

LOJİSTİKTE İKİZ DÖNÜŞÜM:

STRATEJİK PERFORMANSIN BÜTÜNLEŞİK ÇKKV İLE ANALİZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ MUSTAFA ÖZDEMİR

EĞİTİM
yayınevi

LOJİSTİKTE İKİZ DÖNÜŞÜM: STRATEJİK PERFORMANSIN BÜTÜNLEŞİK ÇKKV İLE ANALİZİ

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Özdemir

Yayınevi Grubu Genel Başkanı: Yusuf Ziya Aydoğan (yza@egitimyayinevi.com)

Genel Yayın Yönetmeni: Yusuf Yavuz (yusufyavuz@egitimyayinevi.com)

Sayfa Tasarımı: Kübra Konca Nam

Kapak Tasarımı: Eğitim Yayınevi Grafik Birimi

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı

Yayıncı Sertifika No: 76780

E-ISBN: 978-625-385-826-1

1. Baskı, Mart 2026

Kütüphane Kimlik Kartı

LOJİSTİKTE İKİZ DÖNÜŞÜM: STRATEJİK PERFORMANSIN BÜTÜNLEŞİK ÇKKV İLE ANALİZİ

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Özdemir

X+98 s., 160x240 mm

Kaynakça var, dizin yok.

E-ISBN: 978-625-385-826-1

Copyright © Bu kitabın Türkiye'deki her türlü yayın hakkı Eğitim Yayınevi'ne aittir. Bütün hakları saklıdır. Kitabın tamamı veya bir kısmı 5846 sayılı yasanın hükümlerine göre kitabı yayımlayan firmanın ve yazarlarının önceden izni olmadan elektronik/mechanik yolla, fotokopi yoluyla ya da herhangi bir kayıt sistemi ile çoğaltılamaz, yayımlanamaz.

EĞİTİM
yayınevi

Yayınevi Türkiye Ofis:

Konya: Eğitim Yayınevi Tic. Ltd. Şti., Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye

İstanbul: Salon Yayınları, Atakent mah. Yasemen sok. No: 4/B, Ümraniye, İstanbul, Türkiye

Santral: +90 332 351 92 85

Editör hatları: +90 533 151 50 42, +90 507 151 50 43

bilgi@egitimyayinevi.com

Yayınevi Amerika Ofis: New York: Egitim Publishing Group, Inc.

P.O. Box 768/Armonk, New York, 10504-0768, United States of America

americaoffice@egitimyayinevi.com

Lojistik ve Sevkiyat Merkezi: Kitapmatik Lojistik ve Sevkiyat Merkezi, Fevzi Çakmak Mah. 10721 Sok. B

Blok, No: 16/B, Safakent, Karatay, Konya, Türkiye

İnternet Satış: www.kitapmatik.com.tr

Whatsapp hattı: +90 553 950 50 37

bilgi@kitapmatik.com.tr

Kitabevi Şubesi: Eğitim Kitabevi, Şükran mah. Rampalı 121, Meram, Konya, Türkiye

Whatsapp hattı: +90 501 651 92 85

bilgi@egitimkitabevi.com

EĞİTİM YAYINEVİ
GRUBU

EĞİTİM
yayınevi

SALON
yayınları

Kitapmatik
yayınları

kitapmatik
İnternetteki kitabınız

EĞİTİM
kitabevi

İÇİNDEKİLER

TABLolar LİSTESİ.....	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
ÖNSÖZ.....	IX
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 1: LOJİSTİK EKOSİSTEMİNDE YENİ PARADİGMALAR: İKİZ DÖNÜŞÜM VE ENDÜSTRİ 5.0	3
1.1. Geleneksel Lojistikten Modern Değer Zincirlerine Geçiş	3
1.2. İkiz Dönüşüm Kavramsallaştırması ve Sektörel Dinamikler	5
1.3. Endüstri 5.0: Teknoloji Merkezlilikten İnsan Odaklılığa Geçiş	8
1.4. Ulaştırma Sektöründe İkiz Dönüşümün İtici Güçleri ve Bariyerleri.....	10
BÖLÜM 2: DİJİTAL DÖNÜŞÜM: AKILLI LOJİSTİK VE VERİ ODAKLI YÖNETİM.....	13
2.1. Ulaştırmada Nesnelerin İnterneti, Büyük Veri ve Yapay Zeka	13
2.2. Otonom Sistemler ve Algoritmik Rota Optimizasyonu	15
2.3. Maddi Olmayan Duran Varlıkların Sektörel Verimliliğe Etkisi	17
2.4. Dijital Tedarik Zinciri Dirençliliği.....	19

BÖLÜM 3: YEŞİL DÖNÜŞÜM: SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE ÇEVRESEL STRATEJİLER.....	22
3.1. Ulaştırma Sektöründe Karbon Nötr Hedefleri ve İklim Politikaları	22
3.2. Çevresel, Sosyal ve Kurumsal Yönetişim Kriterlerinin Ulaştırmaya Entegrasyonu.....	24
3.3. Yeşil Lojistik, Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları ve Döngüsel Ekonomi.....	25
3.4. Kapasite Verimliliği ve Çevresel Regülasyonlar Arasındaki Ödünleşim.....	27
BÖLÜM 4: STRATEJİK KARAR VERME VE PERFORMANS ÖLÇÜM MODELLERİ.....	29
4.1. İkiz Dönüşüm Ekseninde Karmaşık Sistemler ve Bütünleşik ÇKKV	29
4.2. Objektif Ağırlıklandırma Yöntemlerinin Teorik Altyapısı	31
4.2.1. Entropy Yöntemi.....	32
4.2.2. CRITIC Yöntemi	33
4.2.3. MEREK Yöntemi.....	35
4.3. Belirsizlik Altında Karar Verme: Küresel Bulanık Kümeler Teorisi.....	37
4.4. Küresel Bulanık Sıralama Yöntemleri	41
4.4.1. Küresel Bulanık VIKOR Yöntem	43
4.4.2. Küresel Bulanık CRADIS Yöntemi	46

4.4.3. Küresel Bulanık TODIM Yöntemi	49
BÖLÜM 5: ULAŞTIRMA VE LOJİSTİK İŞLETMELERİ ÜZERİNE AMPİRİK BİR UYGULAMA.....	53
5.1. Araştırmanın Amacı, Kapsamı ve Sınırları.....	53
5.2. Karar Modelinin Kurgulanması: Alternatifler ve Kriterler	54
5.2.1. Karar Alternatiflerinin Belirlenmesi	54
5.2.2. Karar Kriterlerinin Tanımlanması ve Gerekçelendirilmesi	57
5.3. Araştırma Veri Seti: Başlangıç Karar Matrisi ve Tanımlayıcı İstatistikler	59
5.4. Kriter Ağırlıklarının Objektif Yöntemlerle Hesaplanması.....	62
5.4.1. Shannon Entropi Yöntemi Bulguları.....	62
5.4.2. CRITIC Yöntemi Bulguları	64
5.4.3. MEREC Yöntemi Bulguları.....	66
5.4.4. Ağırlıkların Konsolidasyonu ve Karşılaştırmalı Analizi..	67
5.5 İkiz Dönüşüm Performanslarının ÇKKV Yöntemleri ile Sıralanması	70
5.5.1. Uzlaşmacı Strateji Perspektifinden KB-VIKOR Sonuçlarının Analizi	71
5.5.2. Çift Yönlü Güvenlik Çerçevesinde KB-CRADIS Sonuçlarının Analizi	72
5.5.3 Davranışsal Risk ve Kayıptan Kaçınma Ekseninde KB- TODIM Sonuçlarının Analizi	73

5.5.4. Bütünleşik Sonuçların Karşılaştırmalı ve Stratejik Sentezi	75
BÖLÜM 6: SONUÇ, STRATEJİK DEĞERLENDİRME VE POLİTİKA ÖNERİLERİ.....	77
6.1. Analiz Bulgularının Sektörel ve Teorik Çıktıları.....	77
6.2. Kapasite Sağlayıcılar ve Stratejik Ekosistem Paydaşları İçin Yol Haritası.....	79
6.3. Politika Yapıcılar ve Sistem Düzenleyiciler İçin Öneriler.....	80
6.4. Çalışmanın Kısıtları ve Gelecekteki Araştırma Yönleri.....	82
KAYNAKÇA	84

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Araştırmanın Karar Matrisi.....	60
Tablo 2. Veri Setine Ait Tanımlayıcı İstatistikler Değerleri.....	61
Tablo 3. Objektif Ağırlıklandırma Yöntemleri Karşılaştırma Tablosu	67
Tablo 4. Küresel Bulanık Karar Modelleri Alternatif Sıralama Sonuçları	70

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Entropy Algoritması Kriter Ağırlık Vektörleri Dağılımı	64
Şekil 2. CRITIC Algoritması Kriter Ağırlık Vektörleri Dağılımı	65
Şekil 3. MEREC Algoritması Kriter Ağırlık Vektörleri Dağılımı	67
Şekil 4. Konsolide Ağırlık Değerleri Karşılaştırması	69
Şekil 5. KB-VIKOR İndeks Değerlerine Göre Alternatiflerin Sıralanması	72
Şekil 6. KB-CRADIS İndeks Değerlerine Göre Alternatiflerin Sıralanması	73
Şekil 7. KB-TODIM İndeks Değerlerine Göre Alternatiflerin Sıralanması	75

ÖNSÖZ

Küresel ekonomik sistem ve sanayi yapıları, 21. yüzyılda hızlı bir yapısal bir dönüşümden geçmektedir. Geleneksel operasyon modellerinin yerini veri odaklı, çevreye duyarlı ve insan merkezli yeni yaklaşımların aldığı bu ekosistemde, şüphesiz en kritik rolleri ulaştırma ve tedarik zinciri ağları üstlenmektedir. Lojistik, günümüzde yalnızca fiziksel kapasitenin A noktasından B noktasına taşınması değil; küresel değer zincirlerinin entegrasyonunu sağlayan, ulusların rekabet gücünü belirleyen ve asimetrik kriz anlarında makroekonomilerin esnekliğini teminat altına alan stratejik bir sistem dinamığıdır.

Bu kitabı kaleme almamdaki temel motivasyon; ulaştırma ağlarının içinden geçmekte olduğu bu eşsiz operasyonel dönüşümü salt kavramsal bir tartışma olmaktan çıkarıp, ölçülebilir, analitik ve bilimsel bir yöneylem temeline oturtma ihtiyacıdır. Günümüzde kapasite sağlayıcıları, bir yandan dijitalleşmenin getirdiği teknolojik rüzgârı arkalarına alarak algoritmik altyapılarını güçlendirmek, diğer yandan ise iklim krizinin dayattığı ekolojik kısıtlarla yeşil bir operasyonel yapıya bürünmek zorundadır. Literatürde ikiz dönüşüm olarak adlandırılan bu çok amaçlı zorlu optimizasyon süreci, aynı zamanda Endüstri 5.0 paradigmasının kalbinde yer alan insan odaklılık felsefesiyle entegre edilmelidir.

Bu noktada akla şu temel soru gelmektedir: İşletmelerin bu karmaşık dönüşümdeki algoritmik başarıları veya operasyonel olgunluk seviyeleri, geleneksel geçmiş dönem faaliyet envanterleri ve standart deterministik kapasite göstergeleri ile tam anlamıyla

ölçülebilir mi? Giderek karmaşııklaşan asimetrik piyasa dinamikleri, bu soruya net bir hayır cevabını vermemizi zorunlu kılmaktadır.

İşte bu eser; makro tedarik zinciri ağlarında faaliyet gösteren stratejik aktörlerin performansını, tek boyutlu maliyet ve hacim odaklı yaklaşımların ötesine taşımaktadır. Çalışma kapsamında kurumsal kapasite sağlayıcıları; çevresel sürdürülebilirlik, dijital kapasite yoğunluğu, insan odaklı kaynak tahsisi ve fiziksel kapasite kullanım etkinliği gibi birbiriyle rekabet eden ve zaman zaman açık ödünleşimler barındıran çok boyutlu kısıtlar üzerinden analiz edilmektedir. Bu analiz gerçekleştirilirken, bütünleşik Çok Kriterli Karar Verme metodolojilerinin matematiksel kesinliğinden ve objektif ağırlıklandırma algoritmalarının veri güdümlü analitik potansiyelinden faydalanılmıştır.

Bu kitabın, ulaştırma ve operasyon yöneticilerine, politika yapıcılara, stratejik kapasite planlayıcılarına ve akademik dünyadaki değerli meslektaşlarıma yeni bir analitik vizyon sunmasını ve çok boyutlu bir karar destek aracı olmasını ümit ediyorum.

Eserin ortaya çıkış sürecinde, engin bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, değerli vaktini ve akademik desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli Danışman Hocam Prof. Dr. Süleyman Çakır'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Son olarak; hayatımın her döneminde olduğu gibi bu zorlu ve uzun akademik yolculukta da maddi ve manevi destekleriyle daima yanımda olan, varlıklarından güç aldığım sevgili Aileme sonsuz şükranlarımı sunuyorum.

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Özdemir

Şubat, 2026 – Artvin

GİRİŞ

Küreselleşme olgusu, dijital teknolojilerdeki eksponansiyel gelişim ve iklim değişikliğinin yarattığı ekolojik kısıtlar, modern operasyon yönetimi paradigmasını köklü bir biçimde değiştirmektedir. Bu yapısal değişimin en sert hissedildiği ve aynı zamanda söz konusu dönüşüme en çok ihtiyaç duyan alanların başında ulaştırma ve tedarik zinciri ağları gelmektedir. Küresel karbon emisyonlarının önemli bir bölümünden sorumlu olan, ancak aynı zamanda makro lojistik ağlarının kesintisiz işlemesi için sürekli kapasite artırımına gitmek zorunda olan bu ekosistem, analitik bir paradoks ile karşı karşıyadır.

Günümüz ulaştırma ağlarında sistem kararlılığını sürdürmek ve operasyonel rekabet avantajı sağlamak, artık yalnızca daha yüksek fiziksel kapasiteye sahip olmakla veya geleneksel deterministik maliyet optimizasyonu yapmakla mümkün değildir. Ekosistem, Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi makro düzeydeki çevresel regülasyonların ve Endüstri 4.0 bileşenlerinin eşzamanlı operasyonel kısıtları altındadır. Dijitalleşmenin ve yeşil operasyonların birbirine entegre bir biçimde, simbiyotik bir ilişki içinde yönetilmesini ifade eden ikiz dönüşüm, tam da bu noktada tedarik ağlarının yeni stratejik yönelimi olarak öne çıkmaktadır. İkiz dönüşüm vizyonu; sistemin karbon ayak izinin azaltılmasını, makine öğrenmesi ve otonom sistemlerle sağlanan dinamik rotalama ve kapasite optimizasyonları aracılığıyla başarmayı hedeflerken, süreci Endüstri 5.0 paradigmasının insan merkezilik ilkesiyle bütünleştirmeyi gerektirir.

Ancak operasyonel ağlarda ikiz dönüşümün başarıya ulaşp ulaşmadığını analitik bir biçimde tespit etmek, çok boyutlu ve karmaşık bir optimizasyon problemidir. Kurumsal bir kapasite

sağlayıcısının yüksek teknolojik altyapı yatırımları sistem esnekliğini daraltabilir ya da agresif fiziksel kapasite artırımı yeşil operasyon hedeflerinden sapılmasına neden olabilir. Bu tür açık analitik ödünleşim gerektiren çok amaçlı hedeflerin varlığı, sistem performansının değerlendirilmesinde geleneksel tek boyutlu göstergelerin ötesine geçilerek ileri yöneylem araştırması yöntemlerinin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu eser, söz konusu çok boyutlu operasyonel performans ölçümü problemini çözmek amacıyla yapılandırılmıştır. Kitabın takip eden bölümlerinde, öncelikle ikiz dönüşüm, algoritmik tedarik zinciri ve yeşil ulaştırma stratejilerinin teorik temelleri tartışılacaktır. Ardından, Çok Kriterli Karar Verme literatüründe yer alan veri güdümlü objektif ağırlıklandırma ve uzlaşık sıralama algoritmaları, başka bir deyişle Entropi, CRITIC, MEREC ve Küresel Bulanık küme topolojileri tanıtılacaktır.

Son olarak, bu kavramsal ve metodolojik altyapı, Türkiye makroekonomisinin küresel değer zincirlerine entegrasyonunda başrol oynayan stratejik ulaştırma ve lojistik işletmeleri üzerine kurgulanan ampirik bir yöneylem modeli ile çalıştırılacaktır. Elde edilen analitik bulgular ışığında, tedarik zinciri ağlarının dijital ve çevresel geleceğine yönelik stratejik operasyon politikaları ve karar destek önerileri sunulacaktır.

BÖLÜM 1: LOJİSTİK EKOSİSTEMİNDE YENİ PARADİGMALAR: İKİZ DÖNÜŞÜM VE ENDÜSTRİ 5.0

1.1. Geleneksel Lojistikten Modern Değer Zincirlerine Geçiş

Lojistik ekosistemi, birinci sanayi devriminden bu yana küresel ekonomik sistemlerin fiziksel omurgasını oluşturmuştur. Ancak üretim yönetimi felsefesi perspektifinden bakıldığında lojistik faaliyetler, yirminci yüzyılın son çeyreğine kadar organizasyonel hiyerarşide ağırlıklı olarak maliyet minimizasyonu odaklı, reaktif ve ikincil bir destek fonksiyonu olarak konumlandırılmıştır. Özellikle Fordist yoğun üretim paradigmasının hâkim olduğu bu dönemde lojistik, yalnızca ana üretim faaliyetlerinin doğurduğu türevsel bir kapasite talebi olarak görülmüştür. Bu geleneksel yaklaşımda lojistiğin kavramsal temeli; hammaddelerin veya bitmiş ürünlerin, en düşük doğrusal maliyet ve en az fiziksel hasarla yer değiştirmesini, bir başka deyişle mekânsal ve zamansal fayda yaratmasını sağlayan rutin operasyonlar bütünü olarak tanımlanmıştır. İşletmelerin lojistiği salt bir operasyonel gider merkezi olarak algıladığı bu deterministik yapıda, başarının yegâne ölçütü ölçek ekonomilerinden faydalanarak ağ üzerindeki taşıma ve depolama kısıtlarının minimize edilmesi üzerine inşa edilmiştir (Ağın, 2022).

Ancak, doksanlı yıllarla birlikte Post-Fordist esnek üretim modellerine geçiş, küresel pazar entegrasyonunun ivme kazanması ve ürün yaşam döngülerinin dramatik ölçüde kısalması, geleneksel lojistik paradigmasının evrimleşmesini zorunlu kılmıştır. Tüketici

beklentilerindeki radikal değişimler, tedarik zincirlerini stok odaklı itme tabanlı modellerden, müşteri talebine senkronize yanıt verebilen çekme tabanlı ve tam zamanında üretim algoritmalarına dönüştürmüştür (Bielecki vd., 2024; Coto-Millán vd., 2024). Modern operasyon yönetimi literatüründe ulaştırma ağları, artık izole bir fiziksel hareketlilik alanı olmaktan çıkarak küresel değer zincirlerinin organik ve entegre bir parçası hâline gelmiştir.

Porter'in öncülüğünü yaptığı değer zinciri analizi bağlamında iç tedarik ağları ve dış dağıtım kanalları; fiziksel kapasiteyi sadece teslim eden bir operasyon değil, ağ üzerindeki aktörlere hız, esneklik, izlenebilirlik, özelleştirme ve sistem güvenilirliği sunarak önemli bir operasyonel katma değer yaratan temel bir rekabet unsuru olarak yeniden tanımlanmıştır (Memedovic vd., 2008; Kherbash ve Mocan, 2015).

Yirmi birinci yüzyıla gelindiğinde ise küresel ağ sağlayıcıları, çok modlu entegre lojistik aktörleri ve denizcilik hatları, salt birer fiziksel taşıyıcı olmanın çok ötesine geçerek; tedarik zinciri çevikliğini ve sistemik dirençliliğini orkestre eden stratejik kapasite planlayıcılarına dönüşmüşlerdir. Özellikle günümüzün yapısal dalgalanmalar, belirsizlikler, algoritmik karmaşıklıklar ve asimetrik muğlaklıklar barındıran operasyonel ortamında, tedarik ağlarının maruz kaldığı asimetrik etkiler ulaştırma fonksiyonunun rolünü yeniden şekillendirmiştir (Bukowska-Piesztrzyńska vd., 2024). Küresel salgın krizleri ve ardından gelen jeopolitik kırılmalar, örneğin stratejik geçiş koridorlarındaki fiziksel tıkanıklıklar veya bölgesel tedarik kopmaları, kapasite yönetiminin yalnızca deterministik bir optimizasyon meselesi olmadığını; makroekonomilerin gıda, sağlık ve enerji ağlarını teminat altına alan, çok uluslu işletmelerin sistemik bekasını belirleyen hayati

bir operasyonel güç unsuru olduğunu ampirik olarak kanıtlamıştır(Beggiato, 2025; Setyadi vd., 2025). Bu krizler, yalnızca doğrusal maliyet minimizasyonuna odaklanan aşırı optimize edilmiş statik tedarik zincirlerinin ne kadar kırılgan olduğunu göstermiş ve sistemik dirençlilik kavramını yöneylem literatürünün merkezine taşımıştır.

Yaşanan bu köklü analitik kırılma noktası ve paradigma değişimi, ulaştırma ekosistemini geleneksel tek boyutlu taşıma hesaplamalarının ve statik kapasite rasyolarının ötesine taşımıştır. Günümüzde lojistik ekosistemi; devasa veri setlerinin, endüstriyel nesnelerin interneti sensörlerinin ve ileri analitik optimizasyon algoritmalarının yönetildiği dijital bir sinir sistemi hâline gelmiştir (Dzreke ve Dzreke, 2025). Sektörün, bir yandan bu yapısal dijitalleşme dalgasını yönetirken diğer yandan küresel karbon nötr kısıtlarına tam uyum sağlamak zorunda kalması, lojistik operasyon performansının değerlendirilmesinde Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) gibi çok amaçlı ve topolojik yaklaşımların kullanılmasını artık teorik bir tercih olmaktan çıkarıp mutlak bir matematiksel zorunluluk hâline getirmiştir.

1.2. İkiz Dönüşüm Kavramsallaştırması ve Sektörel Dinamikler

Geleneksel değer zincirlerinden veri güdümlü ve ekolojik olarak duyarlı modern ekosistemlere geçiş süreci, günümüzde Avrupa Komisyonu başta olmak üzere küresel politika yapıcılar tarafından stratejik bir vizyon olarak çerçevelenen ikiz dönüşüm kavramıyla yapısal bir evrim geçirmektedir. İkiz dönüşüm, en temel akademik ve politik tanımıyla; Endüstri 4.0 paradigmasının getirdiği algoritmik

dijitalleşme ile iklim krizine yanıt olarak doğan çevresel sürdürülebilirlik süreçlerinin birbirinden bağımsız iki ayrı rota olarak değil; eşzamanlı, birbirini tamamlayan ve sinerjik bir biçimde yönetilmesidir (UNCTAD, 2023). Karar bilimleri literatüründe bu yaklaşım, teknolojik ilerlemenin ekolojik tahribat yaratmak yerine ekolojik restorasyonun ana aracı olarak konumlandırıldığı yeni bir sanayi devrimi fazı olarak kabul edilmektedir (Epstein, 2025).

Enerji yoğun ve karbon emisyonu yüksek bir operasyonel doğaya sahip olan ulaştırma ve tedarik zinciri ağları özelinde bu kavram, gönüllü bir kurumsal sosyal sorumluluk inisiyatifi olmaktan çıkmış, varoluşsal ve regülatif bir mecburi istikamete dönüşmüştür. Analitik eksenin bir tarafında yer alan yeşil dönüşüm; uluslararası sivil havacılık ve denizcilik otoritelerinin dayattığı mutlak sıfır karbon hedeflerine ulaşılmasını merkeze alır. Bu süreç, sürdürülebilir havacılık yakıtları ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımını, döngüsel ekonomi prensiplerinin benimsenmesini ve Avrupa Yeşil Mutabakatı ile Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması gibi tavizsiz regülasyonlara tam uyumu ifade eder (Ebrahimi vd., 2025). Eksenin diğer tarafındaki dijital dönüşüm ise; endüstriyel nesnelerin interneti, dağıtılmış defter teknolojileri, bulut bilişim mimarisi, dijital ikiz simülasyonları ve makine öğrenmesi algoritmaları aracılığıyla fiziksel filoların, ağ üzerindeki kapasite hareketlerinin ve operasyonel süreçlerin eşzamanlı olarak optimize edilmesini ve tedarik zincirinde uçtan uca veri görünürlüğünün sağlanmasını kapsar (Olaleye vd., 2024; Abdul Rauf ve Sari, 2024).

