014). Agility Emerging Markets Indices. Erişim adresi: <https://emli.agility.com/downloads/>
- Agility (2022). Agility Emerging Markets Indices. Erişim adresi: <https://emli.agility.com/downloads/>
- Agility (2025). Agility Emerging Markets Indices. Erişim adresi: <https://emli.agility.com/downloads/>
- Ahmad, A. U., Jeevan, J. ve Ruslan, S. M. M. (2024). Evaluating key drivers of green logistics performance during economic growth in African Countries. *Economy: Strategy and Practice*, 19(2), 6-19.
- Akar, Ö. ve Güngör, O. (2012). Rastgele Orman algoritması kullanılarak çok bantlı görüntülerin sınıflandırılması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (106), 139-146.
- Akbulut, S., Yagin, F. H., Cicek, I. B., Koc, C., Colak, C. ve Yilmaz, S. (2023). Prediction of perforated and nonperforated acute appendicitis using machine learning-based explainable artificial intelligence. *Diagnostics*, 13(6), 1-14.
- AKİB (2021). Avrupa Yeşil Mutabakatı Fit for 55 Teklif Paketi'nin Türkçe tercümesi. Erişim adresi: <https://www.akib.org.tr/files/documents/2021/Download/fit-for-55-teklif-paketi-turkce-tercumesi-30.09.2021.pdf>
- Al-Jabir, M. ve Isaifan, R. J. (2024). Long-term projection of transport-related social cost of Greenhouse Gas Emissions in Qatar. *Sustainability*, 16(2), 1-16.
- Altıntaş, F. F. (2021). Lojistik Performans bileşenleri arasındaki ilişkilerin yapay sinir ağları ile kestirimi. *Euroasia Journal of Social Sciences & Humanities*, 8(20), 101-112.

- Anderson, J. C. ve Narus, J. A. (1995). Capturing the value of supplementary services. *Harvard Business Review*, 73(1), 75-83.
- Andrejić, M. M. (2013). Measuring efficiency in logistics. *Vojnotehnički Glasnik*, 61(2), 84-104.
- Antwarg, L., Miller, R. M., Shapira, B. ve Rokach, L. (2021). Explaining anomalies detected by autoencoders using Shapley Additive Explanations. *Expert Systems with Applications*, 186, 115736.
- Apte, U. M. ve Viswanathan, S. (2000). Effective Cross docking for improving distribution efficiencies. *International Journal of Logistics*, 3(3), 291-302.
- Armstrong & Associates, Inc. (2023). Global 3PL market analysis. Erişim adresi: <https://www.3plogistics.com/3pl-market-info-resources/>
- Arvis J.F., Ojala, L., Shepherd, B., Ulybina, D. ve Wiederer, C. (2023). Connecting to Compete 2023: Trade logistics in the global economy, The Logistics Performance Index and its indicators. Erişim adresi: https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-04/LPI2023_report.pdf
- Arvis J.F., Saslavsky, D., Ojala, L., Shepherd, B., Busch, C. ve Raj, A. (2014). Connecting to Compete 2014: Trade logistics in the global economy, The Logistics Performance Index and its indicators. Erişim adresi: https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-01/LPI_Report_2014.pdf
- Arvis, J.F., Mustra, M.A., Ojala, L., Shepherd, B. ve Saslavsky, D. (2010). Connecting to Compete 2010: Trade logistics in the global economy, The Logistics Performance Index and its indicators. Erişim adresi: https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-02/LPI2010_Report.pdf
- Arvis, J.F., Mustra, M.A., Ojala, L., Shepherd, B. ve Saslavsky, D. (2012). Connecting to Compete: Trade logistics in the global economy, The Logistics Performance Index and its indicators. Erişim adresi: https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-02/LPI_2012_Report.pdf
- Arvis, J.F., Mustra, M.A., Panzer, J., Ojala, L. ve Naula, T. (2007). Connecting to Compete: Trade logistics in the global economy, The Logistics Performance Index and its indicators. Erişim adresi: https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2023-02/LPI2007_Report.pdf
- Arvis, J.F., Ojala, L., Wiederer, C., Shepherd, B., Raj, A., Dairabayeva, K. ve Kiiski, T. (2018). Connecting to compete 2018: Trade logistics in the global economy, The Logistics Performance Index and its indicators. Erişim adresi: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/628a4f9d-7faa-54bf-97b0-f6080c6d46cd/content>
- Arvis, J.F., Ulybina, D. ve Wiederer, C. (2024). From survey to big data the new Logistics Performance Index. Erişim adresi: <https://lpi.worldbank.org/sites/default/files/2024-05/IDU1898e51581445914e9218cd110f8195f5a07f.pdf>
- Avrupa Birliği Başkanlığı (2024). Avrupa Yeşil Mutabakatı. Erişim adresi: https://www.ab.gov.tr/avrupa-yesil-mutabakati_53729.html
- Avrupa Çevre Ajansı (2021). Transport and environment report 2021: Decarbonising road transport - the role of vehicles, fuels and transport demand. Erişim

adresi: <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2021>

- Avrupa Çevre Ajansı (2022). Transport and environment report 2022: Digitalisation in the mobility system: challenges and opportunities. Erişim adresi: <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2022>
- Awasthi, A., Chauhan, S. S., ve Goyal, S. K. (2011). A Multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(1-2), 98-109.
- Azlina, A. A., Law, S. H. ve Mustapha, N. H. N. (2014). Dynamic linkages among transport energy consumption, income and CO₂ emission in Malaysia. *Energy Policy*, 73, 598-606.
- Baki, B. ve Şimşek, B. (2004). Lojistik faaliyetlere göre performans ölçütlerinin belirlenmesi. *Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği XXIV Ulusal Kongresi*, Ankara. 15-21.
- Ballis, A. ve Mavrotas, G. (2007). Freight village design using the multicriteria method PROMETHEE. *Operational Research*, 7, 213-231.
- Bart, J. C., Palmeri, N. ve Cavallaro, S. (2010). *Biodiesel science and technology: from soil to oil*. Woodhead Publishing Limited.
- Bartholdi, J. J. ve Gue, K. R. (2004). The best shape for a crossdock. *Transportation Science*, 38(2), 235-244.
- Basuchoudhary, A., Bang, J. T. ve Sen, T. (2017). *Machine-learning techniques in economics: new tools for predicting economic growth*. Springer.
- Bayraktutan, Y. ve Özbilgin, M. (2014). Lojistik merkez “Kocaeli” (Proje Raporu). Kocaeli: Baskı Dünyası. Erişim adresi: https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/assets/upload/dosyalar/lojistik_merkez_kocaeli_proje_raporu.pdf
- Bayraktutan, Y. ve Özbilgin, M. (2015). Lojistik maliyetler ve lojistik performans ölçütleri. *Maliye Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 95-112.
- Beamon, B. M. (1999). Designing the green supply chain. *Logistics Information Management*, 12(4), 332-342.
- Bernard, S., Adam, S. ve Heutte, L. (2007). Using random forests for handwritten digit recognition. In *Ninth international Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007)*, 1043-1047.
- Betts, A., ve Bloom, L. (2014). Humanitarian innovation: The state of the art. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA), *OCHA Policy and Studies Series*, 1-30.
- Biau, G. (2012). Analysis of a random forests model. *The Journal of Machine Learning Research*, 13, 1063-1095.
- Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (2024). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and sinks: 1990-2022; United States Environmental Protection Agency, EPA 430R-24004. Erişim adresi:

<https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2022>

- Birleşmiş Milletler (2022a). World Population Prospects 2022, Summery of Results. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Erişim adresi: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf?_gl=1*iwu801*_ga*MTE1NTEyNjQyMy4xNjY1ODYyNzk3*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY2NTg2Mjg5OC4xLjEuMTY2NTg2MjkyNy4wLjAuMA
- Birleşmiş Milletler (2022b). United Nations Climate Change, Annual Report 2022. Erişim adresi: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/UNClimateChange_AnnualReport_2022.pdf
- Birleşmiş Milletler (2025). Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development. Sustainable Transport. Erişim adresi: <https://sdgs.un.org/topics/sustainable-transport>
- Boulesteix, A. L., Janitza, S., Kruppa, J. ve König, I. R. (2012). Overview of random forest methodology and practical guidance with emphasis on computational biology and bioinformatics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(6), 493-507.
- Bowersox, D. J. (1998). Introducing the strategic visioning series. *Journal of Business Logistics*, 19(1), 1-4.
- Bowersox, D., Mentzer, J. ve Speh, T. (1995). Logistics leverage. *Journal of Business Strategies*, 12(1), 36-49.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32.
- Brewer, P. C. ve Speh, T. W. (2000). Using the balanced scorecard to measure supply chain performance. *Journal of Business logistics*, 21(1), 75-93.
- Brooks, D. H. (2010). Regional cooperation, infrastructure, and Trade costs. *ADB Working Paper*, No. 123, Asian Development Bank Institute, Tokyo.
- Burity, J. (2021). The importance of logistics efficiency on customer satisfaction. *Journal of Marketing Development and Competitiveness*, 15(3), 26-35.
- Camp, R.C. (1989). *Benchmarking: The Search for Industry Best Practices that Lead to Superior Performance* (1st ed.). Productivity Press, ASQC Quality Press.
- Cao, S. ve Hu, Y. (2024). Interpretable machine learning framework to predict gout associated with dietary fiber and triglyceride-glucose index. *Nutrition & Metabolism*, 21(1), 25.
- Caplice, C. ve Sheffi, Y. (1995). A review and evaluation of logistics performance measurement systems. *The International Journal of Logistics Management*, 6(1), 61-74.
- Castronuovo, G., Favia, G., Telesca, V. ve Vammacigno, A. (2023). Analyzing the interactions between environmental parameters and cardiovascular diseases using random forest and SHAP algorithms. *Reviews in Cardiovascular Medicine*, 24(11), 330.

- Centraal Bureau voor de Statistiek (2025). OECD countries. Erişim Adresi: <https://www.cbs.nl/en-gb/news/2024/42/netherlands-lags-behind-other-oecd-countries-on-labour-productivity-gains/oecd-countries#:~:text=The%20members%20of%20the%20OECD,%2C%20Portugal%2C%20Slovenia%2C%20Slovakia%2C>
- Chan, F. T. ve Kumar, N. (2007). Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach. *Omega*, 35(4), 417-431.
- Chandran, V. G. R. ve Tang, C. F. (2013). The impacts of transport energy consumption, foreign direct investment and income on CO₂ emissions in ASEAN-5 economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 445-453.
- Chen, H. T., Liu, T. L. ve Fuh, C. S. (2006). Segmenting highly articulated video objects with weak-prior random forests. Leonardis A., Bischof H. ve Pinz A. (Ed.). In *Computer Vision—ECCV 2006: 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, May 7-13, 2006, Proceedings, Part IV*. Springer Berlin Heidelberg, 373-385.
- Cheng, L. C. ve Grimm, C. M. (2006). The application of empirical strategic management research to supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 27(1), 1-55.
- Chicco, D., Warrens, M. J. ve Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Peerj Computer Science*, 7, 1-24.
- Chomjinda, J., Piladaeng, J., Kulthorn, T. ve Thongnim, P. (2024). Green Clustering Analyzing Logistics Performance and Carbon Emissions with K-Means and Gaussian Mixture Models. In *2024 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications (ITC-CSCC)*, 1-6.
- Chow, G., Heaver, T. D. ve Henriksson, L. E. (1994). Logistics performance: definition and measurement. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24(1), 17-28.
- Christopher, M. (2022). *Logistics and supply chain management*. Pearson Uk.
- Chu, Z. (2012). Logistics and economic growth: a panel data approach. *The Annals of regional science*, 49(1), 87-102.
- Čižiūnienė, K., Matijošius, J., Sokolovskij, E. ve Balevičiūtė, J. (2024). Assessment of implementing green logistics principles in railway transport: The case of Lithuania. *Sustainability*, 16(7), 2716.
- ClimateWatch (2024). Data Explorer. Erişim adresi: https://www.climatewatchdata.org/data-explorer/historical-emissions?historical-emissions-data-sources=climate-watch&historical-emissions-end_year=2021&historical-emissions-gases=co2&historical-emissions-regions=All%20Selected&historical-emissions-sectors=total-including-lucf%2Ctotal-including-lucf&page=1
- Colicchia, C., Marchet, G., Melacini, M. ve Perotti, S. (2013). Building environmental sustainability: empirical evidence from Logistics Service Providers. *Journal of Cleaner Production*, 59, 197-209.