İkiz dönüşümün ulaştırma ve yöneylem literatüründeki en yenilikçi ve aynı zamanda en zorlu yönü, bu iki operasyonel sürecin simbiyotik doğasıdır. Akademi ve endüstri çevrelerinde yeşil hedefler için

dijitalleşme olarak kavramsallaştırılan bu nedensellik bağına göre; ekolojik kısıtlara uyum sağlamanın temel katalizörü teknolojik altyapıdır. Örneğin; küresel bir havayolu veya çok modlu lojistik operatörünün, doğrudan, dolaylı ve değer zincirindeki operasyonel karbon emisyonlarını milimetrik düzeyde ölçebilmesi, raporlayabilmesi ve nihayetinde minimize edebilmesi için ileri düzey telemetri sensörlerine, büyük veri analitiğine ve yapay zekâ destekli kestirimci algoritmik rootalamaya acil ihtiyacı bulunmaktadır (Wang, 2025; Ben Youssef, 2025).

Diğer bir ifadeyle, algoritmik bir optimizasyon modeli havada kalınan süreyi, düğüm noktalarındaki bekleme sürelerini veya atıl kapasite hareketlerini azalttığında, salt doğrusal bir maliyet minimizasyonu sağlamakla birlikte karbon ayak izini küçülterek yeşil operasyonel dönüşümüne de hizmet eder. Bu durum, analitik teknoloji ve operasyonel ekolojinin aynı kurumsal bedende tek bir hedefe kilitlenmesi anlamına gelmektedir (Wen, 2024).

Ancak bu simbiyotik ilişki, operasyonel sahada her zaman deterministik bir pürüzsüzlükte ilerlemez. İkiz dönüşüm stratejileri; ağır teknolojik altyapı yatırım kısıtları, donanımsal kapasite sınırları ve regülatif yaptırımlar arasında sıkışan kapasite sağlayıcıları için ciddi analitik ödünleşim sorunları yaratır. Stratejik karar vericilerin bir yandan sistem esnekliğini korurken diğer yandan hem dijital hem de yeşil hedeflere eşzamanlı olarak ulaşmaya çalışması, ulaştırma ağlarındaki performans ölçümünü, geleneksel statik kapasite göstergelerinin ve tek boyutlu maliyet algoritmalarının çözemeyeceği karmaşık bir ÇKKV problemine dönüştürmektedir.

1.3. Endüstri 5.0: Teknoloji Merkezlilikten İnsan Odaklılığa Geçiş

Ulaştırma ve tedarik zinciri ağlarını derinden etkileyen dördüncü sanayi devrimi, ağırlıklı olarak siber-fiziksel sistemler, algoritmik hiper-otomasyon, otonom kapasite araçları ve karanlık depolar gibi donanımsal olgular ekseninde şekillenen, mutlak teknoloji merkezli bir optimizasyon anlayışı sunmuştur. Endüstri 4.0 paradigması; operasyonel verimliliği, kapasite standardizasyonunu ve çevrim hızını maksimize etmeyi amaçlarken, insan faktörünü sistemin pasif bir izleyicisi, potansiyel bir hata varyansı veya tamamen algoritmik olarak ikame edilmesi gereken bir sistemik maliyet unsuru olarak gören teknolojik bir determinizm yaratmıştır.

Her ne kadar makine öğrenmesi modelleri deterministik optimizasyon süreçlerinde üstün bir performans gösterse de, küresel salgınlar gibi asimetrik şoklar bu durumun sınırlarını çizmiştir. Elde edilen ampirik bulgular, yapısal belirsizliğin yüksek olduğu ve esnek insan yargısına anlık ihtiyaç duyulan kriz anlarında söz konusu algoritmaların tek başına yeterli olmadığını kanıtlamaktadır (Menezes vd., 2022). Bu teknolojik indirgemeciliğe eleştirel ve evrimsel bir yanıt olarak Avrupa Komisyonu tarafından resmi bir analitik çerçeveye oturtulan Endüstri 5.0, teknolojiyi maksimize edilecek nihai bir amaç fonksiyonu olmaktan çıkarıp, sistem ağındaki insanın ve toplumun refahına hizmet eden bir araç konumuna geri döndüren sosyo-teknik bir operasyon paradigmasıdır (Rosário ve Raimundo, 2025).

Çevresel sürdürülebilirlik, sistemik dirençlilik ve insan odaklılık olmak üzere üç temel analitik kısıt üzerine inşa edilen bu yeni

vizyonun kalbinde yer alan insan merkezlilik ilkesi, ulaştırma ekosisteminde insan ve algoritmik sistemler (yapay zekâ ve robotik donanımlar) arasındaki etkileşimi yapısal bir rekabetten çıkarıp, bilişsel işbirliği ve zihinsel destek temelinde yeniden inşa etmektedir. Yeni operasyonel paradigmada bir otonom uçuş sistemi, akıllı liman donanımı veya lojistik ağ rotalama algoritması, ağ içerisindeki işgücünü elimine etmek için değil; kapasite sağlayıcının rutin ve yüksek riskli fiziksel veya bilişsel yükünü hafifletmek, operasyonel iş güvenliğini maksimize etmek ve karar vericinin çok daha stratejik, algoritmik ve analitik kararlar almasını sağlamak için tasarlanmaktadır (Kaur vd., 2025).

Endüstri 5.0 yaklaşımında, ulaştırma ağlarında konumlanan insan sermayesine sunulan operasyonel değer önerisi baştan aşağı yeniden tanımlanmaktadır. Bu bağlamda kurumsal sürdürülebilirlik yalnızca ekolojik kısıtları optimize etmek değil, aynı zamanda uluslararası sürdürülebilir kalkınma kısıtları doğrultusunda sosyal sürdürülebilirliği maksimize etmektir. Operasyonel insan kaynağının fiziksel ve psikolojik refahı, sistem içerisinde yaratılan katma değer in adil dağılımı, yapısal kapsayıcılık ve yıkıcı teknolojik dönüşümlere adaptasyonu sağlayacak yetkinlik kazandırma ve beceri dönüşümü programları; en az kurumsal filoya dâhil edilen düşük emisyonlu fiziksel bir kapasite yatırımı kadar kritik bir stratejik kaynak tahsisi olarak değerlendirilmektedir (Marchenko vd., 2023; Gamberini ve Pluchino, 2024).

Bu bağlamda, dijital ve yeşil dönüşüm entegrasyonunda kapasite sağlayıcılarının teknolojik donanımlarla yarattıkları yüksek operasyonel katma değer in, sistemin temel dinamosu olan insan sermayesine hangi parametrelerle ve ne ölçüde yansıtıldığı, söz

konusu lojistik aktörünün Endüstri 5.0 algoritmik olgunluk seviyesini belirleyen en stratejik ölçüttür. Kapasite planlayıcılarının bir yandan teknolojik altyapıyı ve fiziksel filoyu asimetrik şoklara karşı büyütürken, diğer yandan insan merkezlilik kısıtını optimize eden bu dengeyi kurma çabası; sistem performansının geleneksel ve tek boyutlu maliyet algoritmalarıyla ölçülemeyeceğini açıkça göstermektedir. Bu analitik ödünleşim, birbiriyle doğrudan rekabet eden ve asimetrik yönelimlere sahip olan ölçütlerin aynı karar uzayında değerlendirilmesini zorunlu kılan bütünsel bir ÇKKV matrisi oluşturmaktadır.

1.4. Ulaştırma Sektöründe İkiz Dönüşümün İtici Güçleri ve Bariyerleri

İkiz dönüşüm vizyonu ve Endüstri 5.0'ın insan odaklı felsefesi teorik düzlemde son derece rasyonel ve kaçınılmaz görünse de; ağır operasyonel şartlara, düşük kâr marjlarına ve devasa sabit kıymetlere sahip olan ulaştırma ve lojistik şirketlerinin bu dönüşümü pratikte uygulamaları son derece meşakkatli bir süreçtir. Bu kurumsal metamorfozun dinamiklerini kavramak için, Yeni Kurumsal Teori (*Neo-Institutional Theory*) perspektifinden sektörü değişime zorlayan itici güçleri ve bu süreci yavaşlatan yapısal bariyerleri çok boyutlu olarak analiz etmek gerekmektedir (Can Sağlam, 2023; Fares vd., 2025; Kaur vd., 2025)

İtici Güçler (Zorlayıcı Dinamikler): Yeni Kurumsal Teori bağlamında sektörü ikiz dönüşüme mecbur bırakan dinamikler üç ana başlıkta toplanabilir:

- **Zorlayıcı Regülatif Baskılar:** Dönüşümün en dominant gücüdür. Avrupa Birliği'nin Sınırdan Karbon Düzenleme

Mekanizması (CBAM), karbon vergileri, Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) 2050 hedefleri ve sivil havacılıkta CORSIA gibi zorunlu emisyon denkleştirme şemaları, yeşil dönüşümü gönüllü bir çaba olmaktan çıkarıp pazarda faaliyet gösterme lisansı hâline getirmiştir.

- **Normatif Pazar Baskıları:** Küresel tedarik zinciri yöneticileri ve kurumsal yatırımcılar, Çevresel, Sosyal ve Kurumsal Yönetişim skorları yüksek olan projelere sermaye tahsis etmektedir. Çok uluslu şirketler, kendi Kapsam 3 emisyon hedeflerini bozmayacak temiz ve izlenebilir ulaştırma partnerleri talep ederek sektörü normatif bir baskı altına almaktadır.
- **Öykünmecî Rekabet ve Tekno-Ekonomik Avantajlar:** Sektördeki öncü firmaların yapay zekâ ve otonom sistemleri başarıyla entegre etmesi, geride kalan firmalarda rekabet dezavantajı korkusu yaratarak taklitçi bir dönüşüm başlatmaktadır. Dijitalleşmenin uzun vadede sunduğu kestirimci bakım, boş kilometre minimizasyonu ve rota optimizasyonu, yakıt ve operasyon maliyetlerinde devasa tasarruflar sağlayarak süreci ekonomik olarak cazip kılmaktadır.

Bariyerler (Engelleyici Dinamikler): Buna karşılık sektör, dönüşüm yolculuğunda asimetrik bariyerlerle yüzleşmektedir:

- **Yüksek Sermaye Harcamaları ve Yeşil Prim:** Filoların sıfır emisyonlu araçlarla yenilenmesi, sensör/Blok zincir altyapılarının inşası ve en önemlisi Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı gibi alternatif enerjilerin geleneksel fosil yakıtlara kıyasla yarattığı aşırı maliyet farkı (yeşil prim), şirketlerin

kısa vadeli finansal dirençliliğini ciddi şekilde tehdit eden milyarlarca dolarlık yatırımlar gerektirir.

- **Teknolojik Entegrasyon ve Siber Güvenlik Riskleri:** Geleneksel ve silolaşmış IT sistemlerinin modern, bulut tabanlı açık veri ağlarına entegrasyonu teknik zorluklar yaratır. Ayrıca, tedarik zincirinde anlık veri paylaşımının artması, kritik ulusal altyapılar olan limanları ve kargo ağlarını siber saldırılara karşı savunmasız hâle getirmektedir.
- **İnsan Kaynağı Açığı ve Kurumsal Ataleti:** En kritik bariyerlerden biridir. Sektör, bu hibrit mimariyi yönetecek düzeyde yeşil-dijital becerilere sahip nitelikli işgücü açığı yaşamakta; kökleşmiş geleneksel yönetim anlayışları ise değişime karşı direnç göstererek kurumsal atalet yaratmaktadır.

Ulaştırma şirketlerinin yöneticileri, regülatif cezalar ile yüksek sermaye harcamaları riskleri arasında sıkışmış durumdadır. İtici güçlerin sunduğu fırsatlar ile bariyerlerin yarattığı tehditler arasındaki bu ince dengeyi optimize etmek, tek boyutlu kârlılık rasyolarıyla çözülemeyecek kadar kompleksdir. Karar vericilerin bu belirsizlik ortamında en doğru stratejik rotayı çizebilmeleri, birbirleriyle çelişen bu kriterlerin ÇKKV modelleriyle bütünleşik ve objektif bir şekilde analiz edilmesini zorunlu kılmaktadır.

BÖLÜM 2: DİJİTAL DÖNÜŞÜM: AKILLI LOJİSTİK VE VERİ ODAKLI YÖNETİM

Lojistik ve ulaştırma sektörü, tarihsel olarak emek ve ağır sabit sermaye yoğun bir yapıdan; günümüzde bilgi, ileri teknoloji ve otonomi yoğun bir ekosisteme doğru köklü bir paradigma değişimi geçirmektedir. Dijital dönüşüm; yalnızca fiziksel süreçlerin elektronik ortama taşınması veya operasyonların bilgisayar destekli hâle getirilmesi değil, değer zincirinin her bir halkasının veri ekseninde baştan aşağı yeniden kurgulanmasıdır. Bu modern ekosistemde veri, salt bir bilgi teknolojileri bileşeni olmaktan çıkarak, ulaştırma şirketlerinin bilançolarında yer alan en stratejik maddi olmayan varlık konumuna yükselmiştir. Bu bölümde, akıllı lojistiğin temel yapıtaşları olan yeni nesil siber-fiziksel teknolojiler, matematiksel optimizasyon algoritmaları, teknolojik varlıkların sektördeki ekonomik dönüştürücülüğü ve krizlere karşı sistemik dirençlilik kavramları akademik bir perspektifle derinlemesine incelenecektir.

2.1. Ulaştırmada Nesnelerin İnterneti, Büyük Veri ve Yapay Zeka

Geleneksel tedarik zinciri yönetimi, ağırlıklı olarak geçmiş dönem verilerine ve statik muhasebe kayıtlarına dayanan tepkisel analizler üzerinden yürütülürken; günümüz akıllı lojistik konsepti tamamen öngörücü ve algoritmalarla karar alan yönlendirici bir yapıya evrilmiştir. Bu teknolojik evrimin ilk ve en kritik basamağını oluşturan Nesnelerin İnterneti, ulaştırma süreçlerindeki durağan fiziksel varlıkların siber-fiziksel sistemlere dönüşmesini sağlar. Araç içi telematik sistemler, akıllı radyo frekansı etiketleri ve gelişmiş

endüstriyel sensörler sayesinde konteynerler, tır çekicileri, uçak kargo kompartımanları veya depolardaki paletler adeta interaktif birer dijital kimlik kazanır (Alshdadi vd., 2024). Bu teknoloji lokasyon, ortam sıcaklığı, nem oranı, sarsıntı şiddeti, karbon salınım düzeyi ve motorun anlık performansı gibi çok boyutlu değişkenlerin gerçek zamanlı olarak izlenebilmesine olanak tanır. Özellikle ilaç ve gıda gibi hassas yüklerin taşındığı soğuk zincir lojistiğinde Nesnelerin İnterneti, yalnızca bir takip aracı olmaktan çıkarak, ürün bozulmalarını engelleyen ve paydaşlar arasındaki bilgi asimetrisini ortadan kaldıran stratejik bir denetim mekanizmasına dönüşür. Bu sayede, tedarik zincirinde yıllarca ulaşılamayan uçtan uca görünürlük ilkesi teoriden pratiğe aktarılmış olur (Marinelli vd., 2021; Emon ve Chowdhury, Most, 2025).

Sensör ağlarından, telematik cihazlardan ve kurumsal kaynak planlama yazılımlarından elde edilen bu sürekli ve heterojen akış, yapılandırılmış ve yapılandırılmamış devasa veri setlerini; başka bir ifade ile Büyük Veri ekosistemini ortaya çıkarmaktadır. Hacim, hız, çeşitlilik, doğruluk ve değer parametreleriyle tanımlanan Büyük Veri, modern lojistik şirketleri için en stratejik hammadde konumundadır (Miah, 2014). Geleneksel veri tabanlarının işleme kapasitesini aşan bu hafıza; müşteri taleplerindeki mikro sapmaları analiz etmek, meteorolojik koşullar ile kargo gecikmeleri arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri saptamak ve tedarikçi performanslarını anlık olarak ölçümlemek için kullanılır. Bu büyük Veri havuzu, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ulaştırma şirketleri için kurulacak olan ÇKKV modellerinin ihtiyaç duyduğu objektif ve anlık karar matrisi girdilerinin temel beslenme kaynağıdır. Verinin doğru bulut mimarileriyle depolanması ve analitik olarak tasnif edilmesi,

işletmelerin operasyonel körlükten kurtularak sezgisel yönetimden veri odaklı karar alma kültürüne geçiş yapmasının ön koşuludur (Borgi vd., 2017; Ravikumar, 2025).

Yığın hâlindeki ham veriyi anlamlı finansal öngörülere, stratejik kararlara ve eylemlere dönüştüren temel bilişsel güç olarak Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi devreye girmektedir. Ulaştırma operasyonlarında yapay zekânın bilançolara en doğrudan etki eden, katma değerli uygulamalarından biri öngörücü bakım stratejileridir (Chaudhari vd., 2025). Makine öğrenmesi algoritmaları, fiziksel varlıkların dijital ikizleri üzerinden motor veya hareket aksamlarından gelen sensör verilerindeki mikro anormallikleri analiz ederek, spesifik bir parçanın ne zaman arıza vereceğini haftalar öncesinden yüksek bir istatistiksel güven aralığıyla tahmin edebilir. Bu analitik yetenek, lojistik operasyonlardaki en büyük finansal kanama nedenlerinden biri olan plansız duruşları ve buna bağlı tazminat veya gecikme maliyetlerini neredeyse sıfıra indirmektedir (Rane vd., 2024). Benzer şekilde, derin öğrenme algoritmaları ile desteklenen talep tahminleme modelleri; küresel makroekonomik göstergeleri, tüketici eğilimlerini ve jeopolitik dalgalanmaları eşzamanlı olarak işleyerek ağ kapasitelerini ve depo stok seviyelerini dinamik bir biçimde optimize eder. Böylece tedarik zincirindeki o meşhur kamçı etkisi minimize edilirken, operasyonel verimlilik ve kârlılık maksimize edilmiş olur (Patibandla, 2024).

2.2. Otonom Sistemler ve Algoritmik Rota Optimizasyonu

Ulaştırma sektöründe maliyet ve zaman kayıplarının en yoğun yaşandığı, operasyonel zorlukların zirveye çıktığı alanlar genellikle son kilometre teslimatı ve uzun hat taşıma operasyonlarıdır. Bu

darboğazların aşılmasında, insan faktöründen kaynaklanan hataları, yorgunluğu ve riskleri elimine etmeyi amaçlayan otonom sistemler devrim niteliğinde çözümler sunmaktadır. Depo içi operasyonlarda otonom yönlendirmeli araçlar ve otonom mobil robotlar, toplayıcı ve yerleştirici görevlerini devralarak işletmelerin sabit kıymet verimliliğini ekspanansiyel olarak artırmaktadır. Karayolu taşımacılığında ise birbirleriyle araçtan araca iletişim protokolleriyle veri alışverişi yapan sürü hâlinde sürüş teknolojisi öne çıkmaktadır (Fegde, 2025). Bu sistemde otonom veya yarı otonom tır filoları, aerodinamik sürtünmeyi en aza indirecek şekilde birbirlerini milisaniyelik tepkilerle ve çok yakın mesafeden takip eder. Bu durum, yalnızca bilançolardaki doğrudan yakıt giderlerinde ciddi bir finansal tasarruf sağlamakla kalmaz, aynı zamanda kurumsal karbon muhasebesi kapsamında sektörel ayak izinin düşürülmesine de doğrudan katkı sunar. Şehir içi teslimatlarda ise insansız hava araçları ve otonom teslimat robotları, kentsel lojistiğin trafik sıkışıklığı sorunlarına yenilikçi ve sürdürülebilir alternatifler üretmektedir (Alsaleh, 2025).

Fiziksel otonominin tam anlamıyla verimli olabilmesi, arka planda çalışan matematiksel modellerin ve algoritmaların kusursuzluğuna bağlıdır. Geleneksel araç rotalama problemleri, genellikle statik ve deterministik verilere dayanarak salt en kısa mesafeyi veya en düşük maliyeti hesaplamaya odaklanırdı. Ancak günümüzün karmaşık, değişken ve akıllı lojistik yaklaşımı, dinamik ve stokastik rotalama algoritmalarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Karınca kolonisi optimizasyonu, genetik algoritmalar ve tavlama benzetimi gibi doğadan ilham alan meta-sezgisel algoritmalar, güzergâh hesaplamalarına yepyeni bir boyut kazandırmıştır (Zhikharevich vd.,

2016). Bu gelişmiş algoritmik yapılar; anlık trafik kazaları, aniden değişen meteorolojik koşullar, yoldaki araç yoğunluğu veya son dakika iptal edilen siparişler gibi çok sayıda dinamik değişkeni sisteme eşzamanlı olarak entegre edebilir. Araç hareket hâlindeyken dahi, tüm sistemin yeniden hesaplanarak saniyeler içinde yeni ve optimum bir rotanın oluşturulması, teslimat sürelerini kısaltırken yakıt tüketiminden kaynaklı operasyonel maliyetleri radikal bir biçimde aşağı çeker. Dahası, modern ulaştırma ağlarında bu algoritmaların ürettiği anlık ve çok boyutlu veri setleri; asgari maliyet, asgari çevresel etki ve azami hizmet kalitesi gibi birbiriyle çelişen hedefleri aynı potada eritmeye çalışan ÇKKV mekanizmaları için hayati birer girdi niteliği taşımaktadır (Ostrowski vd 2024; Mubarak vd., 2024).

2.3. Maddi Olmayan Duran Varlıkların Sektörel Verimliliğe Etkisi

Tarihsel perspektiften bakıldığında, lojistik ve ulaştırma şirketlerinin rekabet güçleri uzun yıllar boyunca sahip oldukları fiziki kapasiteler üzerinden ölçülmüştür. Kaç adet tır çekicisine, kaç metrekare kapalı depo alanına veya ne büyüklükte bir gemi filosuna sahip olunduğu, sektördeki pazar payının ve operasyonel ölçeğin temel belirleyicisi olarak kabul edilmiştir. Ancak yönetim bilimlerindeki Kaynaklara Dayalı Yaklaşım teorisi bağlamında, modern lojistik ağlarının rekabet avantajı; taklit edilmesi zor, ikame edilemez ve nadir olan maddi olmayan teknolojik varlıklara kaymıştır. Şirketlerin tedarik zinciri hafızaları, veri analitiği yetkinlikleri, aldıkları patentler, geliştirdikleri özgün rotalama algoritmaları ve süreç mühendisliği birikimleri, fiziki donanımdan çok daha yüksek bir

operasyonel değer üretme potansiyeline ulaşmıştır (Song vd.,2016; Cho ve Lee, 2020).

Bu kuramsal çerçeveden bakıldığında, şirketlerin kendi iç bünyelerinde yürüttükleri araştırma-geliştirme faaliyetleri, işletmelerin Toplam Faktör Verimliliğini doğrudan ve pozitif yönde etkilemektedir. Günümüzde sektördeki yenilikçilik harcamaları sadece taşıma araçlarının kapasite artışına değil, tedarik ağındaki darboğazları ortadan kaldıracak ve ikiz dönüşüme hizmet edecek algoritmik iş modellerinin tasarımına yönlendirilmektedir (Wiśniewski, 2022). Bir firmanın tersine lojistik süreçlerindeki karbon salınımını ve teslimat sürelerini düşürmek üzere geliştirdiği özel bir meta-sezgisel optimizasyon modeli, o firmanın sistem esnekliğini maksimize eden stratejik bir yetenek havuzuna dönüşür. Fiziksel sınırların ötesine geçen bu tür entelektüel üretimler, lojistik işletmelerinin talep dalgalanmalarına ve tedarik zinciri şoklarına karşı bağımsızlığını artırarak onlara yüksek bir operasyonel dirençlilik sağlar (Zou vd., 2025).

Araştırma ve geliştirme yatırımlarının en somut çıktıları ise hiç şüphesiz işletmelerin karar destek mekanizmasını oluşturan yazılım ekosistemleridir. Depo yönetim sistemleri, nakliye yönetim sistemleri ve kurumsal kaynak planlaması gibi entegre yapılar, bilgi akışının dijitalleşmesini ve tesis içi malzeme taşıma süreçlerinin otomatize edilmesini sağlar. Özellikle bulut bilişim tabanlı hizmet olarak yazılım modellerinin yaygınlaşması, ulaştırma sektöründe paradigmayı değiştiren yeni bir operasyon stratejisinin doğmasına öncülük etmiştir (Shenissetty, 2025). Bu sistemler, lojistik şirketlerinin yüksek fiziki kapasite kısıtlarına ve atıl kapasite risklerine takılmadan hafif varlıklı iş modellerine geçiş yapmalarına olanak tanımaktadır. Bu yenilikçi

yapıda firmalar; araçları ve depoları mülk edinmek yerine, sahip oldukları güçlü algoritmik altyapılarla bir tedarik ağı ve kapasite yöneticisi olarak konumlanmakta, böylece operasyonel çevikliklerini maksimize etmektedirler (Rana, 2023).

Ancak, bir lojistik ağının performansının giderek artan oranda bu görünmez algoritmik yeteneklere ve yeşil dönüşüm adaptasyonuna dayanması, tedarik zinciri performans ölçümü açısından ciddi bir metodolojik zorluk yaratmaktadır. Standart ton-kilometre maliyetleri veya basit kapasite kullanım oranları, bir firmanın sahip olduğu lojistik ağın esnekliğini, karbon ayak izindeki düşüşü veya teknolojik olgunluk seviyesini tam anlamıyla ölçmekte yetersiz kalmaktadır (Sharma, 2025). Bu durum, araştırmacıları ve karar vericileri, işletme performanslarını tek boyutlu metriklerle değil; dijitalleşme, sürdürülebilirlik, hız ve esneklik gibi birbiriyle rekabet eden çok sayıda değişkenin aynı anda hesaba katıldığı ÇKKV gibi ileri yöneylem araştırması modellerine yönlendirmektedir.

2.4. Dijital Tedarik Zinciri Dirençliliği

Küreselleşmenin getirdiği geniş ve karmaşık tedarik ağları, ölçek ekonomileri yoluyla maliyet avantajları sağlasa da, sistemin operasyonel kırılganlığını da aynı oranda artırmıştır. COVID-19 küresel pandemisi, Süveyş Kanalı'ndaki tıkanmalar, jeopolitik çatışmalar ve iklim krizine bağlı doğal afetler, salt maliyet odaklı kurulan geleneksel tedarik zincirlerinin asimetrik şoklar karşısında ne denli çaresiz kalabileceğini tüm dünyaya göstermiştir. Bu bağlamda modern üretim yönetimi ve tedarik zinciri literatürü, statik risk yönetimi yaklaşımından dinamik tedarik zinciri dirençliliği konseptine doğru yapısal bir geçiş yapmıştır (Ivanov, 2024). Dirençlilik; bir

lojistik sistemin krizleri tamamen engellemeye çalışmasından ziyade, dışarıdan gelen bir şoku özümseme kapasitesi, bozulan ağ yapısını yeni koşullara hızla uyum sağlama kapasitesi ve kriz atlatıldıktan sonra eskisinden çok daha çevik, yeni bir forma dönüşüm kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Bu operasyonel kapasitelerin inşasındaki temel stratejik araç ise dijitalleşmedir (Akinbolajo, 2024; Phukan ve Kumar, 2025).

Dirençlilik kapasitesinin inşasında en hayati rolü, tedarik ağının dijital ikiz teknolojisi üstlenmektedir. Dijital ikiz; fiziksel tedarik ağının tüm tedarikçileri, ara depoları, aktarma merkezleri, ulaşım rotaları ve anlık envanter seviyeleri ile birlikte sanal ortamda birebir simüle edilmesidir. Bu devrimsel teknoloji sayesinde tedarik zinciri yöneticileri; kritik bir hammadde limanı iki hafta kapanırsa ağdaki hangi düğümlerin çökeceği veya akaryakıt fiyatlarındaki ani bir sıçramanın hangi taşıma bağlantısını sürdürülemez hâle getireceği gibi durum senaryosu analizlerini kriz henüz gerçekleşmeden önce sanal ortamda test edebilirler. Böylelikle şirketler, kriz anında panikle tepkisel kararlar almak yerine, önceden çalışılmış senaryolar üzerinden öngörücü ve proaktif bir kapasite yönetimi sergileyebilirler (Cebir ve Akkartal, 2024).

Dirençliliğin bir diğer boyutu ise, asimetrik kriz anlarında mevcut tedarikçilerin operasyonel yeteneğini kaybetmesi durumunda alternatif ağlara hızla ve güvenle entegre olabilme yeteneğidir. Bu noktada blok zincir teknolojisi, akıllı sözleşmeler ve değiştirilemez dağıtık defter yapısı sayesinde, birbirini tanımayan taraflar arasındaki asimetrik bilgi sorununu ortadan kaldırır. Ürünlerin üretim aşamasından son tüketiciye kadar olan serüveni blok zincir üzerinde şifrelenerek kayıt altına alındığında, kalite kontrol ve gümrük denetim süreçleri hızlanır.

Kesintisiz operasyon ilkesi gereği kriz anlarında sisteme yeni ve yerel tedarikçilerin entegre edilme süreci, uzun bürokratik aşamalar gerektirmeden merkeziyetsiz, şeffaf ve güvenli bir biçimde gerçekleşir (Rao, 2025; Haddar ve Bouaziz, 2025).

Tüm bu dijital araçlar, envanter ve üretim planlama stratejilerinde de köklü bir paradigma değişimine zemin hazırlamıştır. Yıllarca uygulanan geleneksel yalın üretim ve Tam Zamanında Üretim felsefesi, ara stok bulundurmaya bir israf olarak görerek tedarik zincirini sıfır hata payı olan, ince bir buz üzerinde yürümeye zorlamıştır (Maheshwar vd., 2024; Dzreke, S. S. ve Dzreke, S. E., 2025). Ancak ardı ardına yaşanan küresel makro şoklar, bu sistemin kırılganlığını kanıtlamış ve daha yedekli, operasyonel güvenliğe odaklanan ihtiyatlı üretim yaklaşımına geçişi zorunlu kılmıştır. Günümüzde makine öğrenmesi ve optimizasyon algoritmaları, şirketlere hangi ürün gruplarında tam zamanında üretim esnekliğinin sürdürülebileceğini, hangi stratejik bileşenlerde ise ihtiyatlı yaklaşımla güvenlik stoku oluşturulması gerektiğini veri odaklı olarak hesaplamaktadır (Duttyal, 2025). Ancak, düşük stok tutarak maliyetleri minimize etmek ile yüksek güvenlik stoku tutarak dirençliliği maksimize etmek arasındaki bu zorunlu ödünleşim, klasik optimizasyon yöntemleriyle çözülemeyecek kadar karmaşıktır. Tedarik zinciri yöneticilerinin bu çelişen hedefler arasında en rasyonel dengeyi kurabilmesi, parametrelerin eşzamanlı olarak değerlendirildiği ÇKKV algoritmalarının ulaştırma ağlarına entegre edilmesini bilimsel bir zorunluluk hâline getirmektedir (Lawrence, 2025; Gupta, G ve Gupta, M. 2025).

BÖLÜM 3: YEŞİL DÖNÜŞÜM: SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE ÇEVRESEL STRATEJİLER

Küresel tedarik zincirleri ve ulaştırma sektörü, tarihsel gelişimi boyunca maliyet minimizasyonu ve hız maksimizasyonu ekseninde şekillenmiştir. Ancak günümüzde, endüstriyel faaliyetlerin gezegenin biyolojik kapasitesi üzerindeki yıkıcı etkileri, geleneksel büyüme modellerinin fiziksel sınırlarına ulaştığını göstermektedir. Küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık beşte birinden tek başına sorumlu olan ulaştırma sektörü, yeşil dönüşüm paradigmasının tam merkezinde yer almaktadır. Bu bölümde; uluslararası iklim politikalarının sektörel düzenlemelere dönüşümü, sürdürülebilirliğin kurumsal bir yönetim kriteri hâline gelmesi, yeni nesil yeşil yakıt teknolojileri ile döngüsel ekonomi modelleri ve çevresel uyum ile operasyonel verimlilik arasında karar vericilerin yüzleşmek zorunda kaldığı stratejik ödüneşimler akademik bir perspektifle incelenecektir.

3.1. Ulaştırma Sektöründe Karbon Nötr Hedefleri ve İklim Politikaları

Küresel iklim krizinin ulaştırma ağı üzerindeki etkileri, artık gönüllü bir sosyal sorumluluk inisiyatifi olmaktan çıkmış, uluslararası hukukun ve bağlayıcı ticaret anlaşmalarının katı bir düzenleme zeminine oturmuştur. Bu normatif değişimin en radikal adımı, Avrupa Birliği tarafından açıklanan ve 2050 yılına kadar kıtayı dünyanın ilk karbon nötr bölgesi yapmayı hedefleyen Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamındaki stratejik planlardır. Bu mutabakat çatısı altında

geliştirilen 55'e Uyum yasa paketi, ulaştırma sektöründe karbon salınımını 2030 yılına kadar 1990 seviyelerine kıyasla %55 oranında azaltmayı yasal bir zorunluluk hâline getirmektedir (Dickason,2023). Bu durum, karayolu taşıma ağlarından denizcilik operasyonlarına kadar tüm lojistik aktörlerin emisyon ölçümleme ve azaltma stratejilerini temel operasyonel süreçlerine entegre etmelerini gerektirmektedir. Aksi takdirde, karbon piyasalarındaki kota daralmaları ve artan emisyon ticaret sistemi maliyetleri, yüksek karbon yoğunluğuna sahip ulaştırma ağlarını kısa vadede rekabet dışı bırakma potansiyeli taşımaktadır (Cobos Gómez, 2024).

Bu normatif çerçevenin küresel tedarik zincirlerini yapısal olarak dönüştüren en önemli bileşeni ise Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel olarak, sıkı çevresel yasalara sahip gelişmiş ülkelerdeki üreticiler, herhangi bir çevresel maliyete katlanmayan gelişmekte olan ülkelere kıyasla operasyonel dezavantaj yaşamakta ve bu asimetrik yapı, karbon kaçağı olarak adlandırılan, üretimin çevresel standartları düşük ülkelere kayması sorununu doğurmaktaydı. Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması, gümrük sınırından içeri giren ürünlerin bünyesinde barındırdığı toplam karbon ayak izini doğrudan vergilendirerek bu haksız rekabeti ortadan kaldırmayı hedeflemektedir (Nagao vd., 2022). Bir başka deyişle, ürünün sadece üretim bandındaki değil, uçtan uca ulaştırma ve lojistik süreçlerindeki emisyonları da ithalat maliyetlerine yansıtılacaktır. Bu mekanizma, lojistik şirketlerini yalnızca fiziksel yük taşıyan pasif aktörler olmaktan çıkarıp, tedarik zinciri boyunca ortaya çıkan çevresel etkiyi hafifleterek ağ içerisindeki diğer paydaşların küresel pazardaki ihracat gücünü doğrudan belirleyen stratejik çözüm ortaklarına dönüştürmektedir (Xu, 2023).

3.2. Çevresel, Sosyal ve Kurumsal Yönetişim Kriterlerinin Ulaştırma Entegrasyonu

İklim politikalarındaki bu makro düzeydeki sıkılaşma, mikro düzeyde taşıtırma şirketlerinin performans ölçüm kriterlerinde ve kapasite değerleme süreçlerinde yapısal bir değişime yol açmıştır. Milton Friedman'ın klasik hissedar teorisinde savunduğu kâr maksimizasyonu odaklı geleneksel yaklaşım, yerini Edward Freeman'ın paydaş teorisine ve bunun somut bir operasyonel yansıması olan çevresel, sosyal ve kurumsal yönetim metriklerine bırakmıştır (Anathi-Sokhetye ve Makalima, 2025). Ulaştırma sektöründe bu metriklerin entegrasyonu, şirketlerin fiziksel olmayan performanslarının tıpkı bir tedarik zinciri şeffaflığıyla raporlanmasını ifade eder. Kurumsal müşteriler artık operasyonel kapasite tahsisi yaparken sadece navlun fiyatlarına veya transit sürelerle değil; lojistik hizmet sağlayıcısının Kapsam 3 olarak bilinen değer zinciri kaynaklı dolaylı emisyonlarına ne derece katkı sağladığına, atık yönetimi politikalarına ve ekolojik ayak izini küçültme taahhütlerine bakarak ihale kararları vermektedir. Bu durum, çevresel sürdürülebilirliğin salt bir maliyet kalemi değil, işletmeden işletmeye pazarlarda tedarik ağına dâhil olabilmenin temel önkoşulu olduğunu kanıtlamaktadır (Di Vaio vd., 2025).

Söz konusu çerçevenin sosyal ve yönetim boyutları da taşıtırma sektörü için çevresel boyut kadar kritiktir. Sektörün yoğun emek barındıran operasyonel doğası gereği; sürücülerin sürüş ve dinlenme sürelerinin optimizasyonu, adil ücretlendirme, iş sağlığı ve güvenliği standartlarının eksiksiz uygulanması, zorla çalıştırma veya çocuk işçi kullanımının tedarik zincirinin hiçbir düğüm noktasında bulunmaması sosyal kriterlerin temelini oluşturur (Kuo vd., 2022; Sukhov ve

Zverkova, 2023). Özellikle gelişmekte olan ülke limanlarında ve aktarma merkezlerinde bu standartların sağlanması, operasyonel sürdürülebilirliğin ayrılmaz bir parçasıdır. Yönetişim boyutu ise, küresel lojistik operasyonlardaki şeffaflık, yönetim kurullarında çeşitlilik ve operasyonel veri gizliliği gibi etik standartları kapsar. Küresel piyasalar ve büyük kapasiteli tedarik zinciri yöneticileri, ağ tasarımlarını yaparken veya stratejik iş ortaklıkları kurarken artık şirketlerin çevresel, sosyal ve kurumsal yönetim performans skorlarını temel almaktadır. Yeşil finansman veya sürdürülebilirlik endeksli kaynaklar sayesinde, bu skorları yüksek bir lojistik firması, çevresel ve sosyal standartları göz ardı eden bir rakibine göre çok daha düşük maliyetli kapasite yatırımı yapabilmekte ve uzun vadeli operasyonel dirençlilik elde etmektedir (Leicht, J. B. ve Leicht, M, 2024).

3.3. Yeşil Lojistik, Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları ve Döngüsel Ekonomi

Politika düzeyindeki bu regülatif baskılar, ulaştırma sahasındaki fiziksel operasyonların yeşil lojistik prensipleriyle baştan aşağı yeniden tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Karayolu taşımacılığında elektrifikasyon ve hidrojen yakıt hücreli araçlara geçiş hızlanırken; elektrifikasyonun ağırlık ve menzil gibi operasyonel kısıtlar nedeniyle yetersiz kaldığı, emisyon azaltımının teknik olarak en zor olduğu lojistik ağlarının başında havacılık gelmektedir. Havacılık operasyonlarının karbonsuzlaşmasında en kritik ve ölçeklenebilir köprü teknoloji, sürdürülebilir havacılık yakıtlarıdır. Biyokütle, atık yağlar veya sentetik karbon yakalama süreçleriyle üretilen bu alternatif yakıtlar, mevcut uçak motorlarında ve havalimanı depolama

altyapılarında hiçbir donanımsal modifikasyona gerek kalmadan doğrudan ikame edilebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılabilmekte ve ürün yaşam döngüsü boyunca karbon emisyonlarını %80'e varan oranlarda azaltabilmektedir (Mannava ve Velautham, 2023; Gill vd., 2025). Ancak günümüzde bu alternatif yakıtların üretim maliyetlerinin fosil türevlerine göre oldukça yüksek olması ve küresel üretim kapasitesindeki darboğazlar, bu yeşil geçişin önündeki en büyük operasyonel kısıtı oluşturmaktadır. Bu kapasite engelinin aşılması; kamu teşvikleri, ölçek ekonomilerinin sağlanması ve tedarik ağındaki paydaşlar arasında kurulan stratejik maliyet paylaşım mekanizmalarının yaygınlaşmasına bağlıdır (Dukkanci vd., 2019).

Yeşil lojistik sadece ağ üzerindeki emisyonların azaltılmasını değil, aynı zamanda hammaddeyi al, üret, tüket ve at prensibine dayanan doğrusal üretim modellerinin terk edilerek döngüsel ekonomi yaklaşımlarının benimsenmesini de içerir. Döngüsel ekonomi, malzemenin üretim ve hizmet sistemi içinde mümkün olan en uzun süre ve en yüksek katma değerle tutulmasını hedefler (Seroka-Stolka ve Ociepa-Kubicka, 2019). Ulaştırma sektörü bu döngünün ana taşıyıcı omurgasıdır ve bu stratejik rolü tersine lojistik ağları aracılığıyla üstlenir. Geleneksel tedarik zinciri yönetimi, ürünleri üretim tesisinden son tüketiciye doğru tek yönlü bir akışla ulaştırmaya odaklanırken; döngüsel yaklaşıma entegre edilmiş ulaştırma sistemleri, kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerin, ambalajların veya üretim firelerinin onarım, yeniden imalat ve geri dönüşüm tesislerine optimum rotalarla geri taşınmasını organize eder. Bu kapalı döngü tedarik zinciri mimarisi, atık yönetimini katlanılması gereken bir bertaraf operasyonu olmaktan çıkarıp, dışsal hammadde bağımlılığını azaltan, sistem direncini artıran ve lojistik ağında yeni bir değer

yaratan stratejik bir kapasite yönetimi unsuruna dönüştürmektedir (Muchenje, 2024; Kedla vd., 2025).

3.4. Kapasite Verimliliği ve Çevresel Regülasyonlar Arasındaki Ödünleşim

Lojistik ve tedarik zinciri yöneticileri yeşil dönüşüm sürecinde, yöneylem literatüründe sıklıkla tartışılan ve yönetsel bir ikilem yaratan stratejik bir ödünleşim problemi ile karşı karşıyadır. Çevresel düzenlemelere uyum sağlamak ve sistemin karbon ayak izini küçültmek, kısa vadede operasyonel verimlilik, kapasite kullanım oranları ve birim maliyetler üzerinde olumsuz baskılar yaratabilmektedir. Karayolu lojistik ağlarından verilecek en çarpıcı örnek, elektrikli ağır vasıtaların spesifik kapasite kısıtlarıdır. Karayolu ulaştırma sistemlerinde her bir düğüm noktası arasındaki akış için yasal bir azami yüklü ağırlık sınırı bulunmaktadır (Koç ve Özceylan, 2018). Elektrikli çekicilerin batarya bloklarının mevcut teknolojik uygunluk seviyesinde oldukça ağır olması, aracın kendi darasını artırarak taşıyabileceği net faydalı yük kapasitesini doğrudan daraltmaktadır. Bu matematiksel kısıt, içten yanmalı motora sahip bir araçla tek seferde taşınabilecek bir parti büyüklüğünün, elektrikli araçla taşınabilmesi için tedarik ağı üzerinde daha fazla sefer yapılmasını gerektirmekte; bu da sistemdeki kapasite verimliliği ile sıfır emisyon hedefi arasında açık bir ödünleşim yaratmaktadır (Muchenje, 2024; Chaudhary, 2025)

Benzer bir çok amaçlı optimizasyon problemi, küresel deniz yolu taşımacılığında uygulanan yavaşlatılmış seyir stratejisinde açıkça görülmektedir. Ana motor hızlarının algoritmik olarak düşürülmesi, yakıt tüketimini ve dolayısıyla karbon salınımını doğrusal olmayan bir

biçimde azaltan en etkili çevresel stratejilerden biridir ve uluslararası denizcilik otoritelerinin düzenlemelerine uyum sağlamak için sıklıkla kullanılmaktadır (Psaraftis, 2019; Zisi vd., 2021). Ancak bu operasyonel tercih, transit sürelerini uzatarak tedarik zincirindeki yolda geçen stok miktarını ciddi ölçüde artırır. Uzayan teslimat süreleri, uç noktadaki perakendeci veya üreticilerin sistem dalgalanmalarına karşı daha yüksek seviyede güvenlik stoku tutmasını zorunlu kılarak envanter taşıma maliyetlerini artırır ve üretim yönetiminin temel dayanaklarından biri olan tam zamanında üretim felsefesiyle doğrudan çelişir (Cheaitou ve Cariou, 2019).

Dolayısıyla modern operasyon yönetiminin temel vizyonu; kapasite, hız ve maliyet üçgeninden ödün vermeden çevresel uyumu sağlamak, yani bir önceki bölümde detaylandırılan algoritmik ağ tasarımlarını kullanarak bu ödünleşim eğrisini ifade eden Pareto optimal cephesini bütünüyle dışarıya kaydıracak yenilikçi iş modelleri geliştirmektir (Bektaş vd., 2019; Ma vd., 2021). Çevresel dışsallıkların lojistik maliyetlere içselleştirildiği bu yeni düzende, sadece deterministik olarak en hızlı ve en ucuz olan değil; kapasite kısıtları, maliyet parametreleri ve ekolojik hedefleri ÇKKV modelleri yardımıyla en optimum seviyede sentezleyebilen aktörler sürdürülebilir bir rekabet avantajı elde edecektir.

BÖLÜM 4: STRATEJİK KARAR VERME VE PERFORMANS ÖLÇÜM MODELLERİ

4.1. İkiz Dönüşüm Ekseninde Karmaşık Sistemler ve Bütünleşik ÇKKV

Geleneksel karar verme ve sistem tasarımı süreçleri, tarihsel olarak doğrusal programlama temelli tek bir amaç fonksiyonunun optimize edilmesine dayanmaktadır. Bu klasik yaklaşımda yegâne hedef; salt operasyonel maliyetin minimize edilmesi veya kapasite kullanım oranının maksimize edilmesidir. Ancak günümüzde ulaştırma ve tedarik zinciri ağları; veri odaklılık, otonomi ve sistem dirençliliği parametrelerini barındıran dijital dönüşüm ile karbonsuzlaşma, döngüsel ekonomi ve çevresel, sosyal, kurumsal yönetim kısıtlarını dayatan yeşil dönüşümün eşzamanlı olarak yaşandığı bir ikiz dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu eşzamanlı evrim, lojistik ağlarını doğrusal ve deterministik yapılar olmaktan çıkarıp, çok katmanlı ve doğrusal olmayan karmaşık sistemler hâline getirmiştir. Bu dinamik ve stokastik yapı içerisinde karar vericiler, artık tek boyutlu hedeflerle hareket edemezler (Boonsothonsatit vd., 2013). Bir operasyon yöneticisinin yeni nesil alternatif yakıtlı bir filo yatırımı yaparken, yeşil bir tedarik ağını tasarlarken veya algoritmik altyapı sağlayıcısı seçerken; operasyonel hız, karbon ayak izi, dijital entegrasyon yeteneği ve ilk yatırım maliyeti gibi birbirleriyle bütünüyle çelişen ve yönetsel ödünleşim yaratan onlarca nicel ve nitel kısıtı eşzamanlı olarak optimize etmesi zorunludur (Golpîra, 2016).

Söz konusu çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümünde, ÇKKV algoritmaları devreye girerek ikiz dönüşümün yarattığı bu çok

boyutlu çatışmaları rasyonel bir matematiksel uzlaşık çözüm zeminine taşır. ÇKKV metodolojisi, operasyon yöneticilerinin karşı karşıya kaldığı ve ölçüm birimleri birbirinden tamamen farklı olan heterojen metrikleri, örneğin bir yanda taşınan tonaj miktarı, diğer yanda karbondioksit emisyon yüzdesi veya sistem siber güvenlik skoru gibi birimleri aynı analitik uzayda normalize ederek modelleyebilen, yöneylem araştırması literatüründeki en güçlü analitik araçlardan biridir (Miman ve Pohl, 2012).

Bu eserin ana metodolojik omurgasını oluşturan bütünleşik ÇKKV yaklaşımı ise, geleneksel ve tekil karar verme yöntemlerinin kısıtlarını aşmak üzere tasarlanmış ileri düzey bir matematiksel modellemedir. Bütünleşik mimari; karar matrisindeki verinin kendi içsel dağılımından ve varyansından beslenen Entropi, CRITIC ve MEREC gibi objektif ağırlıklandırma algoritmaları ile derin belirsizlik altındaki karar verici yargılarını ve risk iştahını modelleyen Küresel Bulanık VIKOR, CRADIS ve TODIM gibi uzlaşık sıralama algoritmalarının tek bir sistemde, melez bir yapıyla çalıştırılmasını ifade eder. İkiz dönüşümün zorunlu kıldığı stratejik ağ tasarımı ve kapasite planlaması, salt maliyet odaklı göstergelere indirgenemez; sistemin ekolojik etkilerini, algoritmik verimliliğini ve operasyonel esnekliğini de kapsamak zorundadır (Thekd ve Santos, 2019). Bütünleşik karar modelleri; yöneticilerin sübjektif stratejik yargılarını ve dijital sistemlerden akan nesnel sensör verilerini aynı matematiksel formülasyon içerisinde birleştirerek karar süreçlerine şeffaflık, izlenebilirlik ve algoritmik bir meşruiyet kazandırır (Erbey vd., 2025). Ulaştırma sistemlerinin asimetrik küresel şoklara karşı tedarik zinciri dirençliliğini inşa edebilmeleri için operasyonel performans

ölçümünde bu bütünleşik yöneylem altyapısının kullanılması artık kavramsal bir tercih değil, analitik bir zorunluluktur.

4.2. Objektif Ağırlıklandırma Yöntemlerinin Teorik Altyapısı

ÇKKV problemlerinin matematiksel olarak modellenmesindeki en hassas ve sonuç üzerindeki en belirleyici aşama, analize dâhil edilen kriterlerin ağırlık vektörlerinin, bir başka deyişle önem derecelerinin hesaplanmasıdır. Analitik Hiyerarşi Süreci veya Delphi gibi geleneksel ağırlıklandırma yöntemleri, karar vericilerin sübjektif yargılarına ve ikili karşılaştırma matrislerine dayandığı için bilişsel önyargılara ve sezgisel sapmalara oldukça açıktır (Knapp vd., 2021). Ancak ulaştırma ve lojistik operasyonlarında yaşanan dijital dönüşüm, telematik ağlar ve endüstriyel sensörler aracılığıyla devasa bir yapılandırılmış büyük veri ekosistemi sunmaktadır. Karbon emisyon hacimleri, birim yakıt tüketim oranları, kapasite kullanım yüzdeleri veya ardışık transit süreleri gibi tamamen nesnel ve ölçülebilir verilerin anlık olarak sistemden aktığı bir operasyonel ortamda, kriter ağırlıklarını salt insan yargısına ve uzman görüşüne bırakmak, kurulacak yöneylem modelinin analitik geçerliliğini ve matematiksel rasyonelliğini zayıflatmaktadır (Vagapov ve Репникова, 2025).