- Cordeau, J. F., Pasin, F. ve Solomon, M. M. (2006). An integrated model for logistics network design. *Annals of Operations Research*, 144, 59-82.
- Cui, C., Mu, F., Tang, M., Lin, R., Wang, M., Zhao, X., ... & Wang, J. (2022). A prediction and interpretation machine learning framework of mortality risk among severe infection patients with pseudomonas aeruginosa. *Frontiers in Medicine*, 9, 942356.
- Cuturela, S. C. ve Manole, A. (2013). A short historical perspective on the evolution of logistics and its implications for globalization. *Romanian Statistical Review*, 3, 188-198.
- Çancı, M. ve Türkay, M. (2007). *Marmaray'da yük taşımacılığı ve çok modlu sistemle entegrasyonu*. Ulaştırma Kongresi, 1, 237-246.
- De Souza, R., Goh, M., Gupta, S. ve Lei, L. (2007). An investigation into the measures affecting the integration of ASEAN's priority sectors: Phase 2: the case of logistics. *REPSF Project*, 6(1), 1-93.
- Démurger, S. (2001). Infrastructure development and economic growth: An explanation for regional disparities in China? *Journal of Comparative Economics*, 29(1), 95-117.
- Denil, M., Matheson, D. ve Freitas, N. (2013). *Consistency of online random forests*. In International conference on machine learning, 1256-1264.
- Dess, G. G. ve Robinson Jr, R. B. (1984). Measuring organizational performance in the absence of objective measures: the case of the privately-held firm and conglomerate business unit. *Strategic Management Journal*, 5(3), 265-273.
- Dong, J., Deng, C., Li, R. ve Huang, J. (2016). Moving low-carbon transportation in Xinjiang: evidence from STIRPAT and rigid regression models. *Sustainability*, 9(24), 1-15.
- Dünya Bankası (2014). Connecting to compete 2014: Trade logistics in the global economy. Erişim adresi: https://documents1.worldbank.org/curated/en/951051468332056443/pdf/904190WP0LPI0R00Box385316B00PUBLIC0.pdf?_gl=1*16ruz9*_gcl_au*MTIyNTQ2NTI4NC4xNzI2NTk5MzMy
- Dünya Bankası (2023). Logistics Performance Index (LPI), Report. Erişim adresi: <https://lpi.worldbank.org/report>
- Dünya Bankası (2024). World Development Indicators. Erişim adresi: <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&country=TUR#>
- Dünya Sağlık Örgütü (2019). Healthy environments for healthier populations: Why do they matter, and what can we do? Erişim adresi: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-CED-PHE-DO-19.01>
- Elshaw, R., Maher, M. ve Sakr, S. (2019). Automated machine learning: State-of-the-art and open challenges. arXiv preprint arXiv:1906.02287, 1-23.
- Erickson, L. E. ve Brase, G. (2020). Paris agreement on climate change. In *Reducing Greenhouse Gas Emissions and Improving Air Quality, Two Interrelated Global Challenges*, CRC Press, 11-22.

- Erkan, B. (2014). The importance and determinants of logistics performance of selected countries. *Journal of Emerging Issues in Economics, Finance and Banking*, 3(6), 1237-1254.
- Erturgut, R. (2021). *Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi*, Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- European Commission (2011). Transport 2050: The major challenges, the key measures. Erişim adresi: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/memo_11_197
- European Commission (2020). Factsheet - The Transport and Mobility Sector. Erişim adresi: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/867229/Factsheet%20-%20The%20Transport%20and%20Mobility%20Sector.pdf>
- European Commission (2025a). Renewable Energy Directive. Erişim adresi: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en
- European Commission (2025b). European Climate Law. Erişim adresi: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en
- European Commission (2025c). Fit for 55. Erişim adresi: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/>
- European Environment Agency (2024). Greenhouse gas emissions from transport in Europe. Erişim adresi: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport>
- European Parliament (2025). Fact Sheets on the European Union, Renewable energy. Erişim adresi: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/70/renewable-energy>
- Fang, Y., Lu, X. ve Li, H. (2021). A random forest-based model for the prediction of construction-stage carbon emissions at the early design stage. *Journal of Cleaner Production*, 328(129657), 1-11.
- Farooq, U., Gillani, S., Subhani, B. H. ve Shafiq, M. N. (2023). Economic policy uncertainty and environmental degradation: the moderating role of political stability. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 18785-18797.
- Federal Aviation Administration (2025). Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation. Erişim adresi: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/aec/corsia
- Fernández-Delgado, M., Cernadas, E., Barro, S. ve Amorim, D. (2014). Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? *The Journal of Machine Learning Research*, 15(1), 3133-3181.
- Fernando, S., Hall, C. ve Jha, S. (2006). NO_x reduction from biodiesel fuels. *Energy & Fuels*, 20(1), 376-382.
- Fernando, Y., Shaharudin, M. S. ve Abideen, A. Z. (2022). Circular economy-based reverse logistics: Dynamic interplay between sustainable resource

- commitment and financial performance. *European Journal of Management and Business Economics*, 32(1), 91-112.
- Food and Agriculture Organisation (2025). FAOLEX Database. Erişim adresi: <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC088009/>
- García-Arca, J. ve Prado-Prado, J. C., García-Lorenzo, A. (2006). Logistics improvement through packaging rationalization: A practical experience. *Packaging Technology and Science: An International Journal*, 19(6), 303-308.
- Garza-Reyes, J. A., Villarreal, B., Kumar, V. ve Molina Ruiz, P. (2016). Lean and green in the transport and logistics sector—a case study of simultaneous deployment. *Production Planning & Control*, 27(15), 1221-1232.
- Ge, M., Friedrich, J. ve Vigna, L. (2024). Where Do Emissions Come From? 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Sector. *World Resources Institute*.
- Gleason, J. M. ve Barnum, D. T. (1982). Toward valid measures of public sector productivity: Performance measures in urban transit. *Management Science*, 28(4), 379-386.
- Gourdin, K. N. (2001). *Global Logistics Management: A Competitive Advantage for the New Millennium*. Blackwell Publishing.
- Gönen Halıcı, Ş. (2024). *Perakende Hazır Giyim Firmasında Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Satış Tahmini*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Grawe, S. J. (2009). Logistics innovation: A literature-based conceptual framework. *The International Journal of Logistics Management*, 20(3), 360-377.
- Greenhouse Gas Protocol (2011). Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard, Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard. Erişim adresi: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf
- Greenhouse Gas Protocol (2025). About us. Erişim adresi: <https://ghgprotocol.org/about-us>
- Griffis, S. E., Goldsby, T. J., Cooper, M. ve Closs, D. J. (2007). Aligning logistics performance measures to the information needs of the firm. *Journal of Business Logistics*, 28(2), 35-56.
- Gruchmann, T., Schmidt, I., Lubjahn, S., Seuring, S. ve Bouman, M. (2019). Informing logistics social responsibility from a consumer-choice-centered perspective. *The International Journal of Logistics Management*, 30(1), 96-116.
- Gunasekera, K., Anderson, W. ve Lakshmanan, T. R. (2008). Highway-induced development: evidence from Sri Lanka. *World Development*, 36(11), 2371-2389.