Belirtilen metodolojik kısıtların aşılması bağlamında, karar bilimleri literatüründeki veri güdümlü objektif ağırlıklandırma algoritmaları stratejik bir zorunluluk hâline gelmektedir. Bu analitik yaklaşımlar, dışsal bir müdahaleye veya karar verici tercihiye ihtiyaç duymadan, kriterlerin önem derecelerini doğrudan tasarlanan karar matrisinin kendi içsel varyansından, veri dağılımından ve yapısal matematiğinden elde eder. Bütünleşik ÇKKV modellerinin ilk fazını

oluşturan bu ağırlıklandırma aşamasında, karar matrisindeki bilginin miktarını ve kalitesini ölçmek amacıyla yöneylem araştırması literatüründe teorik altyapısı en güçlü olan Entropi, CRITIC ve MEREC yöntemleri kullanılmaktadır (Ersoy, 2022; Altıntaş, 2025). Bu algoritmalar sayesinde, dijital tedarik ağlarından elde edilen ham operasyonel veri, insan kaynaklı hiçbir sapmaya uğramadan doğrudan performans ölçüm modelinin matematiksel altyapısına entegre edilmektedir (Çakır ve Perçin, 2013).

4.2.1. Entropy Yöntemi

Claude Shannon (1951) tarafından iletişim kuramı bağlamında geliştirilen Entropi algoritması, termodinamik yasalarındaki sistemik düzensizlik ilkesini enformasyon teorisine entegre etmektedir. ÇKKV modelleri bağlamında Entropi yönteminin matematiksel altyapısı, karar matrisindeki veri dağılımının incelenmesine dayanır. Tasarlanan analitik modelde, belirli bir karar kriterine ait sayısal veriler alternatifler dizisi üzerinde ne ölçüde heterojen bir dağılım ve yüksek varyans sergiliyorsa, söz konusu kriterin karar mekanizmasına sunduğu enformasyon yükü ve ayırt edicilik gücü de o denli artmaktadır. Bu algoritmik mantık çerçevesinde, varyansı yüksek olan kriterin genel optimizasyon modeli içindeki ağırlık vektörü matematiksel olarak daha büyük bir değer almaktadır (Bahadır ve Türkmençalıkoğlu, 2021). Operasyonel bir örnekle açıklamak gerekirse; tedarik ağı tasarımında değerlendirmeye alınan tüm ulaştırma modlarının birebir aynı oranda karbon ayak izi değerine sahip olması durumunda, bu çevresel kriterin alternatifleri birbirinden ayırıştırma yeteneği tamamen ortadan kalkmakta ve sistemin hesapladığı objektif ağırlık katsayısı asimptotik olarak sıfıra

yaklaşmaktadır. Entropi yönteminin algoritmik adımları şu şekildedir (Borouhaki, 2017):

Adım 1: m sayıda alternatif ve n sayıda kriterden oluşan başlangıç karar matrisinin (x_{ij}) normalize edilmesi.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \forall j \quad (4.1)$$

Adım 2: Her bir j kriteri için entropi değerinin (E_j) hesaplanması. Burada k , alternatif sayısına bağlı bir sabit değerdir ve $k = \frac{1}{\ln(m)}$ olarak ifade edilir.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \forall j \quad (4.2)$$

(Not: Eğer $p_{ij} = 0$ ise, $p_{ij} \ln(p_{ij}) = 0$ kabul edilir.)

Adım 3: Entropiden sapma (farklılaşma) derecesinin (d_j) bulunması. E_j ne kadar küçükse, kriterin içerdiği bilgi miktarı o kadar fazladır.

$$d_j = 1 - E_j \forall j \quad (4.3)$$

Adım 4: Kriterlerin nihai objektif ağırlıklarının (w_j) hesaplanması.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \forall j \quad (4.4)$$

4.2.2. CRITIC Yöntemi

Diakoulaki ve arkadaşları (1995) tarafından literatüre kazandırılan CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) yöntemi, Entropi algoritmasının tek boyutlu varyans yaklaşımını

genişleterek çok ölçütlü karar verme problemlerinde analitik kapsamı yapısal bir ileri boyuta taşımaktadır. CRITIC algoritması, karar matrisindeki her bir ölçütün sadece kendi içsel değişkenliğini, diğer bir ifadeyle standart sapmasını değil, aynı zamanda sistemdeki diğer ölçütlerle olan doğrusal ilişki yönünü ve şiddetini, yani korelasyon yapısını da eşzamanlı olarak modellemektedir. Lojistik ve tedarik zinciri sistemlerinde sıklıkla karşılaşıldığı üzere; değerlendirmeye alınan iki farklı performans göstergesi, örneğin birim yakıt tüketim miktarı ile karbon dioksit salınım hacmi birbiriyle istatistiksel olarak yüksek oranda pozitif korelasyon sergiliyorsa, bu iki değişken analitik uzayda aslında bütünüyle aynı enformasyonu tekrar etmektedir. CRITIC metodolojisi, karar modelinde bu tür bir bilgi örtüşmesi yaratan ve diğer değişkenlerle doğrusal bağımlılığı yüksek olan kriterlerin objektif ağırlık katsayılarını matematiksel olarak cezalandırarak sınırlar. Buna karşılık, karar uzayında benzersiz ve bağımsız bir enformasyon üreten, diğer operasyonel kısıtlarla açık bir ödünleşim barındıran değişkenlerin ağırlık vektörlerini artırarak bütünsel modelin ayırt edicilik gücünü ve analitik rasyonelliğini maksimize eder. CRITIC yönteminin algoritmik adımları şu şekildedir:

Adım 1: Karar matrisinin Min-Max yöntemi ile normalize edilmesi (x_{ij}^*). Fayda (maksimizasyon) ve maliyet (minimizasyon) kriterleri bu aşamada 0 ile 1 arasına çekilir.

Adım 2: Her bir j kriteri için standart sapmanın (σ_j) hesaplanması. Bu değer, kriterin kendi içindeki zıtlık yoğunluğunu (contrast intensity) ifade eder.

Adım 3: Kriterler arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçmek için Pearson korelasyon katsayılarından oluşan simetrik korelasyon matrisinin (r_{jk}) oluşturulması.

Adım 4: Her bir kriterin içerdiği toplam bilgi miktarının (C_j) hesaplanması. Standart sapma ile korelasyon farklılıkları çarpılarak elde edilir:

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - r_{jk}) \forall j \quad (4.5)$$

Adım 5: Kriterlerin nihai objektif ağırlıklarının (w_j) hesaplanması.

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \forall j \quad (4.6)$$

4.2.3. MEREC Yöntemi

Keshavarz-Ghorabae ve arkadaşları (2021) tarafından karar bilimleri literatürüne kazandırılan MEREC (Method Based on the Removal Effects of Criteria) algoritması, veri odaklı objektif ağırlıklandırma yöntemleri arasında oldukça yenilikçi ve güncel bir analitik yaklaşım sunmaktadır. Bu algoritmanın temel matematiksel felsefesi, değerlendirme ölçütlerinin sistemden soyutlanması veya algoritmik olarak dışlanması etkisine dayanmaktadır. Yöneylem araştırması bağlamında bir kriterin karar uzayındaki stratejik ağırlığı, söz konusu performans göstergesi başlangıç karar matrisinden çıkarıldığında alternatiflerin bütünsel performans skorlarında meydana gelen mutlak sapma ve bozunum miktarıyla ölçülmektedir.

Eğer belirli bir operasyonel kısıtın veya performans ölçütünün sistemden dışlanması, alternatiflerin genel değerlendirme sonuçlarında

yüksek bir istatistiksel varyans ve yapısal bir değişim yaratıyorsa, bu durum ilgili ölçütün sistem kararlılığına olan marjinal katkısının ve alternatifler arası ayırt edicilik gücünün son derece yüksek olduğunu kanıtlar. Dolayısıyla, karar mekanizması üzerinde bu denli kritik bir etkisi olan değişkenin genel optimizasyon modeli içindeki ağırlık vektörü algoritmik olarak maksimize edilir. Buna karşın, karar matrisinden izole edildiğinde genel performans üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir sapma veya dalgalanma yaratmayan, yani sistemin genel işleyişine yapısal bir etkide bulunmayan kriterlerin ağırlık katsayıları, MEREC metodolojisi tarafından objektif bir biçimde minimize edilerek bütünleşik modelin doğruluğu güvence altına alınır. MEREC yönteminin algoritmik adımları şu şekildedir:

Adım 1: Karar matrisinin normalize edilmesi (n_{ij}^x). MEREC, performans değerlerini hesaplarken logaritmik bir fonksiyon kullandığı için doğrusal normalizasyon tercih edilir.

Adım 2: Alternatiflerin genel performans değerlerinin (S_i) logaritmik bir fonksiyon yardımıyla hesaplanması. Bu aşamada tüm kriterler sistemdedir.

$$S_i = \ln \left(1 + \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\ln(n_{ij}^x)| \right) \right) \forall i \quad (4.7)$$

Adım 3: Her defasında j . kriter sistemden çıkarılarak (yok sayılarak), alternatiflerin yeni (eksik) performans değerlerinin (S'_{ij}) hesaplanması.

$$S'_{ij} = \ln \left(1 + \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1, k \neq j}^n |\ln(n_{ik}^x)| \right) \right) \forall i, \forall j \quad (4.8)$$

Adım 4: Çıkarma etkisinin (E_j), orijinal performans ile j . kriter çıkarıldığındaki performans arasındaki mutlak farkların toplamı olarak hesaplanması.

$$E_j = \sum_{i=1}^m |S'_{ij} - S_i| \quad \forall j \quad (4.9)$$

Adım 5: Çıkarma etkisi değerleri kullanılarak nihai kriter ağırlıklarının (w_j) belirlenmesi.

$$w_j = \frac{E_j}{\sum_{j=1}^n E_j} \quad \forall j \quad (4.10)$$

4.3. Belirsizlik Altında Karar Verme: Küresel Bulanık Kümeler Teorisi

Ulaştırma ve tedarik zinciri ağlarında deneyimlenen ikiz dönüşüm süreci, doğası gereği yüksek derecede yapısal belirsizlik ve stokastik dalgalanmalar barındırmaktadır. Yapılandırılmış devasa veri setlerinin anlık olarak elde edilebildiği operasyonel süreçlerde, örneğin araç rotalama problemlerinde veya deterministik yakıt tüketimi hesaplamalarında kesin matematiksel modeller kullanmak analitik açıdan mümkündür. Ancak problem uzayı, henüz teknolojik olgunluğa erişmemiş alternatif yakıtlı taşıma sistemlerinin uzun vadeli operasyonel güvenilirliğini değerlendirmek, yasal çerçevesi netleşmemiş sınırdaki karbon düzenlemelerinin tedarik ağına olası asimetrik şoklarını öngörmek veya bir kapasite sağlayıcısının siber güvenlik direncini ölçmek olduğunda, karar vericiler eksik enformasyona ve uzman görüşlerine dayanan subjektif yargılarla hareket etmek zorundadır. Klasik küme teorisi ve deterministik matematik, sistemdeki her bir elemanı değerlendirilen kümeye ikili mantık çerçevesinde kesin sınırlarla dâhil eder veya dışlar. Oysa insan bilişi ve dilsel değerlendirme mekanizmaları bu denli doğrusal ve

mutlak çalışmaz. Stratejik karar alma süreçleri derecelendirmelerden, şüphelerden ve algısal esnekliklerden beslenir.

Karar bilimlerindeki bu epistemolojik boşluğu doldurmak amacıyla Lotfi Aliasker Zadeh (1965) tarafından literatüre kazandırılan Bulanık Kümeler Teorisi, elemanların ilgili kümeye 0 ile 1 arasında değişen sürekli üyelik dereceleriyle dâhil olabileceğini matematiksel olarak ispatlayarak yöneylem araştırmalarında yeni bir paradigma yaratmıştır. Zamanla lojistik sistemlerin ve tedarik ağlarının algoritmik karmaşıklığı arttıkça, karar vericinin yargısını modellemek için salt üyelik derecesinin yeterli olmadığı görülmüş; insan zihnindeki üye olmama ve kararsızlık durumlarını da analitik uzaya dâhil edecek şekilde teori genişlemiştir. Bu evrimsel süreç, Atanassov (1986) tarafından geliştirilen Sezgisel Bulanık Kümeler ve bunu takiben Yager (2013) tarafından matematiksel kısıtları esnetilen Pisagor Bulanık Kümelerinin karar modellerine entegrasyonu ile devam etmiştir. Günümüzde çok ölçütlü karar verme literatürünün ulaştığı en esnek topolojik yapı olan Küresel Bulanık Kümeler teorisi (Kutlu Gündoğdu ve Kahraman, 2019) ortaya çıkmıştır.

Küresel Bulanık Kümeler uzayı, karar vericinin belirli bir operasyonel kritere veya tedarikçi alternatifine yönelik dilsel yargısını üç farklı parametre ile birbirinden tam bağımsız olarak tanımlamasına olanak tanır. Bu analitik parametreler; üyelik derecesi (μ), üye olmama derecesi (ν) ve kararsızlık indeksidir (π). Öncel bulanık küme uzaylarından farklı olarak bu yeni yaklaşım, söz konusu üç derecenin karelerinin toplamının 1'e eşit veya 1'den küçük olması şartını, matematiksel bir kısıt olarak koşar. Bu esnek geometrik kural, karar uzayını üç boyutlu bir kürenin hacmine genişleterek, stratejik

düzeydeki karar vericilere karmaşık yargılarını herhangi bir matematiksel daralmaya maruz kalmadan ifade etme serbestisi sunar.

Söz konusu analitik esnekliğin operasyonel düzeydeki karşılığını somutlaştırmak gerekirse; bir tedarik zinciri yöneticisi, yeni nesil bir dağıtık defter teknolojisi yazılım entegratörünü yeşil lojistik standartlarına uyumu bağlamında değerlendirirken, firmanın başarılı olma ihtimalini ($\mu = 0.8$), başarısız olma ihtimalini ($\mu = 0.8$) ve bu konudaki kararsızlık düzeyini yine ($\pi = 0.4$) olarak eşzamanlı beyan edebilir. Klasik sezgisel bulanık mantık kurallarına (Atanassov, 1986) göre parametrelerin doğrusal toplamı tam değeri aştığı için ($0.8 + 0.4 + 0.4 = 1.6$) bu uzman yargısı analitik olarak geçersiz kabul edilir. Ancak Küresel Bulanık Kümeler (Kutlu Gündoğdu ve Kahraman, 2019) topolojisinde, belirtilen parametrelerin karelerinin toplamı ($0.8^2 + 0.4^2 + 0.4^2 = 0.64 + 0.16 + 0.16 = 0.96 \leq 1$) üç boyutlu küresel alanın tanımlı sınırları içerisinde kaldığından, bu karmaşık ve görünürde çelişkili uzman yargısı matematiksel olarak tamamen geçerlidir. Bu üstün yapısal özellik, ikiz dönüşüm gibi henüz endüstriyel standartları tam olarak oturmamış asimetrik süreçlerde, yöneticilerin stratejik tereddütlerini ve sistemsel şüphelerini karar modellerine hiçbir enformasyon kaybına uğramadan aktarmasını güvence altına alır.

Küresel Bulanık Kümelerin Matematiksel Altyapısı ve Operatörleri

X evrensel bir küme olmak üzere, X üzerindeki bir Küresel Bulanık Küme olan $\tilde{A}_S$ şu şekilde tanımlanır:

$$\tilde{A}_S = \{ \langle x, (\mu_{\tilde{A}_S}(x), \nu_{\tilde{A}_S}(x), \pi_{\tilde{A}_S}(x)) \rangle \mid x \in X \} \quad (4.11)$$

Burada $\mu_{\tilde{A}_s}(x)$, $\nu_{\tilde{A}_s}(x)$ ve $\pi_{\tilde{A}_s}(x)$ değerleri sırasıyla üyelik, üye olmama ve kararsızlık derecelerini temsil eder ve $[0, 1]$ aralığında değerler alır. Bu kümenin temel kısıtı (küresel geometri şartı) şu formülle ifade edilir:

$$0 \leq \mu_{\tilde{A}_s}^2(x) + \nu_{\tilde{A}_s}^2(x) + \pi_{\tilde{A}_s}^2(x) \leq 1 \quad (4.12)$$

Karar verme algoritmalarının çalışabilmesi için uzman görüşlerinden elde edilen bu küresel bulanık sayıların birbirleriyle toplanması, çarpılması ve ağırlıklandırılması gerekmektedir. İki küresel bulanık sayı $\tilde{A} = (\mu_{\tilde{A}}, \nu_{\tilde{A}}, \pi_{\tilde{A}})$ ve $\tilde{B} = (\mu_{\tilde{B}}, \nu_{\tilde{B}}, \pi_{\tilde{B}})$ ile bir $\lambda > 0$ skaleri (ağırlık değeri) için temel Küresel Bulanık Küme aritmetik operatörleri (toplama ve skaler çarpım) şu karmaşık trigonometrik/kök denklemlerine dayanır:

Küresel Bulanık Toplama Operatörü ($\oplus$): Alternatiflerin farklı uzmanlardan veya kriterlerden aldığı puanların birleştirilmesinde kullanılır.

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = \left\{ \sqrt{\mu_{\tilde{A}}^2 + \mu_{\tilde{B}}^2 - \mu_{\tilde{A}}^2 \mu_{\tilde{B}}^2}, \nu_{\tilde{A}} \nu_{\tilde{B}}, \sqrt{(1 - \mu_{\tilde{B}}^2) \pi_{\tilde{A}}^2 + (1 - \mu_{\tilde{A}}^2) \pi_{\tilde{B}}^2 - \pi_{\tilde{A}}^2 \pi_{\tilde{B}}^2} \right\} \quad (4.13)$$

Küresel Bulanık Skaler Çarpım Operatörü ($\lambda \cdot \tilde{A}$): Bir alternatifin aldığı puanın, o kriterin objektif ağırlığı ile çarpılması işlemidir.

$$\lambda \tilde{A} = \left\{ \sqrt{1 - (1 - \mu_{\tilde{A}}^2)^\lambda}, \nu_{\tilde{A}}^\lambda, \sqrt{(1 - \mu_{\tilde{A}}^2)^\lambda - (1 - \mu_{\tilde{A}}^2 - \pi_{\tilde{A}}^2)^\lambda} \right\} \quad (4.14)$$

Karar verme sürecinin sonunda, elde edilen küresel bulanık sonuçların kesin sayılara dönüştürülerek (defuzzification) sıralanabilmesi için bir Skor Fonksiyonu kullanılır. Bir $\tilde{A}_s$ küresel bulanık sayısının skor değeri şu formülle hesaplanır ve -1 ile 1 arasında bir değer üretir:

$$SF(\tilde{A}_s) = (\mu_{\tilde{A}_s} - \pi_{\tilde{A}_s})^2 - (\nu_{\tilde{A}_s} - \pi_{\tilde{A}_s})^2 \quad (4.15)$$

Bütünleşik ÇKKV modellerinde, 4.2. bölümde nesnel verilerden elde edilen ağırlıkların (λ), 4.3. bölümde formülasyonu verilen küresel bulanık uzman değerlendirmeleriyle ($\tilde{A}_s$) birleştirilmesi, ulaştırma firmalarının İkiz Dönüşüm vizyonunu hem matematiksel gerçekliğe hem de stratejik vizyona aynı anda dayandırmasını sağlar.

4.4. Küresel Bulanık Sıralama Yöntemleri

Bütünleşik ÇKKV metodolojisinin nihai ve karar vericiler açısından en somut stratejik çıktılar üreten aşaması; eldeki alternatiflerin, örneğin yeşil tedarikçi adaylarının, yeni nesil ulaştırma modlarının veya aktarma merkezi lokasyonlarının matematiksel olarak en iyiden en kötüye doğru önceliklendirilmesidir. Geleneksel sezgisel karar verme süreçlerinde yöneticiler, önlerindeki karmaşık kapasite seçeneklerini genellikle tek bir deterministik kısıta, çoğunlukla ilk yatırım maliyetine göre sıralama eğilimindedirler. Ancak lojistik ve tedarik zinciri ağlarında deneyimlenen dijitalleşme ve yeşil operasyonlar eksenli ikiz dönüşüm gerçeği, karar ortamını çok boyutlu bir optimizasyon problemine dönüştürmüştür. Bir tedarik ağı alternatifi, karbon ayak izi minimizasyonunda üstün performans gösterirken yatırım maliyetinde sistem kısıtlarını aşabilir; bir diğeri ise operasyonel çeviklikte liderken siber güvenlik mimarisinde ağır zafiyetler barındırabilir. Bu karmaşık ve birbiriyle açık ödünleşim barındıran performans metriklerini tek bir bütünleşik başarı skoruna indirgemek, ileri düzey yöneylem algoritmalarının sisteme entegre edilmesini zorunlu kılar.

Bu eserin metodolojik omurgasını oluşturan bütünleşik yapıda, sıralama aşamasına gelene kadar sistemin iki temel bilgi kaynağı analitik olarak sentezlenmiş durumdadır. Bir yanda, nesnel

operasyonel verilerden Entropi, CRITIC veya MEREC algoritmalarıyla süzülerek elde edilen veri güdümlü objektif kriter ağırlıkları; diğer yanda ise karar vericilerin asimetrik şoklara ve sistemin stokastik doğasına dair şüphelerini barındıran küresel bulanık karar matrisleri bulunmaktadır. Sıralama algoritmalarının temel işlevi, nesnel verinin deterministik yapısı ile bulanık topolojisini aynı analitik uzayda eriterek alternatiflerin stratejik fayda değerlerini hesaplamaktır.

ÇKKV literatüründeki uzlaşık sıralama algoritmalarının, örneğin TOPSIS, VIKOR, EDAS veya CRADIS gibi yöntemlerin neredeyse tamamı, uzaysal bir uzaklık felsefesine dayanmaktadır. Bu analitik yaklaşımda temel amaç, karar vericinin tasarladığı kusursuz bir pozitif ideal çözüm noktası ile, sistemin hiçbir koşulda maruz kalmak istemeyeceği negatif ideal çözüm noktasını çok boyutlu matematiksel uzayda konumlandırmaktır. Ardından, değerlendirilen her bir lojistik alternatifin bu iki referans noktasına olan topolojik mesafesi ölçülerek en optimum, yani ideale en yakın ve karşıt idealden en uzak uzlaşık tercih belirlenir. Ancak karar matrisindeki veriler kesin sayılar yerine küresel bulanık kümelerden oluştuğunda, Öklid veya Manhattan gibi klasik uzaklık metrikleri analitik olarak yetersiz kalmaktadır. Çünkü küresel bulanık sayılar tek boyutlu bir düzlemde değil; üyelik, üye olmama ve kararsızlık dereceleriyle tanımlanan üç boyutlu bir kürenin hacmi içerisinde hareket eden vektörel yapılardır.

Bu topolojik zorunluluk nedeniyle, Küresel Bulanık VIKOR, CRADIS veya TODIM gibi ileri düzey sıralama algoritmalarının tümünde, iki küresel bulanık alternatif, örneğin $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ arasındaki çok boyutlu farkı ve analitik çelişkiyi ölçmek için sferik geometriye dayanan temel bir küresel bulanık uzaklık fonksiyonu tanımlanmak

zorundadır. Algoritmaların matematiksel altyapısını kuran bu temel uzaklık denklemi; üyelik (μ), üye olmama (ν) ve kararsızlık (π) parametrelerinin üç boyutlu karar uzayındaki karesel farklarının hesaplanmasına dayanır ve genel formülasyonu şu şekilde ifade edilmektedir:

$$d_s(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(\mu_{\tilde{A}} - \mu_{\tilde{B}})^2 + (\nu_{\tilde{A}} - \nu_{\tilde{B}})^2 + (\pi_{\tilde{A}} - \pi_{\tilde{B}})^2]} \quad (4.16)$$

Bu temel uzaklık ölçüsü tanımlandıktan sonra, karar vericinin stratejik hedeflerine göre VIKOR, CRADIS veya TODIM algoritmaları adım adım uygulanır.