- Guo, J., Zan, X., Wang, L., Lei, L., Ou, C. ve Bai, S. (2023). A random forest regression with Bayesian optimization-based method for fatigue strength prediction of ferrous alloys. *Engineering Fracture Mechanics*, 293, 109714.
- Gupta, S., Matthew, S., Abreu, P. M. ve Aires-de-Sousa, J. (2006). QSAR analysis of phenolic antioxidants using MOLMAP descriptors of local properties. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 14(4), 1199-1206.
- Gümüş, M., Özder, E. H., Hatinoğlu, E. ve Uçar, A. (2022). Geri dönüşüm atıklarının toplanmasında rota optimizasyonu: Alanya ilçesinde bir uygulama. *Journal of Turkish Operations Management*, 6(1), 1102-1112.
- Hadžikadunić, A., Stević, Ž., Yazdani, M. ve Hernandez, V. D. (2023). Comparative analysis of the Logistics Performance Index (LPI) of European Union countries: 2007-2023. *Journal of Organizations, Technology and Entrepreneurship*, 1(1), 1-11.
- Hassan, M. I. (2024). Logistics Performance Index: A Catalyst for International Trade Growth-An Applied Study on Global Economies, *JOCU*, 23(22), 434-450.
- Hausman, W. H., Lee, H. L. ve Subramanian, U. (2005). Global logistics indicators, supply chain metrics, and bilateral Trade patterns. *World Bank Policy Research Working Paper*, (3773), 1-29.
- Hayaloğlu, P. (2015). The impact of developments in the logistics sector on economic growth: the case of OECD countries. *International Journal of Economics and Financial Issues*, 5(2), 523-530.
- Hernandez, P. A., Franke, I., Herzog, S. K., Pacheco, V., Paniagua, L., Quintana, H. L., Soto, A. Swenson, J.J., Tovar, C., Valqui, T.H., Vargas, J. ve Young, B. E. (2008). Predicting species distributions in poorly-studied landscapes. *Biodiversity and conservation*, 17, 1353-1366.
- Herold, D. M. ve Lee, K. H. (2017). Carbon management in the logistics and transportation sector: An overview and new research directions. *Carbon Management*, 8(1), 79-97.
- Hesse, M. ve Rodrigue, J. P. (2007). *LOGISTICS-International encyclopedia of human geography* (1025), London: Elsevier. Forthcoming.
- Hidayat, R. (2014). Rancang Bangun Sistem Informasi Logistik. *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, 13(2), 707-724.
- Htun, K. Z. Z. (2021). *Improving logistics performance index in Myanmar: lessons from Thailand*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). World Maritime University, Master of Science in Maritime Affairs.
- ICAO (2025a). Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). Erişim adresi: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>
- ICAO (2025b). State Action Plans and Assistance. Erişim adresi: https://www.icao.int/environmental-protection/pages/climatechange_actionplan.aspx

- ICAO (2025c). Sustainable Aviation Fuels (SAF). Erişim adresi: <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx>
- IEA (2020). Global energy-related CO₂ emissions by sector. Erişim adresi: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector>
- IEA (2022). Total CO₂ Emissions. Erişim adresi: <https://www.iea.org/regions/europe/emissions>
- IEA (2024a). CO₂ Emissions in 2023, A new record high, but is there light at the end of the tunnel? Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>, Licence: CC BY 4.0
- IEA (2024b). Energy Efficiency 2024. Erişim adresi: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>, Licence: CC BY 4.0
- IEA (2025). Transport. Erişim adresi: <https://www.iea.org/energy-system/transport>
- IMO (2025a). Brief History of IMO. Erişim adresi: <https://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx>
- IMO (2025b). 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Erişim adresi: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx>
- IMO (2025c). History of MARPOL. Erişim adresi: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ConferencesMeetings/pages/Marpol.aspx>
- IMO (2025d). Special Areas under MARPOL. Erişim adresi: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Clean%20air%20in%20shipping.aspx>
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (Ed.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- ITF (2023). Transport Outlook, Decarbonising transport: Scenarios for the future. Erişim adresi: https://read.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2023_09f48ecd-en#page2
- İkizler, N. ve Ekim, G. (2025). ALS Hastaları İçin Dalgacık Dönüşümü ve Rastgele Orman Sınıflandırıcı Kullanılan EEG Tabanlı Haberleşme Sistemi. *EMO Bilimsel Dergi*, 15(1), 53-64.
- İklim Değişikliği Bakanlığı (2025a). Kyoto Protokolü. Erişim adresi: <https://iklim.gov.tr/kyoto-protokolu-i-35>
- İklim Değişikliği Bakanlığı (2025b). Paris Anlaşması. Erişim adresi: <https://iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34>
- Jayarathna, C. P., Agdas, D. ve Dawes, L. (2024). Perceived relationship between green logistics practices and sustainability performance: a multi-

- methodology approach. *The International Journal of Logistics Management*, 35(5), 1522-1548.
- Joelsson, S. R., Benediktsson, J. A. ve Sveinsson, J. R. (2006). *Feature selection for morphological feature extraction using random forests*. In Proceedings of the 7th Nordic Signal Processing Symposium-NORSIG 2006, 138-141.
- Jones, D. T., Hines, P. ve Rich, N. (1997). Lean logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 27(3/4), 153-173.
- Kabak, Ö., Ülengin, F. ve Ekici, Ş. Ö. (2018). Connecting logistics performance to export: A scenario-based approach. *Research in Transportation Economics*, 70, 69-82.
- Kalghatgi, G., Levinsky, H. ve Colket, M. (2018). Future transportation fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 103-105.
- Kara, K. (2022). Relationship between domestic logistics opportunity efficiency and international logistics opportunity efficiency based on market potential: Empirical research on developing countries. *Journal of Management Marketing and Logistics*, 9(2), 79-89.
- Karaduman, H. A., Karaman-Akgül, A., Çağlar, M. ve Akbaş, H. E. (2020). The relationship between logistics performance and carbon emissions: an empirical investigation on Balkan countries. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 12(4), 449-461.
- Karunasingha, D. S. K. (2022). Root mean square error or mean absolute error? Use their ratio as well. *Information Sciences*, 585, 609-629.
- Kaya, A. Ş. (2003). *Lojistik şirketlerinin organizasyon yapıları (Türkiye ve dünyada yeni lojistik eğilimler)*, (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi), İstanbul Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve İşletmeciliği Enstitüsü, İstanbul.
- Kenderdine, J. M. ve Larson, P. D. (1988). Quality and logistics: A framework for strategic integration. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 18(6), 5-10.
- Khan, S. A. R. (2019). The nexus between carbon emissions, poverty, economic growth, and logistics operations-empirical evidence from southeast Asian countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(13), 13210-13220.
- Khan, S. A. R. ve Qianli, D. (2017). Does national scale economic and environmental indicators spur logistics performance? Evidence from UK. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 26692-26705
- Khan, S. A. R., Sharif, A., Golpîra, H. ve Kumar, A. (2019). A green ideology in Asian emerging economies: From environmental policy and sustainable development. *Sustainable Development*, 27(6), 1063-1075.
- Khan, S. A. R., Zhang, Y., Anees, M., Golpîra, H., Lahmar, A. ve Qianli, D. (2018). Green supply chain management, economic growth and environment: A GMM based evidence. *Journal of Cleaner Production*, 185, 588-599.
- Khan, S. A. R., Zhang, Y., Kumar, A., Zavadskas, E. ve Streimikiene, D. (2020). Measuring the impact of renewable energy, public health expenditure,

- logistics, and environmental performance on sustainable economic growth. *Sustainable development*, 28(4), 833-843.
- Kim, I. ve Min, H. (2011). Measuring supply chain efficiency from a green perspective. *Management Research Review*, 34(11), 1169-1189.
- Kitapçı, H. (2019). *Taşımacılık sistemleri. İntermodal ve karma taşımacılık*. Erzurum Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi Yayınları, 67-85.
- Korucuk, S., Karamaşa, Ç., Demir, E. ve Memiş, S. (2023). A quantitative analysis for prioritizing success elements in agile logistics applications: The case of Giresun and Ordu. *Alphanumeric Journal*, 11(1), 63-84.
- Kotzab, H., Munch, H. M., de Faultrier, B. ve Teller, C. (2011). Environmental retail supply chains: when global Goliaths become environmental Davids. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 39(9), 658-681.
- Krzywinski, M. ve Altman, N. (2015). Multiple linear regression. *Nature methods*, 12(12), 1103-1105.
- Kumar, A., Antony, J. and Dhakar, T.S. (2006). Integrating quality function deployment and benchmarking to achieve greater profitability, *Benchmarking: An International Journal*, 13(3), 290-310.
- Lai, K. H. ve Cheng, T. E. (2009). *Just-in-time logistics*. London: Gower Publishing Limited.
- Lai, K. H. ve Wong, C. W. (2012). Green logistics management and performance: Some empirical evidence from Chinese manufacturing exporters. *Omega*, 40(3), 267-282.
- Lambert, D. M. ve Harrington, T. C. (1989). Establishing customer service strategies within the marketing mix: more empirical evidence. *Journal of Business Logistics*, 10(2), 44-60.
- Lambrechts, W., Son-Turan, S., Reis, L. ve Semeijn, J. (2019). Lean, green and clean? Sustainability reporting in the logistics sector. *Logistics*, 3(1), 1-23.
- Larina, I. V., Larin, A. N., Kiriliuk, O. ve Ingaldi, M. (2021). Green logistics-modern transportation process technology. *Production engineering archives*, 27(3), 184-190.
- Larson, P. D. (2021). Relationships between logistics performance and aspects of sustainability: A cross-country analysis. *Sustainability*, 13(2), 623.
- Larson, P. D., Elias, A. ve Viafara, J. (2013). Toward sustainable trucking: reducing emissions and fuel consumption. *Transportation Journal*, 52(1), 108-120.
- Lean, H. H., Huang, W. ve Hong, J. (2014). Logistics and Economic Development: Experience from China. *Transport Policy*, 32, 96-104.
- Lei, J. (2024). Efficient strategies on supply chain network optimization for industrial carbon emission reduction. *Journal of Computational Methods in Engineering Applications*, 1-11
- Li, J., Liu, S., Hu, Y., Zhu, L., Mao, Y. ve Liu, J. (2022). Predicting mortality in intensive care unit patients with heart failure using an interpretable machine

- learning model: retrospective cohort study. *Journal of Medical Internet Research*, 24(8), 183-190.
- Li, X., Sohail, S., Majeed, M. T., ve Ahmad, W. (2021). Green logistics, economic growth, and environmental quality: evidence from one belt and road initiative economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(24), 30664-30674.
- Liu, J., Yuan, C., Hafeez, M. ve Yuan, Q. (2018). The relationship between environment and logistics performance: Evidence from Asian countries. *Journal of Cleaner Production*, 204, 282-291.
- Liu, W. D., Tang, Z. P., Xia, Y., Han, M. Y. ve Jiang, W. B. (2019). Identifying the key factors influencing Chinese carbon intensity using machine learning, the random forest algorithm, and evolutionary analysis. *Acta Geographica Sinica*, 74(12), 2592-2603.
- Louppe, G. (2014). *Understanding random forests: From theory to practice*. (Yayımlanmamış doktora tezi). Faculty of Applied Sciences, Department of Electrical Engineering & Computer Science, Universite de Liege.
- Lu, M., Xie, R., Chen, P., Zou, Y. ve Tang, J. (2019). Green transportation and logistics performance: An improved composite index. *Sustainability*, 11(10), 2976.
- Lundberg, S. M. ve Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 1-10.
- Lundberg, S. M., Erion, G., Chen, H., DeGrave, A., Prutkin, J. M., Nair, B., Katz, R., Himmelfarb, J., Bansal, N. ve Lee, S. I. (2020). From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. *Nature machine intelligence*, 2(1), 1-27.
- Maersk (2024). Taşımacılık ve Yük. İntermodal taşımacılık nedir ve nasıl çalışır? Erişim adresi: <https://www.maersk.com/logistics-explained/transportation-and-freight/2024/09/06/intermodal-transportation>
- Magazzino, C., Mele, M. ve Schneider, N. (2022). A new artificial neural networks algorithm to analyze the nexus among logistics performance, energy demand, and environmental degradation. *Structural Change and Economic Dynamics*, 60, 315-328.
- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B. ve Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 1-8.
- Marchant, C. (2010). *Reducing the environmental impact of warehousing*. Mckinnon, A., Cullinane, S., Browne, M., Whiteing A. (Ed.). *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*, (167-192), United States: Kogan Page Limited.
- Marcot, B. G. ve Hanea, A. M. (2021). What is an optimal value of k in k-fold cross-validation in discrete Bayesian network analysis? *Computational Statistics*, 36(3), 2009-2031.