4.4.1. Küresel Bulanık VIKOR Yöntem

Sırpça Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşık Çözüm (*VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) ifadesinin baş harflerinden oluşan VIKOR yöntemi, ilk olarak Opricovic (1998) tarafından çok boyutlu karmaşık sistemlerin optimizasyonu amacıyla karar bilimleri literatürüne kazandırılmıştır. Yöntemin temel matematiksel felsefesi; birbirine tamamen zıt ve birbiriyle açıkça çelişen performans ölçütlerinin, örneğin yüksek teknoloji yatırımı ile düşük operasyonel maliyet hedeflerinin eşzamanlı olarak değerlendirildiği çok amaçlı karar problemlerinde, tüm kısıtları optimum düzeyde tatmin edecek en rasyonel uzlaşık çözümü analitik olarak belirlemektir. Lojistik ve tedarik zinciri ağlarında karar vericiler doğası gereği mutlak ve kusursuz bir alternatifte sahip değildir; operasyonel bir örnek vermek gerekirse, karbon ayak izi en düşük olan demiryolu ulaştırma modu, rota esnekliği ve teslimat hızı açısından genellikle en zayıf topolojik performansı sergilemektedir. VIKOR algoritması, bu tür çok boyutlu ödünleşim durumlarında

devreye girerek, pozitif ideal çözüme topolojik olarak en yakın konumda bulunan ve aynı zamanda operasyonel hedeflerden en az taviz verilen uzlaşık seçeneği matematiksel olarak tespit etmeyi amaçlar.

Algoritmanın matematiksel altyapısında iki temel stratejik metrik bulunmaktadır: Maksimum grup faydası ve minimum bireysel pişmanlık. Maksimum grup faydası, değerlendirilen bir alternatifin tüm operasyonel kısıtlar üzerindeki genel analitik performansını ve sistemik ortalamasını temsil ederken; minimum bireysel pişmanlık ölçütü, ilgili alternatifin en düşük performans gösterdiği kriterdeki sapma miktarını ve operasyonel risk potansiyelini maksimaks yaklaşımla hesaplar. İkiz dönüşüm sürecinde tedarik ağına entegre edilecek yeni bir dağıtık defter platformunu seçen operasyon yöneticisi için bir yazılım altyapısı, kurulum maliyeti ve veri işleme hızı açısından optimum düzeyde olabilir ve bu durum yüksek bir grup faydası üretir; ancak aynı yazılım siber güvenlik kriterinde yapısal bir zafiyet barındırıyorsa, bu durum karar mekanizması için kabul edilemez bir asimetrik risk, yani yüksek bir bireysel pişmanlık değeri oluşturur. Dolayısıyla algoritma, sadece ağırlıklı ortalaması en yüksek olan alternatifini değil, aynı zamanda sistem bütünlüğünü tehlikeye atacak düzeyde maksimum sapma barındırmayan en kararlı alternatifini uzlaşık çözüm olarak belirler.

Geleneksel yöntem deterministik kesin sayılarla çalışırken, Küresel Bulanık VIKOR (KB-VIKOR) metodolojisi, karar vericilerin sistemin stokastik doğasına dair şüphelerini ve stratejik kararsızlıklarını, bir önceki bölümde formülasyonu verilen küresel uzaklık ölçümü (d_s) aracılığıyla yöneylem modeline dâhil eder. Bu analitik entegrasyon sayesinde, yapısal belirsizliklerin son derece yüksek

olduğu ikiz dönüşüm ekosisteminde, karar vericilere hem matematiksel sınırları kanıtlanmış hem de operasyonel olarak uygulanabilir bir stratejik eylem planı sunulmaktadır. Belirtilen bu teorik ve topolojik altyapı doğrultusunda, KB-VIKOR algoritmasının iteratif hesaplama adımları sırasıyla şu şekilde formüle edilmektedir:

Adım 1: Küresel Bulanık Karar Matrisinin oluşturulması ve her bir j kriteri için Pozitif İdeal ($\tilde{f}_j^*$) ve Negatif İdeal ($\tilde{f}_j^-$) çözümlerin belirlenmesi. (Fayda kriterleri için en yüksek üyelik, maliyet kriterleri için en düşük üyelik aranır).

Adım 2: Her bir i alternatifi için, grup faydasını temsil eden S_i ve en kötü performansı (pişmanlığı) temsil eden R_i değerlerinin hesaplanması. Burada w_j , kriterin ağırlığını; d_s ise (4.16) nolu denklemdeki uzaklığı ifade eder:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{d_s(\tilde{f}_j^*, \tilde{x}_{ij})}{d_s(\tilde{f}_j^*, \tilde{f}_j^-)} \quad (4.17)$$

$$R_i = \max_j \left[w_j \frac{d_s(\tilde{f}_j^*, \tilde{x}_{ij})}{d_s(\tilde{f}_j^*, \tilde{f}_j^-)} \right] \quad (4.18)$$

Adım 3: $S^* = \min(S_i)$, $S^- = \max(S_i)$, $R^* = \min(R_i)$, $R^- = \max(R_i)$ referans değerleri bulunduktan sonra, uzlaşma indeksi olan Q_i değerinin hesaplanması. v parametresi uzlaşma stratejisi katsayısıdır (genelde 0.5 alınır):

$$Q_i = v \left(\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right) + (1 - v) \left(\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \right) \quad (4.19)$$

Adım 4 (Karar Kuralları - VIKOR'un En Kritik Aşaması): Alternatifler S_i , R_i ve Q_i değerlerine göre küçükten büyüğe

sıralanır. En küçük Q_i değerine sahip olan alternatif ($A^{(1)}$), ancak aşağıdaki iki şartı aynı anda sağlıyorsa kesin (tek) galip ilan edilir:

- **Kural 1 (Kabul Edilebilir Avantaj):** $Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq \frac{1}{m-1}$ olmalıdır (Burada m , alternatif sayısıdır. $A^{(2)}$, ikinci sıradaki alternatiftir).

- **Kural 2 (Kabul Edilebilir İstikrar):** $A^{(1)}$ alternatifi, S_i ve/veya R_i sıralamalarında da birinci sırada olmalıdır.(Eğer bu kurallar sağlanmazsa, algoritma tek bir kazanan yerine bir uzlaşık alternatifler seti sunar).

4.4.2. Küresel Bulanık CRADIS Yöntemi

Puşka ve arkadaşları (2022) tarafından karar bilimleri literatürüne kazandırılan CRADIS (Compromise Ranking of Alternatives from Distance to Ideal Solution) İdeal Çözüme Uzaklıktan Alternatiflerin Uzlaşık Sıralaması algoritması, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde oldukça yenilikçi ve metodolojik açıdan kararlı bir analitik yaklaşım sunmaktadır. Geleneksel çok ölçütlü karar modellerinin büyük bir kısmı, özellikle endüstri standardı hâline gelmiş TOPSIS algoritması, alternatifleri değerlendirirken temelde tek yönlü bir mesafe ölçümüne veya bu mesafelerin basit bir oransal kıyaslamasına dayanmaktadır. Ancak ulaştırma ve tedarik zinciri ağlarında deneyimlenen ikiz dönüşüm gibi yüksek riskli, ağır sabit sermaye gerektiren ve asimetric şoklara açık kapasite yatırımları söz konusu olduğunda, karar vericilerin sadece mükemmel olarak tanımlanan ideale ne kadar yakın olduklarını bilmeleri yeterli değildir; aynı zamanda sistemin çöküşünü ifade eden karşıt idealden ne kadar uzak olduklarını da eşzamanlı ve birbirinden tam bağımsız olarak ölçmeleri yöneylem araştırması açısından hayati bir gerekliliktir.

CRADIS algoritmasının temel matematiksel felsefesi, bu çift yönlü analitik güvenlik prensibine dayanır. Operasyonel düzeyde örneklendirmek gerekirse; yeni bir otonom depolama kapasitesi seçilirken belirli bir alternatif, işlem hızı ve ağ esnekliği açısından pozitif ideal çözüme topolojik olarak çok yakın konumlanabilir, ancak aynı alternatif ilk yatırım maliyeti ve siber güvenlik zafiyetleri açısından sistemin doğrudan reddedeceği negatif ideal çözüme de tehlikeli derecede yakın durabilir. CRADIS metodolojisi, alternatifleri önceliklendirirken salt doğrusal bir yakınlık katsayısı kullanmak yerine, değerlendirilen seçeneğin pozitif ideale göre fayda derecesini (K^+) ve negatif ideale göre fayda derecesini (K^-) tamamen izole edilmiş denklemlerle hesaplar. Bu ikili değerlendirme mimarisi, veri manipülasyonundan uzak, sapkın uç değerlere karşı son derece dirençli ve özellikle yeşil tedarik ağı sertifikasyon süreçleri veya tehlikeli madde taşıma rotalaması gibi risk toleransının asgari düzeyde olduğu stratejik problemlerde çok daha kararlı sonuçlar üretmektedir.

Bütünleşik karar modellemesinde, CRADIS algoritmasının deterministik kesin sayılarla çalışan orijinal versiyonu, karar vericilerin ikiz dönüşüm ekosistemindeki stratejik tereddütlerini ve sisteme dair stokastik şüphelerini yansıtabilmek amacıyla Küresel Bulanık CRADIS (KB-CRADIS) formuna dönüştürülmektedir. Bu analitik topoloji; üç boyutlu üyelik, üye olmama ve kararsızlık derecelerini barındıran bulanık karar matrislerini, doğrusal bir normalizasyon fonksiyonu ve çift yönlü uzaklık mantığıyla işler. KB-CRADIS algoritmasının iteratif hesaplama adımları sırasıyla şu şekilde formüle edilmektedir:

Adım 1: Küresel Bulanık Matrisin, (Bölüm 4.3'te verilen) Skor Fonksiyonu yardımıyla kesin (crisp) sayılara dönüştürülmesi (Durulaştırma/Defuzzification).

Adım 2: Elde edilen kesin matrisin (x_{ij}) normalize edilmesi (n_{ij}) . CRADIS doğrusal normalizasyon kullanır:

$$\text{Fayda (Benefit) Kriterleri İçin: } n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i (x_{ij})} \quad (4.20)$$

$$\text{Maliyet (Cost) Kriterleri İçin: } n_{ij} = \frac{\min_i (x_{ij})}{x_{ij}} \quad (4.21)$$

Adım 3: Normalize edilmiş ağırlıklı matrisin $(v_{ij} = n_{ij} \times w_j)$ oluşturulması.

Adım 4: İdeal (t_j^+) ve Anti-İdeal (t_j^-) çözümlerin belirlenmesi:

$$t_j^+ = \max_i (v_{ij}) \text{ ve } t_j^- = \min_i (v_{ij}) \quad (4.22)$$

Adım 5: Her bir alternatifin ideal çözüme olan uzaklığının (D_i^+) ve anti-ideal çözüme olan uzaklığının (D_i^-) hesaplanması:

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^n (t_j^+ - v_{ij}) \text{ ve } D_i^- = \sum_{j=1}^n (v_{ij} - t_j^-) \quad (4.23)$$

Adım 6: Tüm alternatifler içindeki optimal ideal (S_0^+) ve optimal anti-ideal (S_0^-) performans sınırlarının belirlenmesi:

$$S_0^+ = \min_i (D_i^+) \text{ ve } S_0^- = \max_i (D_i^-) \quad (4.24)$$

Adım 7: Alternatiflerin fayda derecelerinin $(K_i^+ \text{ ve } K_i^-)$ ve nihai sıralama skorunun (Q_i) hesaplanması. En yüksek Q_i skoruna sahip alternatif en iyidir:

$$K_i^+ = \frac{S_0^+}{D_i^+} \text{ ve } K_i^- = \frac{D_i^-}{S_0^-} \quad (4.25)$$

$$Q_i = \frac{K_i^+ + K_i^-}{2} \quad (4.26)$$

4.4.3. Küresel Bulanık TODIM Yöntemi

Gomes ve Lima (1991) tarafından literatüre kazandırılan TODIM algoritması, karar verme biliminde klasik rasyonel seçim kuramı varsayımlarını esneten davranışsal yöneylem felsefesine dayanmaktadır. Geleneksel çok ölçütlü karar modellerinin büyük bir kısmı, karar vericinin duygulardan arınmış, tam bilgiye sahip ve risk altında daima beklenen faydasını maksimize eden mutlak rasyonel bir aktör olduğunu varsaymaktadır. Ancak operasyonel gerçeklikte, özellikle ulaştırma ve lojistik gibi asimetrik krizlere açık ağ yapılarında, yöneticiler stratejik kararlarını alırken salt deterministik optimizasyon algoritmalarına değil; risk algılarına, operasyonel kayıp senaryolarına ve sezgisel deneyimlerine de başvurmaktadır.

TODIM algoritmasının analitik gücü, Kahneman ve Tversky tarafından geliştirilen ve 2002 yılında Nobel Ekonomi Ödülü ile taçlandırılan Beklenti Kuramını çok ölçütlü karar verme matematiğine entegre etmesinden almaktadır.

Bu kuramsal altyapıya göre, tedarik zinciri yöneticileri ve genel olarak karar vericiler, kayıplara karşı aynı oransal büyüklükteki kazançlardan çok daha yüksek bir hassasiyet göstermektedir. Bu asimetrik karar eğilimi davranışsal modellemelerde kayıptan kaçınma fenomeni olarak adlandırılır. Operasyonel bir örnekle açıklamak gerekirse; bir lojistik yöneticisi, yeşil dönüşüm regülasyonları

kapsamında karbon optimizasyonundan elde edilecek 100.000 birimlik bir maliyet tasarrufunun yaratacağı marjinal faydadan ziyade, algoritmik rüşdünü ispatlamamış yeni bir yeşil tedarikçinin iflas etmesi sonucu tedarik ağının kopmasıyla yaşanacak 100.000 birimlik bir zarardan oransal olarak çok daha fazla kaçınma eğilimindedir. Karar vericinin zihnindeki bu asimetric risk psikolojisi, klasik yöneylem araştırmasının doğrusal fayda fonksiyonlarıyla doğru bir şekilde modellenememektedir.

Belirtilen davranışsal kısıtları aşmak üzere TODIM metodolojisi, alternatifleri birbirleriyle ikili karşılaştırma matrisleri üzerinden eşleştirirken, bu asimetric psikolojiyi zayıflatma ve kayıptan kaçınma katsayısı (θ) kullanarak matematiksel olarak modele yansıtır. Değerlendirilen bir alternatifin değerine karşı belirli bir operasyonel kısıttaki üstünlüğü sisteme analitik bir kazanç olarak normalleştirilmiş bir değerle eklenirken; değerine karşı geride kaldığı durum operasyonel bir kayıp olarak algılanır ve algoritma tarafından (θ) parametresi aracılığıyla çok daha şiddetli bir negatif katsayıyla, başka bir deyişle matematiksel bir cezayla sonuç matrisine yansıtılır. Bu algoritmik mimari, risk belirsizliğinin yüksek olduğu ikiz dönüşüm yatırımlarında; örneğin kurulum maliyeti yüksek ancak sistem kararlılığı kanıtlanmış bir dijital altyapıyı, ilk yatırım maliyeti düşük ancak siber güvenlik zafiyeti yüksek bir platforma tercih etme yönündeki yönetsel eğilimi analitik olarak kusursuz bir şekilde simüle eder.

Geleneksel TODIM algoritması deterministik ve kesin sayısal verilerin bulunduğu karar uzaylarında çalışırken; operasyon yöneticilerinin asimetric bilgi eksikliğinden kaynaklanan stratejik tereddütlerini matematiksel modele yansıtma adına algoritma, üç

boyutlu üyelik, üye olmama ve kararsızlık derecelerini barındıran Küresel Bulanık TODIM (KB-TODIM) topolojisine dönüştürülmüştür. Bu birleşik analitik metodoloji, karar vericinin riskten kaçınma psikolojisini ve sisteme dair stokastik şüphelerini eşzamanlı olarak modelleyen, ulaştırma ağlarının tedarik zinciri dirençliliğini artıracak son derece kararlı stratejik çıktılar üretmektedir. KB-TODIM algoritmasının iteratif hesaplama adımları sırasıyla şu şekilde formüle edilmektedir:

Adım 1: Kriter ağırlıklarının (w_j), en yüksek ağırlığa sahip referans kritere ($w_r = \max(w_j)$) bölünerek "göreceli (rölatif) ağırlıkların" (w_{jc}) hesaplanması:

$$w_{jc} = \frac{w_j}{w_r} \quad (4.27)$$

Adım 2: Alternatiflerin ikili karşılaştırmaları yapılarak (4.16 denklemindeki uzaklık formülü ile), her bir c kriteri için A_i alternatifinin A_j alternatifine karşı "Baskınlık Derecesinin" ($\Phi_c(A_i, A_j)$) hesaplanması. Yöneticinin kayıptan kaçınma hassasiyeti θ parametresi ile ifade edilir (genellikle $\theta = 1$ veya $\theta = 2$ alınır): $\Phi_c(A_i, A_j) =$

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{w_{jc} d_s(\tilde{x}_{ic}, \tilde{x}_{jc})}{\sum w_{jc}}} & \text{Eğer } \tilde{x}_{ic} > \tilde{x}_{jc} \text{ (Kazanç Durumu)} \\ 0 & \text{Eğer } \tilde{x}_{ic} = \tilde{x}_{jc} \text{ (Nötr Durum)} \\ -\frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{(\sum w_{jc}) d_s(\tilde{x}_{jc}, \tilde{x}_{ic})}{w_{jc}}} & \text{Eğer } \tilde{x}_{ic} < \tilde{x}_{jc} \text{ (Kayıp Durumu)} \end{cases} \quad (4.28)$$

Adım 3: Kriterler bazında elde edilen baskınlıkların toplanarak, A_i alternatifinin A_j alternatifine karşı Genel Baskınlık Matrisinin ($\delta(A_i, A_j)$) oluşturulması:

$$\delta(A_i, A_j) = \sum_{c=1}^n \Phi_c(A_i, A_j) \quad (4.29)$$

Adım 4: Her bir alternatifin diğer tüm alternatiflere karşı gösterdiği toplam üstünlüğün normalize edilerek Global Değer İndeksinin (ξ_i) bulunması. İndeks değeri 1'e en yakın olan alternatif, risk psikolojisi bağlamında en uygun çözümdür:

$$\xi_i = \frac{\sum_j \delta(A_i, A_j) - \min_i \sum_j \delta(A_i, A_j)}{\max_i \sum_j \delta(A_i, A_j) - \min_i \sum_j \delta(A_i, A_j)} \quad (4.30)$$

BÖLÜM 5: ULAŞTIRMA VE LOJİSTİK İŞLETMELERİ ÜZERİNE AMPİRİK BİR UYGULAMA

5.1. Araştırmanın Amacı, Kapsamı ve Sınırları

Kitabın önceki bölümlerinde kavramsal ve teorik temelleri detaylandırılan ikiz dönüşüm ve Endüstri 5.0 paradigmaları, ulaştırma ve tedarik zinciri ağlarının varoluşsal bir yapısal dönüşüm geçirdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Ancak üretim yönetimi ve yöneylem araştırması literatüründeki temel eksiklik, bu makro düzeydeki stratejik evrimin mikro düzeyde, yani işletme operasyonlarında nasıl ölçüleceği ve sistem performansının hangi analitik metriklerle derecelendirileceği problemidir. Geleneksel operasyon yönetimi literatürü; tedarik ağı performanslarını ağırlıklı olarak salt kapasite kullanım oranları, ton-kilometre maliyetleri veya statik çevrim süreleri gibi tek boyutlu, geçmiş dönem verilerine dayanan deterministik göstergeler üzerinden değerlendirme eğilimindedir (Bellamy ve Basole, 2012; Mahallati Rayeni ve Hosseinzadeh Saljooghi, 2013; Guersola vd., 2018; Oubrahim vd., 2022).

Ancak modern ulaştırma ağlarında ikiz dönüşüm; sistemin fiziksel taşıma kapasitesini artırırken ağ üzerindeki karbon emisyonlarını düşürmeyi, ileri algoritmik altyapılara devasa operasyonel kaynak tahsis ederken aynı zamanda sistemin insan odaklı ergonomik yapısını maksimize etmeyi gerektiren, doğası gereği birbiriyle rekabet eden ve yönetsel ödünleşimler barındıran çok amaçlı hedefler dizisinden oluşmaktadır. Bu çalışmanın temel ampirik amacı; söz konusu operasyonel karmaşıklığı algoritmik olarak çözebilmek adına, tek

boyutlu deterministik performans göstergelerinin kısıtlarını aşan, ÇKKV temelli, çok boyutlu ve proaktif bir stratejik operasyonel dönüşüm performansı ölçüm modeli kurgulamaktır. Tasarlanan bu yöneylem modeli, Borsa İstanbul Ulaştırma Endeksi içerisinde yer alan sektör aktörlerinin dijital, yeşil ve insan eksenindeki operasyonel olgunluk seviyelerini salt sübjektif algılarla değil, matematiksel ve algoritmik bir kesinlikle önceliklendirmeyi hedeflemektedir.

5.2. Karar Modelinin Kurgulanması: Alternatifler ve Kriterler

ÇKKV metodolojilerinde modelin analitik gücü ve sonuçların istatistiksel kararlılığı, doğrudan karar uzayının doğru kurgulanmasına bağlıdır. Karar uzayı; problemi temsil eden alternatifler seti ile bu alternatiflerin performansını ölçecek olan kısıt ve ölçütler setinin birbirini tamamlayan, ontolojik bir bütünlük içinde tanımlanmasını gerektirir. Bu bağlamda, ulaştırma ağlarının içinden geçtiği dijitalleşme ve yeşil operasyonlar eksenli ikiz dönüşüm ile insan odaklı Endüstri 5.0 metamorfozunu çok boyutlu olarak ölçebilmek amacıyla, araştırma modeli iki temel eksen üzerinde inşa edilmiştir.

5.2.1. Karar Alternatiflerinin Belirlenmesi

Araştırmanın ampirik evrenini, Türkiye makroekonomisinin küresel tedarik zincirlerine entegrasyonunda başat rol oynayan ve kurumsal kapasitesiyle öne çıkan ulaştırma ve lojistik işletmeleri oluşturmaktadır. Ancak kurulacak yöneylem modelinin sektörü bütüncül bir şekilde temsil edebilmesi ve sistem yaklaşımını yansıtabilmesi için, karar matrisine dâhil edilecek alternatiflerin seçimi rassal değil, amaca yönelik bir kısıtlandırma ile

gerçekleştirilmiştir. Geleneksel literatürdeki ulaştırma ağlarını salt havayolu taşımacılığına indirgeyen yaklaşımlardan kaçınmak adına; tedarik zincirinin farklı alt disiplinlerini, kapasite modellerini ve fiziksel hizmet düğümlerini temsil eden beş stratejik operasyonel aktör analize dâhil edilmiştir:

- **A1 (Reysaş Lojistik) - Karasal Ekosistem ve İntermodal Entegrasyon:** Ulaştırma ağının karasal altyapısını temsil eden bu alternatif, salt bir karayolu taşımacısı olmanın ötesinde entegre bir tedarik ağı mimarıdır. İkiz dönüşüm bağlamında aktörün en kritik rolü, yeşil depolama ve emisyon azaltıcı rotalama stratejileridir. İşletme, yüksek hacimli depo çatılarında kurduğu güneş enerjisi santralleri ile operasyonel öz tüketimini yenilenebilir kaynaklardan sağlayarak enerji kaynaklı dolaylı karbon emisyonlarını sıfırlama yolunda ilerlemektedir. Aynı zamanda karbon ayak izi yüksek olan karayolu ulaştırmasını, demiryolu ve denizyolu ile entegre eden çok modlu taşıma ağına yaptığı fiziksel yatırımlar; algoritmik depo yönetim sistemleriyle birleştiğinde, makro düzeyde lojistik optimizasyonunun somut bir örneğini sunmaktadır.
- **A2 (Türk Hava Yolları) - Küresel Ağ Yönetimi ve Ana Dağıtım Merkezi Modeli:** Karar modelinin en yüksek kapasiteli aktörü olan bu alternatif, ulusal kimliğiyle küresel bir ağ sağlayıcısıdır. İstanbul'u küresel bir aktarma merkezi hâline getiren topla ve dağıtım ağ tasarımı, kurumun operasyonel sınırlarını belirler. İkiz dönüşüm ekseninde işletme; sürdürülebilir havacılık yakıtı kullanımı, doğrudan operasyonel emisyonları düşüren aerodinamik filo yatırımları

ve kargo operasyonlarındaki dağıtık defter teknolojisi tabanlı takip sistemleriyle sektörün teknolojik kapasite sınırlarını test etmektedir.

- **A3 (Pegasus Hava Taşımacılığı) - Düşük Maliyetli Taşıyıcı ve Operasyonel Çeviklik:** Geleneksel ağ tasarımına asimetrik bir alternatif olarak konumlandırılan bu aktör, düşük maliyetli taşıyıcı iş modelinin öncüsüdür. Noktadan noktaya transit uçuşlara dayanan bu kapasite modelinin ikiz dönüşümdeki akademik önemi, algoritmik havayolu vizyonudur. Operasyonel çevikliği sağlamak için makine öğrenmesi destekli dinamik fiyatlandırma ve düğüm noktalarındaki fiziksel bekleme ve hazırlık sürelerini minimuma indiren algoritmalar kullanmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik açısından ise, birim taşıma başına düşen karbon emisyonunu radikal biçimde azaltan yeni nesil filo stratejisiyle yeşil operasyonların agresif bir temsilcisidir.
- **A4 (Do & Co) - Döngüsel Ekonomi ve Gıda Tedarik Zinciri:** Klasik ulaştırma ve yöneylem araştırmalarında genellikle göz ardı edilen ikram ve tedarik düğümünü temsil eder. Bu alternatifin modele dâhil edilmesinin teorik gerekçesi, döngüsel ekonomi ve değer zinciri kaynaklı dolaylı emisyon yönetiminin önemini vurgulamaktır. İşletmenin algoritmik talep tahminleme modelleri ile operasyonel fireleri önlemesi ve atık yönetimi politikaları, sürdürülebilir ulaştırma kavramının salt yakıt sarfiyatıyla ilgili olmadığını; tersine lojistik dâhil olmak üzere tedarik zincirindeki her düğüm noktasının ekolojik kısıtları olduğunu kanıtlamaktadır.

- **A5 (Çelebi Hava Servisi) - İşletmeler Arası Operasyonlar ve İstasyon Elektrifikasyonu:** Ulaştırma ekosisteminde hava ve kara ağlarının fiziksel olarak kesiştiği arayüzü temsil eden yer hizmetleri aktörüdür. Doğrudan son tüketiciye değil, ağ içerisindeki diğer kurumsal kapasite sağlayıcılarına hizmet verir. İkiz dönüşüm açısından bu alternatifin odak noktası; yer destek ekipmanlarının elektrifikasyonu ve algoritmik kaynak planlamasıdır. Fosil yakıtlı istasyon araçlarının elektrikli donanımlara dönüştürülmesi aktarma merkezlerindeki karbon ayak izini silerken; bagaj ve yolcu yönlendirme süreçlerinin endüstriyel sensörlerle koordine edilmesi, havacılık değer zincirindeki kapasite darboğazlarını ortadan kaldırmaktadır.

5.2.2. Karar Kriterlerinin Tanımlanması ve Gerekçelendirilmesi

Karar bilimleri literatüründe kriter setinin oluşturulması olarak adlandırılan bu analitik aşamada, ulaştırma ağlarının ontolojik karmaşıklığı göz önünde bulundurularak, hem nicel operasyonel performans göstergeleri hem de sürdürülebilirlik odaklı nitel metrikler melez bir matematiksel yapı içinde birleştirilmiştir. Kullanılan değerlendirme ölçütleri, işletmelerin 2024 yılı kurumsal faaliyet raporları, bağımsız denetimden geçmiş operasyonel performans envanterleri ve uluslararası standartlardaki kurumsal sürdürülebilirlik bildirimleri doğrultusunda belirlenmiş olup, tasarlanan ÇKKV modeline dâhil edilen tüm kısıtlar maksimizasyon (fayda) yönündür:

- **K1: Sürdürülebilirlik Uyum Skoru (Maksimum):** İkiz dönüşümün yeşil operasyonlar eksenini temsil eder. Bu ölçüt, kapasite sağlayıcılarının çevresel duyarlılığını ve karbon ayak izi yönetimini ölçmek üzere, kurumsal sürdürülebilirlik

ilkeleri uyum çerçevesi kapsamında deklare edilen resmi faaliyet verilerinden elde edilmiştir. Karar alternatiflerinin çevresel, sosyal ve yönetim kısıtlarını kendi tedarik ağlarına ne ölçüde içselleştirdiklerini gösteren bir indeks olup, algoritmik modelde en yüksek değerin hedeflenmesi arzulanır.

- **K2: Dijitalleşme ve Soyut Kapasite Yoğunluğu (Maksimum):** İkiz dönüşümün dijitalleşme eksenini temsil eder. İşletmenin algoritmik altyapıya ve inovasyona ne kadar operasyonel kaynak tahsis ettiğini ölçer. Şirketlerin kurumsal envanterlerinde yer alan ve araştırma-geliştirme, yazılım, endüstriyel patent gibi yatırımları kapsayan soyut teknolojik altyapı kaleminin, toplam fiziksel ve soyut kurulu kapasiteye oranlanmasıyla elde edilmiştir. Teknolojik rekabet avantajını ve sistemin dijital olgunluğunu yansıttığı için optimizasyon modelinde maksimize edilmesi hedeflenir.
- **K3: İnsan Kaynağına Operasyonel Yatırım Oranı (Maksimum):** Endüstri 5.0 felsefesinin insan merkezlilik ayağını temsil eder. Çalışan başına düşen operasyonel kaynak tahsisi olarak formüle edilen bu ölçüt; yıllık toplam personel iyileştirme giderlerinin, başka bir ifade ile ücret, ergonomik geliştirme ve mesleki eğitim bütçelerinin, sistemdeki toplam çalışan sayısına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Kapasite sağlayıcısının yarattığı operasyonel katma değeri ağ içerisindeki insan kaynağıyla ne ölçüde paylaştığının bir göstergesi olup, bu değerin yüksek olması sosyal sürdürülebilirliği ve işgücü verimliliğini ifade eder.
- **K4: Operasyonel Dirençlilik ve Sistem Esnekliği (Maksimum):** İkiz dönüşümün gerektirdiği devasa teknolojik

altyapı ihtiyacını asimetrik şoklara maruz kalmadan fonlayabilme gücünü temsil eder. Yöneylem literatüründe sistem sağlamlığının ve şok emme kapasitesinin en temel göstergesi olan tampon kapasite ve likit operasyonel kaynakların, kısa vadeli sistem yükümlülüklerine oranlanması üzerinden kurgulanmıştır. Şirketin yapısal dönüşümünü dışsal kısıtlara bağımlı kalmadan, kendi içsel sistem esnekliğiyle finanse edebilme gücünü gösterdiğinden çok amaçlı karar matrisinde maksimizasyonu arzulanır.

- **K5: Fiziksel Kapasite Kullanım Etkinliği (Maksimum):**

Sabit sermaye yoğun bir endüstri olan ulaştırma ağlarında fiziksel kaynak optimizasyonunu ölçer. Sektörel kapasite kullanım oranını tespit etmek üzere, işletmenin ürettiği toplam operasyonel çıktı hacminin, eldeki toplam kurulu kapasiteye bölünmesiyle hesaplanmıştır. Fiziksel düğüm noktalarının ve taşıma araçlarının optimizasyon algoritmaları yardımıyla ne kadar verimli kullanıldığını ve sistemsel faydaya dönüştürüldüğünü gösterdiği için, uzlaşık çözüm arayışında en yüksek değere ulaşması istenir.

5.3. Araştırma Veri Seti: Başlangıç Karar Matrisi ve Tanımlayıcı İstatistikler

Kavramsal altyapısı ve teorik kısıtları tanımlanan ÇKKV modelinin ampirik olarak çalıştırılabilmesi ve algoritmik çözüme ulaştırılabilmesi için, karar uzayını oluşturan stratejik alternatiflerin belirlenen operasyonel ölçütler altındaki performanslarını yansıtan deterministik bir sayısal veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu analitik gereksinim doğrultusunda, ulaştırma tedarik ağını temsil eden

kurumsal kapasite sağlayıcılarının resmi faaliyet envanterlerinden ve bağımsız denetimden geçmiş operasyonel sürdürülebilirlik bildirimlerinden elde edilen yapılandırılmış verilerle başlangıç karar matrisi inşa edilmiş ve Tablo 1'de sunulmuştur..

Tablo 1. Araştırmanın Karar Matrisi

Alternatifler	K1: Sürdürülebilirlik Uyum Skoru	K2: Dijitalleşme ve Soyut Varlık Yoğunluğu	K3: İnsan Kaynağına Yatırım Oranı (TL)	K4: Finansal Dirençlilik (Cari Oran)	K5: Fiziki Kapasite Verimliliği (Hız)
A1: Reysaş	0.080	0.004	231.906,88	1.475	2.057
A2: THY	1.000	0.003	2.444.062,72	1.007	0.856
A3: Pegasus	1.000	0.010	2.558.415,00	1.175	0.867
A4: Do&Co	1.000	0.027	1.181.380,00	1.380	5.633
A5: Çelebi	1.000	0.008	432.784,21	1.333	2.814
Kriter Yönü:	(Max)	(Max)	(Max)	(Max)	(Max)

Karar matrisinin (Tablo 1) incelenmesi sonucunda, veri setinin tamamen heterojen ve asimetrik bir birim yapısına (indeks, oran, parasal büyüklük ve katsayı) sahip olduğu görülmektedir. Uygulanacak olan objektif ağırlıklandırma yöntemlerinin (Entropi, CRITIC, MEREC) matematiksel altyapısını ve algoritmik normalizasyon gerekliliğini analitik olarak gerekçelendirmek adına, veri setine ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 2'de hesaplanmıştır.

Tablo 2. Veri Setine Ait Tanımlayıcı İstatistikler Değerleri

İstatistiksel Ölçüt	K1 (Skor)	K2 (Oran)	K3 (TL)	K4 (Oran)	K5 (Hız)
Gözlem Sayısı (N)	5	5	5	5	5
Minimum Değer	0.080	0.003	231.906,88	1.007	0.856
Maksimum Değer	1.000	0.027	2.558.415,00	1.475	5.633
Aritmetik Ortalama	0.816	0.010	1.369.709,76	1.274	2.445
Standart Sapma (σ)	0.411	0.009	1.073.169,34	0.187	1.977
Varyans Katsayısı (CV)	0.504	0.963	0.783	0.147	0.808

Tablo 2'de sunulan tanımlayıcı istatistikler, araştırmanın karar uzayındaki yüksek varyansı ve ölçek asimetrisini net bir biçimde ortaya koymaktadır. Örneğin, K3 (İnsan Kaynağına Operasyonel Yatırım) kriterinde değerler milyon seviyelerinde fark edilebilir bir standart sapmaya (1.073.169,34) sahipken; K2 (Dijitalleşme) kriterinde binde birlik oranlar gözlemlenmektedir. Karar bilimleri literatüründeki ÇKKV metodolojisi kurallarına göre; böylesine farklı ölçü birimlerine ve varyans aralıklarına sahip ham verilerin doğrudan optimizasyon işlemine tabi tutulması, mutlak değeri büyük olan parametrelerin (K3) küçük oranları (K2) matematiksel olarak baskılamasına ve modelin yapısal bir algoritmik sapmaya maruz kalmasına yol açacaktır.

Ek olarak CRITIC gibi objektif ağırlıklandırma algoritmaları doğrudan bu standart sapma ve korelasyon farklılıklarından beslenerek çalışmaktadır. Belirtilen bu matematiksel zorunluluktan dolayı, takip eden veri işleme adımlarında başlangıç karar matrisi öncelikle doğrusal minimum-maksimum ve oransal normalizasyon teknikleriyle boyutsuzlaştırılacak ve farklı ölçüm metrikleri arasında algoritmik olarak karşılaştırılabilir bir analitik zemin tesis edilecektir.

5.4. Kriter Ağırlıklarının Objektif Yöntemlerle Hesaplanması

ÇKKV metodolojilerinde kriter ağırlıklarının (w) belirlenmesi, nihai uzlaşık sıralamayı doğrudan etkileyen en hassas analitik süreçtir. Literatürde ağırlıklandırma yöntemleri, karar verici yargılarına dayanan sübjektif yaklaşımlar ve matematiksel varyans ile veri dağılımına dayanan objektif algoritmalar olmak üzere iki temel gruba ayrılır. Bu çalışmada, ulaştırma ve tedarik zinciri ağırları gibi deterministik ve sayısal verilerin hâkim olduğu bir operasyonel ekosistemde, insan kaynaklı sezgisel sapmaları tamamen ortadan kaldırmak amacıyla, karar matrisinin kendi içsel matematiğinden beslenen üç farklı objektif ağırlıklandırma algoritması (Shannon Entropi, CRITIC, MEREC) kullanılmıştır. Başlangıç karar matrisi doğrusal normalizasyon teknikleriyle boyutsuzlaştırıldıktan sonra ilgili algoritmalar çalıştırılmış ve elde edilen analitik bulgular aşağıda sistematik olarak yorumlanmıştır

5.4.1. Shannon Entropi Yöntemi Bulguları

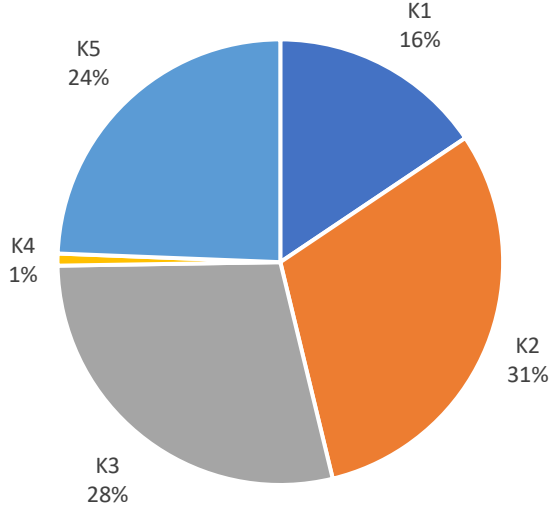
Enformasyon kuramına dayanan Shannon Entropi algoritması, tasarlanan veri setindeki dağılım genişliğini ve istatistiksel varyansı

ölçmektedir. Karar uzayındaki veriler arası matematiksel ayrışma ne kadar yüksekse, söz konusu kısıtın karar mekanizmasına sunduğu enformasyon yükü ve dolayısıyla optimizasyon modelindeki ağırlığı o denli yüksek olmaktadır.

Entropi algoritmasının çalıştırılması sonucunda elde edilen ağırlık vektörleri sırasıyla; **K2 (0.3063) > K3 (0.2853) > K5 (0.2438) > K1 (0.1559) > K4 (0.0087)** şeklinde gerçekleşmiştir.

Analitik bulgular incelendiğinde, Dijitalleşme ve Soyut Kapasite Yoğunluğu (K2) %30.63 ile en yüksek ağırlık katsayısını almıştır. Bu durumun temel matematiksel nedeni, kapasite sağlayıcılarının teknolojik altyapı yatırımları arasında asimetrik uçurumlar, yani yüksek bir yapısal varyans bulunmasıdır. Benzer şekilde, İnsan Kaynağına Operasyonel Yatırım Oranı (K3) %28.53 ile modelde en belirleyici ikinci kısıt olarak öne çıkmaktadır.

Buna karşılık, Operasyonel Dirençlilik ve Sistem Esnekliği (K4) kısıtı sadece %0.87 (binde 8.7) gibi oldukça düşük bir ağırlık değeri almıştır. Bunun temel nedeni, analize dâhil edilen lojistik işletmelerinin sistem esneklik oranlarının birbirine çok yakın bir aralıkta kümelenmesi ve Entropi matematiğinin bu düşük varyanslı benzerliği karar vermede ayırt edici olmayan, standart bir sistem enformasyonu olarak değerlendirmesidir.



Şekil 1. Entropy Algoritması Kriter Ağırlık Vektörleri Dağılımı

5.4.2. CRITIC Yöntemi Bulguları

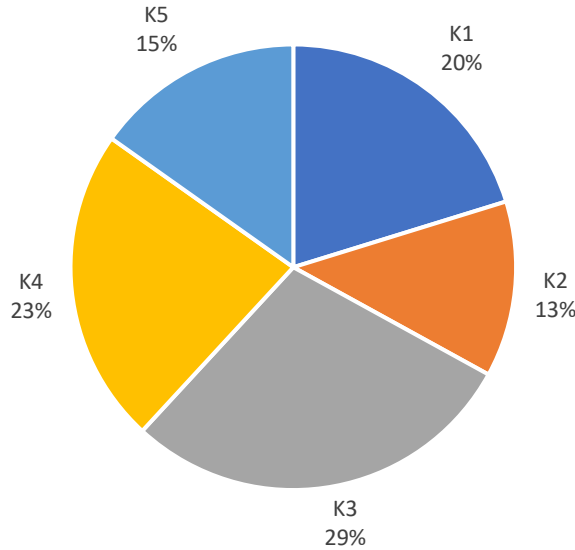
CRITIC algoritması, sadece karar matrisi içerisindeki standart sapma değerlerini değil, aynı zamanda ölçütler arasındaki doğrusal ilişki yönünü ve analitik çelişki yapısını da eşzamanlı olarak modellemektedir. Değerlendirilen bir operasyonel kısıt, sistemdeki diğer değişkenlerden ne derece bağımsız ve düşük korelasyonlu ise, karar uzayında barındırdığı analitik ödünleşim o denli yüksek kabul edilir ve genel model içerisindeki ağırlık vektörü matematiksel olarak artırılır.

Algoritmanın çalıştırılması sonucunda elde edilen ağırlık katsayıları sırasıyla; **K3 (0.2886) > K4 (0.2295) > K1 (0.2023) > K5 (0.1519) > K2 (0.1277)** şeklinde hesaplanmıştır.

Analitik sonuçlar incelendiğinde en çarpıcı bulgu, Entropi yönteminde en düşük ağırlığa sahip olan Operasyonel Dirençlilik ve Sistem Esnekliği (K4) kısıtının %22.95 ile modelde ikinci sıraya

yükselmesidir. Bu durum yöneylem araştırması perspektifinden şu şekilde yorumlanmaktadır: Alternatiflerin sistem esneklik oranlarındaki varyans nispeten düşük olsa da, söz konusu veriler diğer performans ölçütleriyle, örneğin dijital kapasite yoğunluğu veya yeşil operasyonel uyum metrikleriyle zıt yönlü bir istatistiksel eğilim, yani negatif korelasyon sergilemektedir.

Bir başka deyişle, operasyonel dirençlilik parametresi, çok boyutlu optimizasyon modeli içerisinde kendine has, bağımsız ve ayrıştırıcı bir karakter sergilemektedir. Öte yandan, İnsan Kaynağına Operasyonel Yatırım Oranı (K3) %28.86'lık ağırlık değeriyle CRITIC metodolojisinde de analitik gücünü koruyarak birinci sıraya yerleşmiş ve sistemin en belirleyici kısıtı olmaya devam etmiştir.



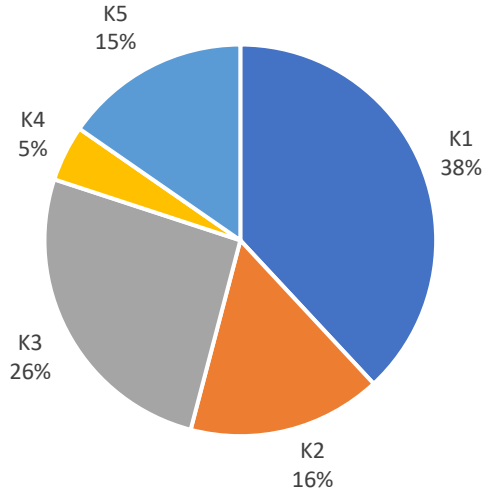
Şekil 2. CRITIC Algoritması Kriter Ağırlık Vektörleri Dağılımı

5.4.3. MEREC Yöntemi Bulguları

Karar bilimleri literatürüne yeni kazandırılan modern bir veri güdümlü objektif ağırlıklandırma algoritması olan MEREC yöntemi, sistemik dışlanma ve bozunum etkilerine dayanmaktadır. Bu algoritmanın matematiksel felsefesi; belirli bir operasyonel kısıtın karar matrisinden algoritmik olarak tamamen soyutlanmasının, alternatiflerin bütünleşik performans skorlarında ne ölçüde bir mutlak sapma yaratacağını ölçümlemeye odaklanmaktadır. Sistemden izole edilen bir değişkenin yarattığı yapısal bozunum etkisi ne kadar yüksekse, ilgili performans ölçütünün optimizasyon modelindeki ağırlık vektörü de o denli maksimize edilmektedir.

MEREC algoritmasının çalıştırılması sonucunda elde edilen ağırlık katsayıları sırasıyla; **K1 (0.3808) > K3 (0.2596) > K2 (0.1601) > K5 (0.1535) > K4 (0.0461)** olarak gerçekleşmiştir.

Analitik sonuçlar incelendiğinde, bu metodolojide Sürdürülebilirlik Uyum Skoru (K1) %38.08 gibi belirgin ve asimetrik bir ağırlık katsayısıyla birinci sıraya yükselmiştir. Bu matematiksel sonucun sektör ve operasyon yönetimi literatüründeki karşılığı şu şekilde yorumlanmaktadır: Birinci alternatifin (A1) çevresel uyum skoru olan 0.080 değeri, diğer tüm kurumsal kapasite sağlayıcılarının elde ettiği 1.000 tam değerinden radikal bir varyansla ayrılmaktadır. Eğer tasarlanan yöneylem modelinden sürdürülebilirlik kısıtı izole edilirse, karar uzayının tüm topolojik geometrisi ve alternatifler arası rekabet dengesi yapısal bir bozunuma uğrayacaktır. Dolayısıyla MEREC metodolojisi, çok boyutlu modelde sistem kararlılığını sağlayan en stratejik parametre olarak yeşil operasyonlar eksenini işaret etmiştir.



Şekil 3. MEREC Algoritması Kriter Ağırlık Vektörleri Dağılımı

5.4.4. Ağırlıkların Konsolidasyonu ve Karşılaştırmalı Analizi

Üç farklı objektif ağırlıklandırma algoritmasından elde edilen analitik bulgular, matematiksel bir kararlılık kontrolü sağlamak ve ulaştırma ile tedarik zinciri ağlarının ikiz dönüşüm topolojisini bütüncül bir yaklaşımla değerlendirebilmek amacıyla Tablo 3'te birleştirilmiştir.

Tablo 3. Objektif Ağırlıklandırma Yöntemleri Karşılaştırma Tablosu

Kriterler			Shannon Entropy (w_j)	CRITIC (w_j)	MEREC (w_j)	Ortalama (w_j)
K1:	Sürdürülebilirlik	Uyum	0.1559	0.2023	0.3808	0.2463
K2:	Dijitalleşme ve	Soyut	0.3063	0.1277	0.1601	0.1980
K3:	İnsan Kaynağına	Yatırım	0.2853	0.2886	0.2596	0.2778
	Skoru	Varlıklar				
	Oranı					

K4: Finansal Dirençlilik (Cari Oran)	0.0087	0.2295	0.0461	0.0948
K5: Kapasite Verimliliği (Hız)	0.2438	0.1519	0.1535	0.1831
TOPLAM	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Konsolide tablo incelendiğinde, çalışmanın kavramsal yapısını doğrulayan ve yöneylem araştırması perspektifinden çok kritik olan üç temel operasyonel çıkarım elde edilmiştir:

1. Endüstri 5.0 Parametresinin Algoritmik Kararlılığı (K3):

Hangi matematiksel yaklaşım kullanılırsa kullanılsın, başka bir ifadeyle varyans, analitik çelişki veya sistemden soyutlama etkisi temele alınsın, İnsan Kaynağına Operasyonel Yatırım Oranı (K3) kısıtı üç farklı algorithmada da istikrarlı bir biçimde yüksek bir ağırlık katsayısı (%25 ile %28 bandı) almış tek değişkendir. Bu durum ampirik olarak ispatlamaktadır ki; modern tedarik ağlarında kapasite sağlayıcılarını birbirinden ayırtıran asıl rekabet gücü salt donanımsal yatırımlar değil, o karmaşık kapasiteyi optimize edecek olan nitelikli operasyonel işgücüdür.

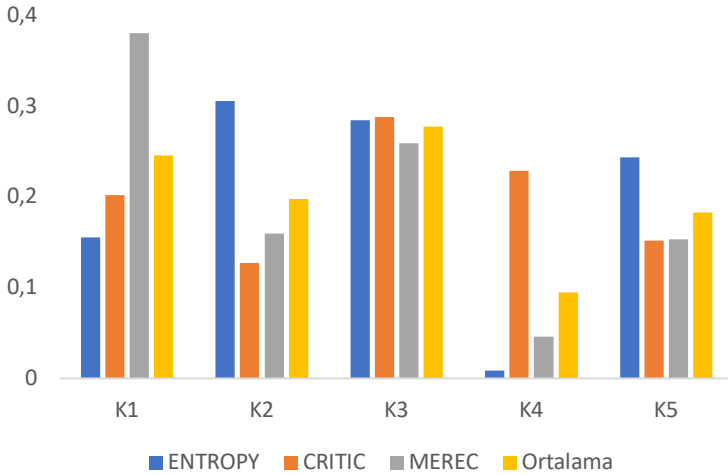
2. İkiz Dönüşüm Kısıtlarındaki Metodolojik Dalgalanma (K1 ve K2):

Entropi algoritması dijital ve soyut kapasite yoğunluğunu (K2) karar uzayının zirvesine konumlandırırken, MEREC algoritması yeşil operasyonel uyum skorunu (K1) sistem kararlılığının merkezine yerleştirmiştir. Bu metodolojik farklılık, dijitalleşme ve çevresel uyum süreçlerinin henüz lojistik ağlarında yapısal bir standarda kavuşmadığını,

aktörlerin asimetrik bir teknolojik geçiş evresinde bulunduğunu istatistiksel olarak kanıtlamaktadır.