- Mariano, E. B., Gobbo Jr, J. A., de Castro Camioto, F. ve do Nascimento Rebelatto, D. A. (2017). CO₂ emissions and logistics performance: a composite index proposal. *Journal of Cleaner Production*, 163, 166-178.
- Martí, L., Puertas, R. ve García, L. (2014). The importance of the Logistics Performance Index in international trade. *Applied economics*, 46(24), 2982-2992.
- McKinnon, A. (2010). Green logistics: the carbon agenda. *Electronic Scientific Journal of Logistics*, 6(3), 2-9.
- Meade, L. ve Sarkis, J. (2002). A conceptual model for selecting and evaluating third-party reverse logistics providers. *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(5), 283-295.
- Mentzer, J. T. ve Firman, J. (1994). Logistics control systems in the 21st century. *Journal of Business Logistics*, 15(1).
- Mentzer, J. T. ve Konrad, B. P. (1991). An efficiency/effectiveness approach to logistics performance analysis. *Journal of Business Logistics*, 12(1).
- Mentzer, J. T. ve Williams, L. R. (2001). The role of logistics leverage in marketing strategy. *Journal of Marketing Channels*, 8(3/4), 29-47.
- MFA (2025a). Birleşmiş Milletler Çevre Programı. Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/birlesmis-milletler-cevre-programi.tr.mfa>
- MFA (2025b). Paris Anlaşması. Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>
- MFA (2025c). Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO). Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/uluslararasi-sivil-havacilik-orgutu-icao.tr.mfa>
- Miškić, S., Stević, Ž., Tadić, S., Alkhayyat, A. ve Krstić, M. (2023). Assessment of the LPI of the EU countries using MCDM model with an emphasis on the importance of criteria. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 11(3), 258-279.
- Mody, A. ve Wang, F. Y. (1997). Explaining industrial growth in coastal china: economic reforms... And what else? *The World Bank Economic Review*, 11(2), 293-325.
- Mohamud, I. H., Kafi, M. A., Shahron, S. A., Zainuddin, N. ve Musa, S. (2023). The role of warehouse layout and operations in warehouse efficiency: A Literature Review. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 56(1), 61-68.
- Molina-Besch, K. ve Pålsson, H. (2014). *Packaging for eco-efficient supply chains: why logistics should get involved in the packaging development process*. Macharis, C., Melo, S., Woxenius, J. ve van Lier, T. (Ed.). In *Sustainable Logistics* (pp. 137-163). Emerald Group Publishing Limited.
- Musta, M. A. (2011). Logistics Performance Index, connecting to compete 2010. In *UNESCAP Regional Forum and Chief Executives Meeting*. Cairo: The World Bank.
- Navickas, V., Sujeta, L. ve Vojtovich, S. (2011). Logistics systems as a factor of country's competitiveness. *Economics and Management*, 16(1), 231-237.

- Nimrod, G., Szilágyi, A., Leslie, C. ve Ben-Tal, N. (2009). Identification of DNA-binding proteins using structural, electrostatic and evolutionary features. *Journal of Molecular Biology*, 387(4), 1040-1053.
- Ojala, L. ve Çelebi, D. (2015). The World Bank's Logistics Performance Index (LPI) and drivers of logistics performance. *Proceeding of MAC-EMM, OECD*, 3-30.
- Ong, H. C., Mahlia, T. M. I. ve Masjuki, H. H. (2012). A review on energy pattern and policy for transportation sector in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 532-542.
- Oparin, I., Glembek, O., Burget, L. ve Cernocky, J. (2008). Morphological random forests for language modeling of inflectional languages. In *2008 IEEE Spoken Language Technology Workshop*, 189-192.
- Ozili, P. K. (2023). *The acceptable R-square in empirical modelling for social science research*. Saliya, C.A. (Ed.). In *Social Research Methodology and Publishing Results*, (134-143), USA: IGI Global.
- Özçelik, S. E. ve Töngür, Ü. (2023). Logistics performance and environmental degradation: The case of MENA countries. *Ekonomi-tek*, 13(2), 198-229.
- Öztürk, I. ve Acaravcı, A. (2013). The long-run and causal analysis of energy, growth, openness and financial development on carbon emissions in Turkey. *Energy Economics*, 36, 262-267.
- Parthiban, P., Zubar, H. A. ve Garge, C. P. (2012). A multi criteria decision making approach for suppliers selection. *Procedia Engineering*, 38, 2312-2328.
- Patil, A., Shardeo, V., Dwivedi, A., Moktadir, M. A. ve Bag, S. (2024). Examining the interactions among smart supply chains and carbon reduction strategies: To attain carbon neutrality. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 1227-1246.
- Peters, J. verhoest, N. E., Samson, R., Van Meirvenne, M., Cockx, L. ve De Baets, B. (2009). Uncertainty propagation in vegetation distribution models based on ensemble classifiers. *Ecological Modelling*, 220(6), 791-804.
- Peters, J. verhoest, N. E., Samson, R., Van Meirvenne, M., Cockx, L. ve De Baets, B. (2009). Uncertainty propagation in vegetation distribution models based on ensemble classifiers. *Ecological Modelling*, 220(6), 791-804.
- Petropoulos, A., Siakoulis, V., Stavroulakis, E. ve Vlachogiannakis, N. E. (2020). Predicting bank insolvencies using machine learning techniques. *International Journal of Forecasting*, 36(3), 1092-1113.
- Pikousova, K. ve Prusa, P. (2013). Supplier evaluation: The first step in effective sourcing. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 7(1), 1-4.
- Popescu, C. A., Ifrim, A. M., Silvestru, C. I., Dobrescu, T. G. ve Petcu, C. (2024). An Evaluation of the Environmental Impact of Logistics Activities: A Case Study of a Logistics Centre. *Sustainability*, 16(10), 1-18.
- Probst, P., Boulesteix, A. L. ve Bischl, B. (2019). Tunability: Importance of hyperparameters of machine learning algorithms. *Journal of Machine Learning Research*, 20(53), 1-32.