3. Sistem Esnekliğinin Asgari Operasyonel Şarta Dönüşmesi

(K4): CRITIC dışındaki veri güdümlü modellerde, sistem esnekliğini temsil eden operasyonel dirençlilik parametresinin (K4) ağırlık vektörü asgari seviyelere gerilemiştir. Bunun operasyon yönetimi stratejisindeki anlamı şudur: Günümüz makro tedarik zincirlerinde bir aktörün kısa vadeli sistem yükümlülüklerini karşılayabilmesi artık asimetrik bir rekabet avantajı değil, ağ içerisinde kapasite sunabilmek için sağlanması zorunlu temel bir altyapı kısıtıdır. Gerçek operasyonel katma değer; teknoloji, çevresel sürdürülebilirlik ve insan odaklı süreç tasarımlarıyla yaratılmaktadır.



Şekil 4. Konsolide Ağırlık Değerleri Karşılaştırması

Bu aşamada elde edilen ve algoritmik kararlılığı ispatlanan nesnel kriter ağırlık vektörleri (w_j), çalışmanın bir sonraki fazında ulaştırma

ağlarındaki karar alternatiflerinin nihai ikiz dönüşüm performanslarını önceliklendirmek üzere kullanılacak olan uzlaşık sıralama algoritmalarına, analitik bir girdi olarak entegre edilecektir.

5.5 İkiz Dönüşüm Performanslarının ÇKKV Yöntemleri ile Sıralanması

Çalışmanın metodolojik zirvesini oluşturan bu aşamada; veri güdümlü nesnel algoritmalarından elde edilen objektif kriter ağırlıklarının ortalaması karar matrisine entegre edilerek, ulaştırma ve tedarik zinciri ağlarında faaliyet gösteren beş kurumsal kapasite sağlayıcısının stratejik ikiz dönüşüm performansları sıralanmıştır. Farklı operasyonel risk algılarını ve stratejik karar verme asimetrisini modelleyebilmek adına, bütünleşik analizler üç farklı Küresel Bulanık sıralama algoritması (KB-VIKOR, KB-CRADIS, KB-TODIM) ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nihai sonuçlar ve algoritmaların uzlaşık sıralama indeks Q değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 4'te sunulmuştur.

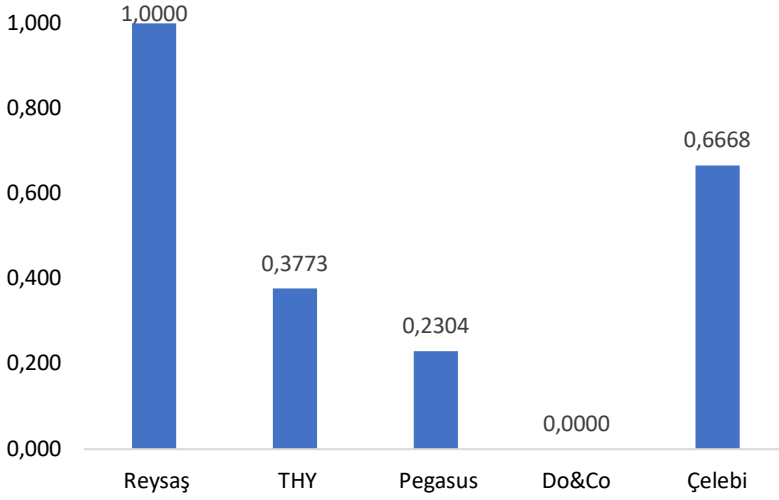
Tablo 4. Küresel Bulanık Karar Modelleri Alternatif Sıralama Sonuçları

Alternatif	SF- VIKOR(Q)	Sıra	SF- CRADIS(Q)	Sıra	SF- TODIM(Q)	Sıra
A1: Reysaş	1.0000	5	0.1992	5	0.0005	4
A2: THY	0.3773	3	0.5002	3	0.0000	5
A3: Pegasus	0.2304	2	0.6168	2	0.4364	3
A4: Do&Co	0.0000	1	1.0000	1	1.0000	1
A5: Çelebi	0.6668	4	0.4450	4	0.4838	2

5.5.1. Uzlaşmacı Strateji Perspektifinden KB-VIKOR Sonuçlarının Analizi

VIKOR yöntemi, sistemik ortalamaı ifade eden maksimum grup faydası ile en zayıf operasyonel kısıttaki maksimum sapmayı ifade eden minimum bireysel pişmanlık arasında optimum bir analitik denge arayan karar mekanizmaları için tasarlanmıştır. Bu algoritmada elde edilen indeks değerin (Q) sıfıra yaklaşması, ilgili alternatifin pozitif ideale en yakın konumda olduğunu ve sistem bütünlüğünü tehlikeye atacak düzeyde kabul edilemez bir operasyonel zafiyet barındırmadığını gösterir.

Tablo 4 incelendiğinde, A4 kodlu Do&Co firmasının $Q = 0.0000$ değeri ile mutlak birinci sıraya yerleştiği görülmektedir. Havacılık ikram ve tedarik zinciri ağlarında faaliyet gösteren aktör, gerek dijital operasyon hızı gerekse sürdürülebilir döngüsel ekonomi ölçütlerinde gösterdiği istikrarlı performans sayesinde karar uzayındaki en uzlaşık çözüm olmuştur. Onu $Q = 0.2304$ değeri ile Pegasus (A3) takip etmektedir; düşük maliyetli taşıyıcı iş modeliyle fiziksel kapasiteyi geliştirerek birim emisyon verimliliğini artırması, VIKOR algoritmasında yüksek bir grup faydası üretmiştir. Buna karşın, A1 kodlu Reysaş ($Q = 1.0000$), algoritmanın belirlediği maksimum senaryosuna takılarak sonuncu (5. sıra) olmuştur. Bu durum, firmanın incelenen ikiz dönüşüm kısıtlarından en az birinde, muhtemelen karbon ayak izi yüksek karayolu operasyonları veya geleneksel fiziksel altyapıları nedeniyle, karar mekanizmasında yüksek bir asimetric risk algısı yaratan performansa sahip olduğunu analitik olarak kanıtlamaktadır. Milli ağ sağlayıcı THY (A2) ise $Q = 0.3773$ ile grupta ortalama bir sistem kararlılığı (3. sıra) sergilemiştir.



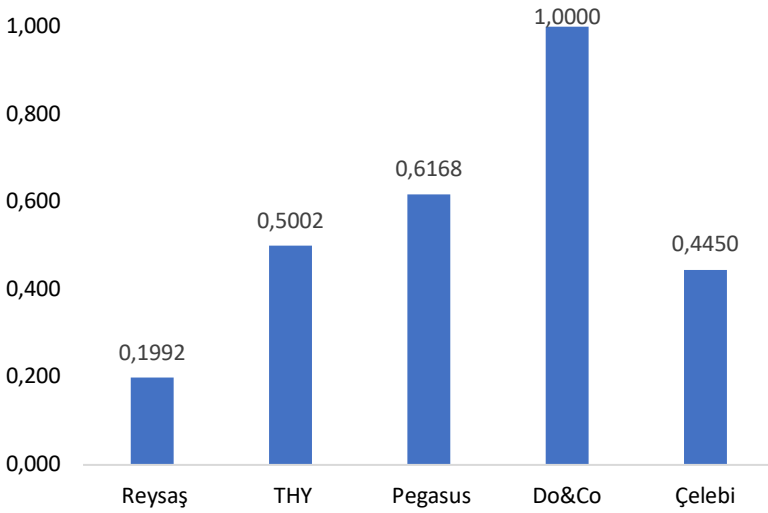
Şekil 5. KB-VIKOR İndeks Değerlerine Göre Alternatiflerin Sıralanması

5.5.2. Çift Yönlü Güvenlik Çerçevesinde KB-CRADIS Sonuçlarının Analizi

CRADIS algoritması, bir operasyonel alternatifin sadece pozitif ideal çözüme ne kadar yakın olduğunu değil, aynı zamanda sistemin yapısal çöküşünü ifade eden negatif ideal çözümden ne kadar uzak olduğunu eşzamanlı olarak ölçümleyerek çok daha katı ve kararlı bir sıralama topolojisi sunar. CRADIS metodolojisinde, VIKOR algoritmasının aksine Q indeks değerinin 1'e yaklaşması istenir.

CRADIS algoritmasının sonuçları, VIKOR bulgularını istatistiksel olarak desteklemekte ve A4 (Do&Co) firmasının ($Q = 1.0000$) liderliğini teyit etmektedir. Bu durum, A4 alternatifinin çift yönlü uzaklık felsefesinde de sapkın uç değerlerden etkilenmediğini, yani yeşil operasyon metriklerinde sadece birkaç kısıtta optimum seviyeye ulaşmış diğerlerinde zayıf kalmak yerine; tüm analitik eksenlerde negatif idealden hızla uzaklaşan homojen bir kapasite kararlılığı

gösterdiğini ispatlar. A3 (Pegasus), $Q = 0.6168$ ile ikinci sıradaki yerini korurken; A2 (THY) $Q = 0.5002$ ile analitik uzayın tam merkezinde, yani karşıt ideale ve ideale eşit mesafede kalarak 3. sırada konumlanmıştır. A1 (Reysaş) ise $Q = 0.1992$ ile negatif ideal çözüme topolojik olarak en yakın aktör sıfatıyla yine listenin sonuna (5. sıra) yerleşmiştir.



Şekil 6. KB-CRADIS İndeks Değerlerine Göre Alternatiflerin Sıralanması

5.5.3 Davranışsal Risk ve Kayıptan Kaçınma Ekseninde KB-TODIM Sonuçlarının Analizi

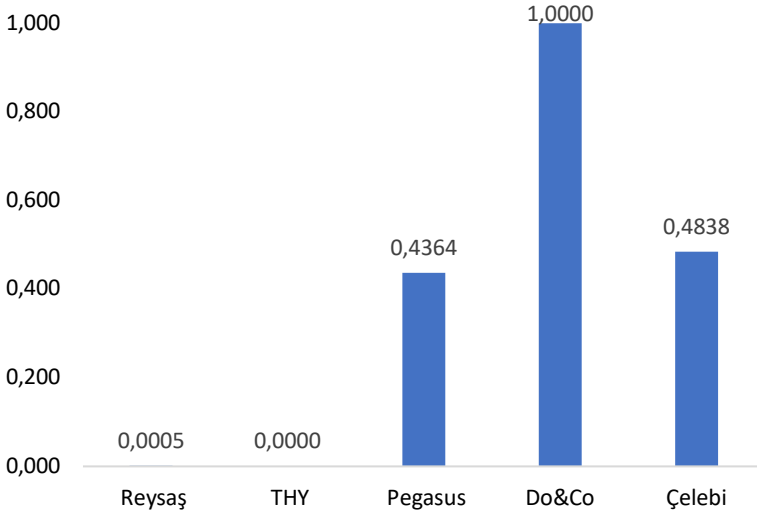
Davranışsal yöneylem araştırmasının temelini oluşturan Beklenti Kuramına dayanan ve stratejik karar vericinin kayıplara karşı asimetrik bir hassasiyet gösterdiği kayıptan kaçınma durumlarını modelleyen TODIM algoritması, uzlaşık sıralamada en belirgin ve analitik açıdan en dikkat çekici kırılmaları yaratmıştır. TODIM metodolojisinde global baskınlık indeksi (Q) 1'e ne kadar yakınsa,

ilgili aktörün diğer alternatiflere karşı davranışsal ve stratejik baskınlığı o derece yüksektir.

A4 (Do&Co) firması ($Q = 1.0000$), kayıptan kaçınma psikolojisinin devrede olduğu bu doğrusal olmayan modelde de liderliği bırakmayarak ampirik uygulamanın mutlak ve analitik açıdan tartışmasız uzlaşık çözümü olduğunu kanıtlamıştır. Ancak asıl stratejik kırılma, 2. ve 5. sıralarda yaşanmıştır. Önceki iki modelde (VIKOR ve CRADIS) 4. sırada kalarak zayıf bir profil çizen A5 (Çelebi) Hava Servisi, davranışsal TODIM modelinde $Q = 0.4838$ değeriyle keskin bir sıçrama yaparak 2. sıraya yükselmiştir. Bu analitik sıçramanın matematiksel açıklaması algoritmanın asimetric ceza sisteminde gizlidir: Çelebi, rakiplerine kıyasla uç noktalarda çok büyük operasyonel kazanımlar sergilemese de, incelenen kısıtlarda kapasite planlayıcısında kabul edilemez operasyonel riskler yaratacak yapısal zaafı bulunmayan, defansif ve sistemik şoklara karşı son derece dirençli bir profile sahiptir. TODIM algoritması matematiksel olarak geride kalmayı ağır bir katsayıyla cezalandırdığı için, risk varyansı yüksek rakipler ceza alarak gerilerken, Çelebi istikrarlı topolojisiyle üst sıraya tırmanmıştır.

Bunun tam tersi asimetric durumu ise Türk Hava Yolları (A2) deneyimlemiştir. VIKOR ve CRADIS uzayında ortada (3. sırada) tutunan A2 firması, TODIM algoritmasında $Q = 0.0000$ değeriyle en son sıraya (5. sıra) düşmüştür. İşletmenin devasa küresel operasyon ağı, ikiz dönüşüm bağlamında yüksek yapısal ve ekolojik kısıt riskleri barındırmaktadır. Herhangi bir kriterdeki zayıflığın, ikili karşılaştırma matrislerinde analitik bir kayıp hanesine şiddetli bir matematiksel ceza olarak yansıdığı bu modelde, söz konusu keskin düşüş; karar

vericilerin asimetrik şok anlarındaki riskten kaçınma reflekslerini başarılı bir şekilde modellemiştir.



Şekil 7. KB-TODIM İndeks Değerlerine Göre Alternatiflerin Sıralanması

5.5.4. Bütünleşik Sonuçların Karşılaştırmalı ve Stratejik Sentezi

Ulaştırma ve lojistik işletmeleri üzerinde uygulanan bu üç aşamalı ve bütünleşik yöneylem analizi, ikiz dönüşüm stratejilerinin operasyonel ağlara yansımalarına dair kritik yönetimsel içgörüler sunmaktadır. Analitik sonuçlar bütüncül olarak incelendiğinde; fiziksel varlık optimizasyonuna dayalı stratejiler güden, ağır kapasite yatırımlarından ziyade katma değerli tedarik zinciri operasyonları yürüten Do&Co (A4) gibi aktörlerin, karbon yoğunluğu yüksek olan ağır fiziksel taşıma (A1-Reysaş) şirketlerine kıyasla dijitalleşme ve

yeşil operasyon süreçlerine çok daha çevik ve esnek bir biçimde entegre olduğu açıkça kanıtlanmıştır.

Ayrıca kurulan bu melez matematiksel model, stratejik karar vericinin operasyonel psikolojisinin ve risk toleransının sistem çıktılarına nasıl kökten değiştirebileceğini ampirik olarak ispatlamıştır. Çelebi (A5) ve THY (A2) örneğinde matematiksel olarak doğrulandığı üzere; eğer kapasite planlayıcısı uzlaşmacı ve ortalama sistem performansına odaklıysa (VIKOR/CRADIS) farklı, asimetrik şok ortamında kayıplara karşı risk toleransı düşük bir profil çiziyorsa (TODIM) tamamen farklı bir ağ tasarımı ve partner seçimi gerçekleştirecektir. Bu bağlamda, tedarik zinciri ağlarında stratejik performans ölçümü tek bir deterministik algoritmanın doğrusal kısıtlarına indirgenemez. Bütünleşik karar verme felsefesinin sunduğu bu çoklu çapraz doğrulama mekanizması, yöneylem araştırmacılarına ve operasyon yöneticilerine karar uzayındaki analitik kör noktaları ortadan kaldıran, son derece kararlı ve çok boyutlu bir karar destek sistemi sağlamaktadır.

BÖLÜM 6: SONUÇ, STRATEJİK DEĞERLENDİRME VE POLİTİKA ÖNERİLERİ

Küresel tedarik zincirleri ve ulaştırma ağları, endüstri devriminden bu yana karşılaştığı en köklü ve eşzamanlı paradigma değişiminin tam merkezinde yer almaktadır. Bir yanda otonom sistemler, endüstriyel nesnelerin interneti ve büyük veri ile şekillenen dijital dönüşüm; diğer yanda ise gezegenin ekolojik kısıtlarının ve uluslararası iklim rejimlerinin dayattığı yeşil dönüşüm gerçeği bulunmaktadır. Karar bilimlerinde ve makro politikalarda ikiz dönüşüm olarak adlandırılan bu iki ana eğilim, birbirini dışlayan değil, aksine birbirini besleyen ve zorunlu kılan bir sistemsel hayatta kalma stratejisine dönüşmüştür. Bu kitap çalışması, ulaştırma ekosistemindeki bu çok boyutlu ve asimetrik dönüşümü salt kavramsal bir tartışma olmaktan çıkarmış; yöneylem araştırmaları disiplininin en ileri analitik araçlarıyla, başka bir deyişle bütünsel ÇKKV algoritmaları ve Küresel Bulanık Kümeler topolojisiyle ölçülebilir, modellenebilir ve stratejik olarak yönetilebilir bir matematiksel zemine oturtmuştur. Bu son bölümde, araştırmanın teorik metodolojisinden ve ulaştırma kapasite sağlayıcıları üzerindeki ampirik uygulamasından elde edilen bulgular sentezlenerek; akademi, endüstri ve politika yapıcılar için geniş çaplı bir operasyonel vizyon haritası sunulmaktadır.

6.1. Analiz Bulgularının Sektörel ve Teorik Çıktıları

Bu çalışmanın karar verme bilimlerine ve operasyon yönetimi literatürüne sunduğu en temel teorik çıktı; ikiz dönüşüm çağında,

işletmelerin performansını salt deterministik finansal göstergelere, yani statik kârlılık veya pazar payı rasyolarına indirgeyen geleneksel ölçüm modellerinin kesin bir stratejik dar görüşlülük yarattığının matematiksel olarak ispatlanmasıdır. Tedarik zincirlerinin yapısal belirsizliklerin ve stokastik dalgalanmaların yüksek olduğu asimetrik ortamlarda faaliyet gösterdiği günümüzde, operasyon yöneticileri birbiriyle açıkça çelişen amaç fonksiyonlarını, örneğin operasyonel hızı maksimize ederken aynı ağ üzerindeki karbon ayak izini minimize etme hedefini eşzamanlı olarak optimize etmek zorundadır. Bu kitapta geliştirilen bütünsel algoritmik mimari, verinin kendi içindeki gizli varyansını ve korelasyonunu ortaya çıkaran objektif algoritmalar ile insan zihnindeki derin stratejik şüpheleri modelleyen sübjektif algoritmaları aynı karar uzayında eriterek literatürdeki büyük bir epistemolojik boşluğu doldurmuştur.

Teorik bulgular, başarılı bir optimizasyon modelinin sadece eldeki veriyi işleyen mekanik bir denklem olmadığını, aynı zamanda karar vericinin asimetrik risk algısını da yansıtmayı gerektiğini kanıtlamıştır. Ampirik uygulamada çalıştırılan uzlaşık sıralama algoritmalarının aynı deterministik veri seti üzerinde tamamen farklı stratejik hiyerarşiler üretmesi; yöneylem araştırmalarında tek bir mutlak optimumun olmadığını, kararlı sonuçların ancak çoklu algoritmik çapraz doğrulamalarla elde edilebileceğini göstermiştir.

Ampirik analizin sektörel çıktıları ise, geleneksel lojistik endüstrisinin kapasite planlama dogmalarını sarsacak niteliktedir. Türkiye makroekonomisine entegre lojistik işletmeleri üzerinde yapılan uygulamada; devasa fiziksel varlıklara ve ağır donanım filolarına sahip olmanın, ikiz dönüşüm sürecinde eskisi gibi bir rekabet avantajı yaratmadığı, aksine asimetrik şok anlarında şirketleri

hantallaştıran yapısal bir karbon ve atıl kapasite yüküne dönüştüğü tespit edilmiştir. Kaynak temelli strateji teorisini destekler nitelikte; fiziksel varlık esnekliği stratejisini benimseyen, ağır taşımacılıktan ziyade bilgi akışını, tedarik zinciri entegrasyonunu ve katma değerli döngüsel lojistik hizmetleri yöneten aktörlerin, hem dijital olgunluk hem de yeşil operasyonel uyum ekseninde ağır sanayi rakiplerini açık ara geride bıraktığı görülmüştür. Ayrıca, davranışsal yönelim temelli algoritmaların sonuçları, karbon ve sabit sermaye yoğun işletmelerin taşıdığı yapısal kırılganlıkları gün yüzüne çıkarmıştır. Geleceğin tedarik ağlarında statik kapasitesi büyük olan değil; dijital olarak çevik, veriyi operasyonel bir varlık olarak kullanabilen ve ekolojik şoklara karşı sistem esnekliği yüksek olan aktörler hayatta kalacaktır.

6.2. Kapasite Sağlayıcılar ve Stratejik Ekosistem Paydaşları İçin Yol Haritası

Araştırmadan elde edilen çarpıcı bulgular, lojistik şirketlerinin üst düzey operasyon yöneticileri ve bu ağlara operasyonel kaynak tahsis eden stratejik ekosistem paydaşları için acil bir zihniyet devrimini zorunlu kılmaktadır. Sektör aktörleri, çevresel ve sosyal yönetim standartlarını artık yüzeysel bir çevresel uyum faaliyeti veya katlanılması gereken bir operasyonel kısıt olarak görmekten derhal vazgeçmelidir. Yeşil ve dijital entegrasyon, işletmenin kapasite planlama stratejisinin tam merkezine yerleşmelidir. Yöneticiler, eşzamanlı stratejik yönelim sergileyerek; bir yandan bugünün geleneksel operasyonel çevrim sürelerini optimize ederken, diğer yandan yarının yıkıcı teknolojilerine, eş deyişle sürdürülebilir enerji hücrelerine, makine öğrenmesi destekli dinamik rotalama algoritmalarına ve dijital ikiz simülasyonlarına agresif bir biçimde

kaynak tahsis etmelidir. İşletmeler, doğrusal girdi-çıkı modeli terk edip, ambalajdan endüstriyel yedek parçaya kadar her ağ düğümünde tersine lojistik ve döngüsel ekonomi kanallarını kurarak hem değer zinciri kaynaklı dolaylı emisyonlarını düşürmeli hem de hammadde tedarik krizlerine karşı sistemik bağıışıklık kazanmalıdır.

Makro tedarik zinciri planlayıcıları ve küresel fon sağlayıcıları açısından ise, ulaştırma sektörüne yönelik performans değerlendirme metrikleri tamamen değişmek zorundadır. Geçmiş dönem faaliyet envanterlerine ve statik nakit döngülerine dayanan geleneksel ölçüm modelleri, uluslararası sınırda karbon düzenlemelerinin getireceği operasyonel cezaları veya olası siber güvenlik yıkımlarının sistemik etkilerini algılamakta tamamen kördür. Bu bağlamda, tedarik ağlarına kaynak tahsis eden stratejik ortaklar, bu eserde sunulan bütünleşik karar mimarisi gibi iklim ve teknoloji risklerine uyarlanmış asimetrik algoritmaları kullanmalıdır. Sisteme kaynak sağlayan uluslararası otoriteler, kapasiteyi salt geçmişteki hacimsel büyüklüklere göre değil; işletmenin kurumsal sürdürülebilirlik bildirimlerindeki şeffaflığına, algoritmik altyapı olgunluğuna ve kriz anındaki operasyonel reflekslerine göre yönlendirmelidir. İkiz dönüşümde yavaş kalan ve fiziksel emisyonlarını optimize edemeyen ulaştırma düğümleri, ekosistem tarafından dışlanarak atıl kapasite konumuna düşme riskiyle yüzleşecektir.

6.3. Politika Yapıcılar ve Sistem Düzenleyiciler İçin Öneriler

İkiz dönüşüm sürecinin ağ düzeyinde başarıya ulaşması, salt serbest piyasa dinamiklerinin veya kapasite sağlayıcıların kısa vadeli optimizasyon güdülerine bırakılamayacak kadar stratejik bir yapısal

güvenlik meselesidir. Bu noktada ulusal regülatörlere ve uluslararası tedarik zinciri otoritelerine pasif bir denetleyiciden ziyade, bir ekosistem mimarı ve teknolojik katalizör olarak hayati görevler düşmektedir. İlk olarak, uluslararası sınırda karbon düzenleme mekanizmalarının Türkiye gibi küresel değer zincirlerine entegre ülkeler üzerinde yaratacağı kapasite daralmasını ve asimetrik pazar kaybını engellemek adına, ulusal emisyon ticaret sistemleri ivedilikle kurulmalı ve küresel operasyon ağlarıyla entegre edilmelidir. Karbon kısıtlamaları uygulanırken, elde edilen operasyonel fonlar sektörün daraltılması için değil; yeşil enerji üretim tesislerinin, akıllı endüstriyel şebekelerin ve otonom şarj altyapılarının kurulmasını finanse eden teknolojik teşvik havuzları olarak kullanılmalıdır. Sistem düzenleyiciler burada ödül ve kısıt mekanizmalarını kusursuz bir yöneylem dengesiyle tasarlamalıdır.