- Ramírez, J., Górriz, J. M., Chaves, R., López, M., Salas-Gonzalez, D., Alvarez, I. ve Segovia, F. (2009). SPECT image classification using random forests. *Electronics Letters*, 45(12), 604-605.
- Rashidi, K. ve Cullinane, K. (2019). Evaluating the sustainability of national logistics performance using Data Envelopment Analysis. *Transport Policy*, 74, 35-46.
- Rehman, A., Ma, H., Ahmad, M., Işık, C. ve Ozturk, I. (2023). Estimating interlinks of carbon emissions from transportation, industrialization, and solid/liquid fuels with economic progress: evidence from Pakistan. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 1981-1996.
- Reyes, P. M. ve Bhutta, K. (2005). Efficient consumer response: literature review. *International Journal of Integrated Supply Management*, 1(4), 346-386.
- Rezaei, J., van Roekel, W. S. ve Tavasszy, L. (2018). Measuring the relative importance of the logistics performance index indicators using Best Worst Method. *Transport Policy*, 68, 158-169.
- Rigatti, S. J. (2017). Random forest. *Journal of Insurance Medicine*, 47(1), 31-39.
- Ritchie H. (2020). Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from? Erişim adresi: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>
- Rodt, S., Georgi, B., Huckestein, B., Mönch, L., Herbener, R., Jahn, H., Koppe, K. ve Lindmaier, J. (2010). CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland: Moegliche Massnahmen und ihre Minderungspotenziale-ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes. *Texte*, 5(2010).
- Rose, A. (1994). *Logistics strategy: integration, implementation, and management*. Robeson, C.F., Copacino, W.C. ve Howe R.E. (Ed.). *The Logistics Handbook*. Anderson Consulting.
- Rothacher, Y., ve Strobl, C. (2024). Identifying informative predictor variables with random forests. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 49(4), 595-629.
- Ruiz-Meza, J., Meza-Peralta, K., Montoya-Torres, J. R. ve Gonzalez-Feliu, J. (2021). Location of urban logistics spaces (ULS) for two-echelon distribution systems. *Axioms*, 10(3), 1-21.
- Russell, S. H. (2000). Growing world of logistics. *Air Force Journal of Logistics*, 24(4), 12-17.
- Saboori, B., Sapri, M. ve bin Baba, M. (2014). Economic growth, energy consumption and CO₂ emissions in OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)'s transport sector: A fully modified bi-directional relationship approach. *Energy*, 66, 150-161.
- Saidi, S., Mani, V., Mefteh, H., Shahbaz, M. ve Akhtar, P. (2020). Dynamic linkages between transport, logistics, foreign direct Investment, and economic growth: Empirical evidence from developing countries. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 277-293.

- Sameen, M. I., Pradhan, B. ve Lee, S. (2019). Self-learning random forests model for mapping groundwater yield in data-scarce areas. *Natural Resources Research*, 28, 757-775.
- Sanchez Rodrigues, V. ve Kumar, M. (2019). Synergies and misalignments in lean and green practices: a logistics industry perspective. *Production Planning & Control*, 30(5-6), 369-384.
- Scornet, E. (2017). Tuning parameters in random forests. *ESAIM: Proceedings and Surveys*, 60, 144-162.
- Scornet, E. (2023). Trees, forests, and impurity-based variable importance in regression. *Annales de l'Institut Henri Poincaré (B) Probabilités et statistiques*, 59(1), 21-52.
- Seibold, H., Bernau, C., Boulesteix, A. L. ve De Bin, R. (2018). On the choice and influence of the number of boosting steps for high-dimensional linear Cox-models. *Computational Statistics*, 33(3), 1195-1215.
- Shashidharan, M. ve Anwar, S. (2021). Importance of an efficient warehouse management system. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12(5), 1185-1188.
- Shebl, A., Abriha, D., Dawoud, M., Ali, M. A. H. ve Csámer, Á. (2024). PRISMA vs. Landsat 9 in lithological mapping— a K-fold Cross-Validation implementation with Random Forest. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27(3), 577-596.
- Shotton, J., Sharp, T., Kipman, A., Fitzgibbon, A., Finocchio, M., Blake, A., Cook, M. ve Moore, R. (2013). Real-time human pose recognition in parts from single depth images. *Communications of the ACM*, 56(1), 116-124.
- Sink, D. S., Tuttle, T. C. ve DeVries, S. J. (1984). Productivity measurement and evaluation: What is available. *National Productivity Review*, 3(3), 265-287.
- Siregar, V. M. M. (2018). Sistem Informasi Pendataan Logistik Aktiva Tetap PT. Bank Central Asia, Tbk Kantor Cabang Pematangsiantar. *Sistemasi: Jurnal Sistem Informasi*, 7(3), 250-258.
- Sova, R. ve Tudor, C. (2022). The importance of logistics performance for mitigating transportation-caused pollution. Conference on Sustainable Urban Mobility, *Springer Nature Switzerland*, 1330-1339.
- Statista (2023). Logistics industry worldwide-statistics & facts. <https://www.statista.com/topics/5691/logistics-industry-worldwide/#topicOverview>
- Statista (2024). Global distribution of CO₂ emissions 2023, by sector. Erişim adresi: <https://www.statista.com/statistics/1129656/global-share-of-co2-emissions-from-fossil-fuel-and-cement/#:~:text=The%20global%20power%20industry%20was,at%20just%20over%2021%20percent>
- Statista (2025a). Distribution of carbon dioxide emissions produced by the transportation sector worldwide in 2023, by sub sector. Erişim adresi: <https://www.statista.com/statistics/1185535/transport-carbon-dioxide-emissions-breakdown/>

- Statista (2025b). Distribution of greenhouse gas emissions in the European Union (EU-27) in 2023, by sector. Erişim adresi: <https://www.statista.com/statistics/1325132/ghg-emissions-shares-sector-european-union-eu/>
- Stock, J. R. ve Lambert, D. M. (2001). *Strategic Logistics Management (4th Edition)*. New York: McGraw Hill.
- Strobl, C., Boulesteix, A. L., Zeileis, A. ve Hothorn, T. (2007). Bias in random forest variable importance measures: Illustrations, sources and a solution. *BMC bioinformatics*, 8, 1-21.
- Sudirjo, F., Mustafa, F., Osman, I. ve Kusnadi, I. H. (2024). Analysis of the effectiveness of integrated customer relationship management strategy implementation on loyalty of national logistics company customers. *Jurnal Informasi dan Teknologi*, 223-228.
- Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F. ve Uchikawa, S. (1977). Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. *The International Journal of Production Research*, 15(6), 553-564.
- Sungur, F. ve Bakır, H. (2024). Hiperparametre ayarlama ve veri dengelemenin kalp hastalığı tahmini için kullanılan makine öğrenimi algoritmaları üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 17(1), 45-58.
- Şimşit Kalender, Z. T., Arıoğlu Akan, M. Ö. and Fırat, S. Ü. (2014). Küresel rekabet ve inovasyon çerçevesinde Türkiye'nin lojistik performansının değerlendirilmesi. *III. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi Kongresi, Bildiriler Kitabı* (s. 544-554), Trabzon: KTÜ.
- Tanyaş, M., Sıckyüz, A., İnaç, H. ve Tan, B. (2015). İstanbul Lojistik Sektör Analizi Raporu. *MÜSİAD Araştırma Raporları*, 1-195.
- Tchakoucht, T.A., Elkari, B., Chaibi, Y. ve Kousksou, T. (2024). Random forest with feature selection and K-fold cross validation for predicting the electrical and thermal efficiencies of air based photovoltaic-thermal systems. *Energy Reports*, 12, 988-999.
- Ticaret Bakanlığı (2021). Yeşil Mutabakat Eylem Planı. Erişim adresi: <https://ticaret.gov.tr/data/60f1200013b876eb28421b23/MUTABAKAT%20YE%C5%9E%C4%B0L.pdf>
- Ticaret Bakanlığı (2025). Avrupa Yeşil Mutabakatı. Erişim adresi: <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/avrupa-yesil-mutabakati>
- Turna, Y. (2024). Impact of Countries' Logistics Performance on Their Exports: The Case of G-8 Countries. *Journal of Transportation and Logistics*, 9(1), 60-67.
- Tyagi, S., Garg, N. ve Paudel, R. (2014). Environmental degradation: Causes and consequences. *European researcher*, 81(8-2), 1491.
- UK Civil Aviation Authority (2025). International organisations, Environmental information about international organisations. Erişim adresi: <https://www.caa.co.uk/passengers-and-public/environment/environmental-stakeholders/international-organisations/#>

- UNEP (2025a). Transport. Erişim adresi: <https://www.unep.org/topics/transport>
- UNEP (2025b). Cleaner Fuels and Vehicles. Erişim adresi: <https://www.unep.org/topics/transport/cleaner-fuels-and-vehicles>
- UNFCCC (1998). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention On Climate Change. Erişim adresi: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- UNFCCC (2012). The Doha Amendment. Erişim adresi: https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/kp_doha_amendment_english.pdf
- Verikas, A., Gelzinis, A. ve Bacauskiene, M. (2011). Mining data with random forests: A survey and results of new tests. *Pattern Recognition*, 44(2), 330-349.
- Voigt, S., De Cian, E., Schymura, M. ve Verdolini, E. (2014). Energy intensity developments in 40 major economies: structural change or technology improvement? *Energy Economics*, 41, 47-62.
- Wan, B., Wan, W., Hanif, N. ve Ahmed, Z. (2022). Logistics performance and environmental sustainability: Do green innovation, renewable energy, and economic globalization matter? *Frontiers in Environmental Science*, 10, 996341.
- Wang, C., Zhao, Y., Wang, Y., Wood, J., Kim, C. Y., ve Li, Y. (2020). Transportation CO2 emission decoupling: an assessment of the Eurasian logistics corridor. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102486, 1-15.
- Wang, F., Cao, J., Zhang, Y., Aviso, K. B., Tan, R. R., Li, Z. ve Jia, X. (2023). Safety risk assessment of the large-scale carbon capture, utilization, and storage demonstration project in Dongying, China. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137699.
- Wang, X. ve Dong, F. (2023). The dynamic relationships among growth in the logistics industry, energy consumption, and carbon emission: Recent evidence from China. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(1), 487-502.
- Watts, J. D., Lawrence, R. L., Miller, P. R. ve Montagne, C. (2009). Monitoring of cropland practices for carbon sequestration purposes in north central Montana by Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 113(9), 1843-1852.
- Wong, W. P., Soh, K. L., Chong, C. L. ve Karia, N. (2015). Logistics firms performance: efficiency and effectiveness perspectives. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 64(5), 686-701.
- Woodcock, J., Banister, D., Edwards, P., Prentice, A. M. ve Roberts, I. (2007). Energy and transport. *The Lancet*, 370(9592), 1078-1088.
- WRI (2025). Greenhouse Gas Protocol. Erişim adresi: <https://www.wri.org/initiatives/greenhouse-gas-protocol>

- Wu, H. J. ve Dunn, S. C. (1995). Environmentally responsible logistics systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(2), 20-38.
- Wu, Y. C. J. (2002). Effective lean logistics strategy for the auto industry. *The International Journal of Logistics Management*, 13(2), 19-38.
- Xia, Y., Liu, C., Li, Y. ve Liu, N. (2017). A boosted decision tree approach using Bayesian hyper-parameter optimization for credit scoring. *Expert Systems With Applications*, 78, 225-241.
- Xu, B. ve Xu, R. (2022). Assessing the role of environmental regulations in improving energy efficiency and reducing CO₂ emissions: Evidence from the logistics industry. *Environmental Impact Assessment Review*, 96, 106831.
- Yaloveha, V., Podorozhniak, A. ve Kuchuk, H. (2022). Convolutional neural network hyperparameter optimization applied to land cover classification. *Radioelectronic and computer systems*, 1, 115-128.
- Yu, Z., Golpîra, H. ve Khan, S. A. R. (2018). The relationship between green supply chain performance, energy demand, economic growth and environmental sustainability: An empirical evidence from developed countries. *LogForum*, 14(4), 479-494.
- Yu, Z., Kanwal, Q., Wang, M., Nurdiawati, A. ve Al-Ghamdi, S. G. (2025). Spatiotemporal dynamics and key drivers of carbon emissions in regional construction sectors: Insights from a Random Forest Model. *Cleaner Environmental Systems*, 16(100257), 1-13.
- Yuan, M., Thellufsen, J. Z., Lund, H. ve Liang, Y. (2021). The electrification of transportation in energy transition. *Energy*, 236(121564), 1-14.
- Yurtkuran, S. (2021). Enerji tüketimi, ekonomik büyüme ve lojistik arasındaki ilişki: Türkiye örneği. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 31(3), 1245-1260.
- Zaman, K. ve Shamsuddin, S. (2017). Green logistics and national scale economic indicators: Evidence from a panel of selected European countries. *Journal of Cleaner Production*, 143, 51-63.
- Zhang, H., Song, X., Xia, T., Yuan, M., Fan, Z., Shibasaki, R. ve Liang, Y. (2018). Battery electric vehicles in Japan: Human mobile behavior based adoption potential analysis and policy target response. *Applied Energy*, 220, 527-535.
- Zhang, W., Wu, C., Zhong, H., Li, Y. ve Wang, L. (2021). Prediction of undrained shear strength using extreme gradient boosting and random forest based on Bayesian optimization. *Geoscience Frontiers*, 12(1), 469-477.
- Zhu, C., Liu, X. ve Chen, D. (2024). Prediction of digital transformation of manufacturing industry based on interpretable machine learning. *Plos one*, 19(3), 1-16.
- Zhu, L., Wang, P. ve Zhang, Q. (2019). Indirect network effects in China's electric vehicle diffusion under phasing out subsidies. *Applied Energy*, 251(113350), 1-11.

ÖZGEÇMİŞ