Bununla birlikte, kitabın ana omurgasını oluşturan veriye dayalı optimizasyon modellerinin makro düzeyde sağlıklı çalışabilmesi, ağdan akan verinin kalitesine, yapısal standartlarına ve analitik şeffaflığına doğrudan bağlıdır. Politika yapıcılar, belirli bir operasyonel büyüklüğün üzerindeki kapasite sağlayıcıları için entegre sürdürülebilirlik raporlamasını isteğe bağlı bir beyan olmaktan çıkarmalıdır. Doğrudan ve dolaylı emisyon metriklerinin uluslararası standartlarda bağımsız endüstriyel denetçilerin onayına bağlandığı sıkı bir topolojik çerçeve oluşturulmalıdır. Dijital ağlarda ise; lojistik işletmelerinin dağıtık defter teknolojileri üzerinden veri paylaşımı, algoritmik rotalama yapan otonom araçların karıştığı krizlerdeki operasyonel sorumluluklar ve endüstriyel sensör ağlarına yönelik ulusal siber güvenlik protokolleri, denetimli regülasyon test

alanlarında simüle edilerek standartlaştırılmalı ve sektörün önündeki yapısal belirsizlik duvarları acilen ortadan kaldırılmalıdır.

6.4. Çalışmanın Kısıtları ve Gelecekteki Araştırma Yönleri

Her bilimsel araştırma tasarımında olduğu gibi, bu ampirik çalışmanın da analitik şeffaflık ilkesi gereği belirtilmesi gereken metodolojik kısıtları bulunmaktadır. Tasarlanan modelin en temel kısıtı, analiz edilen karar matrisinin ulusal ulaştırma ağını temsil eden beş stratejik kapasite sağlayıcısı ile sınırlandırılmış olmasıdır. Ayrıca, tedarik zincirindeki dolaylı emisyon verilerine, siber güvenlik altyapılarına ve endüstriyel olgunluk seviyelerine dair şeffaf, nicel ve standardize edilmiş veriye erişimde yaşanan zorluklar, optimizasyonun belirli aşamalarında deterministik veri kısıtları yaratmıştır. Metodolojik perspektiften değerlendirildiğinde ise; Küresel Bulanık Kümeler topolojisi insan yargısındaki asimetric kararsızlığı matematiksel uzaya yüksek doğrulukla aktarsa da, tabiatı gereği uzman panellerinin algısal değerlendirmelerine dayandığı için grup düşüncesi veya sezgisel sapma barındırma potansiyeline sahiptir.

Bu eserin kurduğu felsefi ve algoritmik altyapı, gelecekteki yöneylem araştırmacıları ve üretim yönetimi bilim insanları için oldukça geniş analitik ufuklar sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, araştırma evrenini küresel tedarik ağlarındaki uluslararası lojistik devlerini kapsayacak şekilde genişleterek; makro ölçekte kıtasal bir ikiz dönüşüm performans analizi gerçekleştirebilir. Metodolojik gelişme olarak, yapay zekâ ve derin öğrenme algoritmaları bu bütünleşik modellere entegre edilebilir. Böylece, ağırlıklandırma ve sıralama süreçleri statik geçmiş dönem tablolarıyla değil; endüstriyel

sensörlerden, hava durumu simülatörlerinden ve küresel tedarik ağı izleme sistemlerinden akan canlı verilerle beslenen dinamik ve gerçek zamanlı karar destek sistemlerine dönüştürülebilir. Ayrıca, yöneylem araştırmalarındaki en güncel topolojik gelişmeler olan ve üretim yönetiminin geleceğini şekillendiren Fermatean, Resimsel veya Nötrosofik bulanık kümeler kullanılarak, insan zihninin karmaşıklığının ve yönetici psikolojisinin çok daha mikro düzeyde modellenmesi; operasyonel sürdürülebilirlik alanında çığır açacak yeni analitik keşiflere zemin hazırlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Abdul Rauf, M. I., & Sari, I. T. P. (2024). From Emissions to Efficiency: A Narrative Review on Sustainable Transportation and Logistics. *Sinergi International Journal of Logistics*, 2(1), 62–75. <https://doi.org/10.61194/sijl.v2i1.620>
- Ağın, K. (2022). A general evaluation of logistics management in terms of organizations. *New Era Journal of Interdisciplinary Social Studies*, 6(10), 1–7. <https://doi.org/10.46291/newera.157>
- Akinbolajo, O. E. (2024). Resilience in supply chain management: lessons learned from disruptions like the COVID-19 pandemic. *International Journal of Science and Research Archive*. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.12.1.0827>
- Alsaleh, A. (2025). Electric and Autonomous Vehicles in Italian Urban Logistics: Sustainable Solutions for Last-Mile Delivery. *World Electric Vehicle Journal*, 16(7), 338. <https://doi.org/10.3390/wevj16070338>
- Alshdadi, A., Kamel, S., Alsolami, E. A., Lytras, M. D., & Boubaker, S. (2024). *An IoT Smart System for Cold Supply Chain Storage and Transportation Management*. <https://doi.org/10.48084/etasr.6857>
- Altıntaş, F. F. (2025). A Novel Approach to Objective Criterion Weighting: Extended Statistical Variance Procedure (ESVP). *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3). <https://doi.org/10.29109/gujsc.1691115>
- Anathi-Sokhetye, A., & Makalima, M. (2025). *Environmental, Social, and Governance (ESG) Metrics and Integrated Reporting in*

- Logistics: A Comprehensive Overview.*
<https://doi.org/10.20944/preprints202505.1007.v1>
- Atanassov, K. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20, 87–96
- Bahadır, O., & Türkmençalıkoğlu, H. (2021). Bilgi Kuramında Shannon Entropisi ve Uygulamaları. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32), 491-497.
- Beggiato, C. (2025). Supply chain resilience, a systematic literature review. *International Journal of Advanced Research*, 13(08), 1642–1663. <https://doi.org/10.21474/ijar01/21666>
- Bektaş, T., Ehmke, J. F., Psaraftis, H. N., & Puchinger, J. (2019). The role of operational research in green freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 274(3), 807-823.
- Bellamy, M. A., & Basole, R. C. (2012). Network Analysis of Supply Chain Systems: A Systematic Review and Future Research. *Social Science Research Network*.
https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2118800
- Ben Youssef, A. (2025). *Twin Transition: Digital Transformation Pathways for Sustainable Innovation.*
<https://doi.org/10.20944/preprints202506.0739.v1>
- Bielecki, M., Galińska, B., & Tokarski, D. (2024). Determinants and trends of logistics paradigms in industrial revolutions. *Ekonomia i Środowisko*. <https://doi.org/10.34659/eis.2024.90.3.780>
- Boonsothonsatit, K., Kara, S., Kayis, B., & Ibbotson, S. (2013). Weighted additive fuzzy goal programming-based decision support system for green supply network design. *Industrial Engineering*

- and Engineering Management*, 882–886.
<https://doi.org/10.1109/IEEM.2013.6962538>
- Borgi, T., Zoghلامي, N., Abed, M., & Naceur, M. S. (2017). *Big Data for Operational Efficiency of Transport and Logistics: A Review*. 113–120. <https://doi.org/10.1109/ICADLT.2017.8547029>
- Borouhshaki, S. (2017). Entropy-Based Weights for MultiCriteria Spatial Decision-Making. *Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers*, 79(1), 168–187.
<https://doi.org/10.1353/PCG.2017.0009>
- Bukowska-Piesztrzyńska, A., Golec, P., & Motowidlak, U. (2024). *How supply chain disruptions affect the way companies function – a case study on the example of the tfl entity geis global logistics*.
<https://doi.org/10.34739/zn.2023.61.14>
- Can Sağlam, Y. (2023). Dijital Dönüşüm Çağında Akıllı Lojistik Yönetimi: Sistematiik Literatür İncelemesi. *Journal of the Human and Social Science Researches (Itobiad)*.
<https://doi.org/10.15869/itobiad.1283253>
- Cebir, Y., & Akkartal, E. (2024). Digital twin in logistics and supply chain management. In *Strategic Innovations for Dynamic Supply Chains* (pp. 170-192). IGI Global Scientific Publishing.
- Chaudhary, K. P. (2025). Impact of Electric Vehicles (EV) in Logistics Operations in Establishing Green Supply Chain. *Indian Scientific Journal Of Research In Engineering And Management*, 09(05), 1–9. <https://doi.org/10.55041/ijrsrem48824>
- Chaudhari, N., Kalekar, V., Rane, N., & More, P. (2025). Advancing Logistics and Supply Chain Efficiency Through Artificial Intelligence and Machine Learning. *International Journal of Latest*

- Technology in Engineering Management & Applied Science*, 14(7), 607–610. <https://doi.org/10.51583/ijltemas.2025.1407000071>
- Cheaitou, A., & Cariou, P. (2019). Greening of maritime transportation: a multi-objective optimization approach. *Annals of Operations Research*, 273(1), 501-525.
- Cho, H., & Lee, J. S. (2020). Does transportation size matter for competitiveness in the logistics industry? The cases of maritime and air transportation. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 36(4), 214–223. <https://doi.org/10.1016/J.AJSL.2020.04.002>
- Cobos Gómez, J. M. (2024). El paquete «Objetivo 55»: la fiscalidad y su base legal en el derecho de la Unión Europea. *Contabilidad y Tributación, CEF/Contabilidad y Tributación, CEF*. <https://doi.org/10.51302/rcyt.2024.24091>
- Coto-Millán, P., Paz Saavedra, D., de la Fuente, M., & Fernández, X. L. (2024). Integrating Logistics into Global Production: A New Approach. *Logistics*, 8(4), 99. <https://doi.org/10.3390/logistics8040099>
- Çakır, S., & Perçin, S. (2013). Çok Kriterli Karar Verme Teknikleriyle Lojistik Firmalarında Performans Ölçümü. *Ege Academic Review*, 13(4), 449–460. <https://doi.org/10.21121/EAB.2013418079>
- Di Vaio, A., Van Engelenhoven, E., Raimo, N., & Garofalo, A. (2025). Strategic Carbon Disclosure and Accountable Efficiency: Reporting Shipping Industry Scope 3 Emissions. *Business Strategy and The Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.70210>

- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. *Computers & operations research*, 22(7), 763-770.
- Dickason, X. (2023). Decarbonising transport in the european union. *Australian and New Zealand Journal of European Studies*, 15(1), 102-108. <https://doi.org/10.30722/anzjes.vol15.iss1.17371>
- Duttayal, S. (2025). Machine Learning-Based Supply Chain Technologies in the Tech Industry. *European Modern Studies Journal*, 9(4), 1059–1078. [https://doi.org/10.59573/emsj.9\(4\).2025.99](https://doi.org/10.59573/emsj.9(4).2025.99)
- Dukkanci, O., Bektaş, T., & Kara, B. Y. (2019). *The green network design problem* (pp. 169–206). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814242-4.00007-7>
- Dzreke, S. S., & Dzreke, S. E. (2025). *Beyond JIT: Building antifragile supply chains for the age of disruption*. 2(1), 67–89. <https://doi.org/10.71350/30624533109>
- Ebrahimi, S., Chen, J., Bridgelall, R., Szmerekovsky, J., & Motwani, J. (2025). Unlocking the Commercialization of SAF Through Integration of Industry 4.0: A Technological Perspective. *Sustainability*, 17(16), 7325. <https://doi.org/10.3390/su17167325>
- Emon, M. M. H., & Chowdhury, Most. S. A. (2025). *AI and IoT-Powered Smart Logistics*. 45–72. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-2434-0.ch002>
- Epstein, A.-S. (2025). EU Environmental Law in the Digital Age: A Critical Outlook on the Twin Transition's Legal Structure.

- European Journal of Risk Regulation*, 1–17.
<https://doi.org/10.1017/err.2025.10029>
- Erbey, A., Fidan, Ü., & Gündüz, C. (2025). A Robust Hybrid Weighting Scheme Based on IQRBOW and Entropy for MCDM: Stability and Advantage Criteria in the VIKOR Framework. *Entropy*, 27(8), 867. <https://doi.org/10.3390/e27080867>
- Ersoy, N. (2022). Kriter ağırlıklandırma yöntemlerinin ÇKKV sonuçları üzerindeki etkisine yönelik gerçek bir hayat uygulaması. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 11(4), 1449-1463.
- Fares, N., Cherrafi, A., Shardeo, V., & Garza-Reyes, J. A. (2025). Supply chain management in the Industry 5.0 era: strategic implications. *Benchmarking*, 1–29. <https://doi.org/10.1108/bij-12-2024-1136>
- Fegde, N. (2025). Challenges and Solutions in Managing Last-Mile Delivery in Urban Areas. *Indian Scientific Journal Of Research In Engineering And Management*, 09(01), 1–9. <https://doi.org/10.55041/ijsrem40615>
- Gamberini, L., & Pluchino, P. (2024). Industry 5.0: A comprehensive insight into the future of work, social sustainability, sustainable development, and career. *Australian Journal of Career Development*, 33(1), 5–14. <https://doi.org/10.1177/10384162241231118>
- Gill, S., Lam, R. Q., Cheong, D. Y., Tapiwanashe, M. N., Kaseke, T. S., Pan, S.-Y., Yang, E. C. Y., Marimuthu, S., & Vincent, J. (2025). Reducing Carbon Emission Towards Sustainable Aviation. *Journal*

- of Engineering Technology and Applied Physics*, 7(2), 81–87.
<https://doi.org/10.33093/jetap.2025.7.2.10>
- Golpîra, H. (2016). A robust bi-objective uncertain green supply chain network management. *Serbian Journal of Management*, 11(2), 211–222. <https://doi.org/10.5937/SJM11-10705>
- Gomes, L. F. A. M., & Lima, M. M. P. P. (1991). TODIMI: Basics and application to multicriteria ranking. *Found. Comput. Decis. Sci*, 16(3-4), 1-16.
- Guersola, M., Pinheiro de Lima, E., & Arns Steiner, M. T. (2018). Supply chain performance measurement: a systematic literature review. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 31(1), 109–131.
<https://doi.org/10.1504/IJLSM.2018.10015227>
- Gupta, G., & Gupta, M. (2025). Balancing Supply Chain Costs with Best Practices for Informed Decision-Making. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 6(4), 1420–1425. <https://doi.org/10.54660/ijmrge.2025.6.4.1420-1425>
- Haddar, H., & Bouaziz, F. (2025). *Blockchain Technology and Supply Chain Resilience*. 29–58. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-0649-0.ch002>
- Ivanov, D. A. (2024). Transformation of supply chain resilience research through the COVID-19 pandemic. *International Journal of Production Research*.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2334420>
- Kaur, T., Jasmine, & Sood, S. K. (2025). From Industry 4.0 to Industry 5.0: Redefining Technology with Human-Centricity and

- Sustainability. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 7(2). <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i02.42420>
- Kedla, S., Meghana, D. B., & Deepashree, A. J. (2025). Changing the Landscape of Logistic Sector: Way Towards Green Logistics in Circular Economy. *European Journal of Management, Economics and Business.*, 2(2), 55–60. [https://doi.org/10.59324/ejmeb.2025.2\(2\).06](https://doi.org/10.59324/ejmeb.2025.2(2).06)
- Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2021). Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (MEREC). *Symmetry*, 13(4), 525.
- Kherbash, O., & Mocan, M. (2015). A Review of Logistics and Transport Sector as a Factor of Globalization. *Procedia. Economics and Finance*, 27, 42–47. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00969-7](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00969-7)
- Knapp, F., Kessler, M., & Arlinghaus, J. C. (2021). The influence of cognitive biases in production logistics. In *Dynamics in Logistics: Twenty-Five Years of Interdisciplinary Logistics Research in Bremen, Germany* (pp. 183-193). Cham: Springer International Publishing.
- Koç, Ç., & Özceylan, E. (2018). Yeşil ve Elektrikli Araç Rotalama Problemleri Üzerine bir Literatür Taraması ve Araştırma Öngörülleri. *Gaziantep University Journal of Social Sciences*, 17(3), 1041–1053. <https://doi.org/10.21547/JSS.404377>
- Kuo, K.-C., Yu, H.-Y., Lu, W.-M., & Le, T.-T. (2022). Sustainability and Corporate Performance: Moderating Role of Environmental,

- Social, and Governance Investments in the Transportation Sector. *Sustainability*, 14(7), 4095. <https://doi.org/10.3390/su14074095>
- Kutlu Gündoğdu, F., & Kahraman, C. (2019, July). Spherical fuzzy sets and decision making applications. In *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems* (pp. 979-987). Cham: Springer International Publishing.
- Lawrence, A. (2025). *Balancing Cost and Resilience in Supply Chain Network Design*. https://doi.org/10.31219/osf.io/wuk6m_v1
- Leicht, J. B., & Leicht, M. (2024). Climate change and transportation companies: A bibliometric and systematic literature review. *Transportation Research Part F-Traffic Psychology and Behaviour*. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2024.01.001>
- Ma, W., Ma, D., Ma, Y., Zhang, J., & Wang, D. (2021). Green maritime: A routing and speed multi-objective optimization strategy. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127179.
- Mahallati Rayeni, M., & Hosseinzadeh Saljooghi, F. (2013). Evaluating performance of supply chain based on network data envelopment analysis. *Management Science Letters*, 3(1), 227–236. <https://doi.org/10.5267/J.MSL.2012.11.004>
- Maheshwari, G. J., Gogi, V. S., Aradhya, I. N., & Shankaramma. (2024). *Digitalization of Lean Tools and Techniques: Enhancing Efficiency and Quality in Modern Industries*. 1–6. <https://doi.org/10.1109/csitss64042.2024.10817042>
- Mannava, V., & Velautham, L. (2023). *Decarbonizing aviation: The roles of sustainable aviation fuels and hydrogen fuel*. 4, 137–144. <https://doi.org/10.38105/spr.4z2j4tru9a>

- Marchenko, O., Guk, O., Borutska, Yu., Pacheva, N. O., & Zaichenko, V. (2023). Ensuring Sustainable Development of the Enterprise During the Transition to Industry 5.0. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 18(4), 1149–1154. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.180418>
- Marinelli, M., Janardhanan, M. N., & Koumi, N. (2021). *An Explorative Analysis of IoT Applications in Cold Chain Logistics* (pp. 1–8). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4320-7_1
- Memedovic, O., Ojala, L., Rodrigue, J.-P., & Naula, T. (2008). Fuelling the global value chains: what role for logistics capabilities? *International Journal of Technological Learning, Innovation and Development*, 1(3), 353–374. <https://doi.org/10.1504/IJTLID.2008.019978>
- Menezes, B. C., Yaqot, M., Hassaan, S., Franzoi, R. E., AlQashouti, N., & Al-Banna, A. (2022). *Digital Transformation in the Era of Industry 4.0 and Society 5.0: A perspective*. 1–6. <https://doi.org/10.1109/eSmarTA56775.2022.9935399>
- Miah, S. J. (2014). *A Cloud-based Business Analytics for Supply Chain Decision Support*. 4(1), 274–280. <https://scitecresearch.com/journals/index.php/jisct/article/view/203/144>
- Miman, M., & Pohl, E. A. (2012). Multi-objective optimisation of a contingency logistics network through physical programming. *International Journal of Collaborative Enterprise*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.1504/IJCEN.2012.052383>

- Mubarak, A. Z., Mawengkang, H., & Suwilo, S. (2024). Enhancing vehicle routing efficiency through branch and bound and heuristic methods. *Sinkron: jurnal dan penelitian teknik informatika*, 8(3), 1463-1472.
- Muchenje, K. C. (2024). Green Logistics and Supply Chain Management. *Advances in Civil and Industrial Engineering Book Series*, 33–61. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-3755-4.ch002>
- Nagao, T., Ijuin, H., Nagasawa, K., & Yamada, T. (2022, October). Modeling Carbon Border Tax for Material-Based GHG Emission and Costs in Global Supply Chain Network. In *Global Conference on Sustainable Manufacturing* (pp. 328-336). Cham: Springer International Publishing.
- Olaleye, I. A., Mokogwu, C., Olufemi-Phillips, A. Q., & Adewale, T. T. (2024). Innovative frameworks for sustainable transportation coordination to reduce carbon footprints in logistics. *International Journal of Science and Technology Research Archive*, 7(2), 068–075. <https://doi.org/10.53771/ijstra.2024.7.2.0068>
- Opricović, S. (1998). *Višekriterijumska optimizacija sistema u građevinarstvu*. Građevinski fakultet Univerziteta.
- Ostrowski, K., Starzec, M., & Starzec, G. (2024). The Ant Colony Optimization Algorithm Applied in Transport Logistics. *Computer Science*, 25(3). <https://doi.org/10.7494/csci.2024.25.3.6360>
- Oubrahim, I., Sefiani, N., & Happonen, A. (2022). Supply chain performance evaluation models: a literature review. *Acta Logistica*, 9(2), 207–221. <https://doi.org/10.22306/al.v9i2.298>
- Patibandla, K. R. (2024). *Predictive Maintenance in Aviation using Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.60087/jaigs.v4i1.214>

- Rana, A. I. (2023). An Analysis of Warehouse Management Systems. *International Journal For Science Technology And Engineering*, 11(6), 1154–1157. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.53808>
- Rane, N., Desai, P., Kaya, Ö., & Paramesha, M. (2024). *Artificial intelligence, machine learning, and deep learning for sustainable and resilient supply chain and logistics management*. https://doi.org/10.70593/978-81-981367-4-9_5
- Rao, P. J. M. (2025). Blockchain-enabled supply chain: Transparent product journey from source to consumer. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 15(1), 2247–2256. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2025.15.1.0444>
- Ravikumar, N. (2025). Cloud Analytics: Transforming Supply Chain Management through Data-Driven Insights. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i58s.12668>
- Phukan, R., & Kumar, M. (2025). *Supply chain resilience: strategies for mitigating disruption in a global world*. 4(3), 287–294. <https://doi.org/10.64751/ijdim.2025.v4.n3.pp287-294>
- Rosário, A. T., & Raimundo, R. (2025). *AI, Optimization, and Human Values: Mapping the Intellectual Landscape of Industry 4.0 to 5.0*. <https://doi.org/10.20944/preprints202505.1954.v1>
- Psaraftis, H. N. (2019). Speed optimization versus speed reduction: Are speed limits better than a bunker levy? HN Psaraftis. *Maritime Economics & Logistics*, 21(4), 524-542.
- Puška, A., Stević, Ž., & Pamučar, D. (2022). Evaluation and selection of healthcare waste incinerators using extended sustainability

- criteria and multi-criteria analysis methods. *Environment, Development and Sustainability*, 24(9), 11195-11225.
- Shannon, C. E. (1951). Prediction and entropy of printed English. *Bell system technical journal*, 30(1), 50-64.
- Sharma, P. (2025). *Smart Logistics for a Sustainable Supply Chain Future*. 133–158. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-2434-0.ch005>
- Seroka-Stolka, O., & Ociepa-Kubicka, A. (2019). Green logistics and circular economy. *Transportation Research Procedia*, 39, 471–479. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2019.06.049>
- Setyadi, A., Pawirosumarto, S., & Damaris, A. (2025). *Toward a Resilient and Sustainable Supply Chain: Operational Responses to Global Disruptions in the Post-COVID Era*. <https://doi.org/10.20944/preprints202506.0636.v1>
- Shenisetty, N. (2025). Transforming Logistics Operations Through Cloud-Based Systems Integration. *European Journal of Computer Science and Information Technology*, 13(38), 33–46. <https://doi.org/10.37745/ejcsit.2013/vol13n383346>
- Song, M., Zhao, Q., & Song, Z. (2016). Logistics capabilities of cement transport firm: Towards an understanding of capabilities portfolio. *International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences*, 2016, 1–5. <https://doi.org/10.1109/LISS.2016.7854355>
- Sukhov, P. I., & Zverkova, V. M. (2023). Assessment of Sustainable Development Aspects in Transport Companies Activities. *World of Transport and Transportation*, 21(1), 49-54.

- Thekdi, S., & Santos, J. R. (2019). Decision-Making Analytics Using Plural Resilience Parameters for Adaptive Management of Complex Systems. *Risk Analysis*, 39(4), 871–889. <https://doi.org/10.1111/RISA.13209>
- UNCTAD, (2023). Twin Transition for Global Value Chains: Green and Digital. *Policy Brief*. <https://doi.org/10.18356/27082822-111>
- Vagapov, S. N., & Репникова, В. М. (2025). Using big data to optimize logistic operations. *Ėkonomika i Upravlenie: Problemy, Rešeniâ*, 3/13(156), 228–239. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.03.13.026>
- Wang, C. (2025). Digital Transformation, Green Innovation and Enterprise Performance. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, 208(1), 52–59. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2025.gl26182>
- Wen, X. (2024). The digital transformation, funding constraints, and the green innovation of transportation companies. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1332051>
- Wiśniewski, G. (2022). The Innovative Activities Improving Competitiveness of Transport Companies. *Logistics and Transport*, 53(1-2), 61-78.
- Xu, L. (Gloria). (2023). Is the EUs Carbon Border Adjustment Mechanism Proposal in Accordance with WTO Regulations? *Lecture Notes in Education Psychology and Public Media*. <https://doi.org/10.54254/2753-7048/23/20230526>

- Yager, R. R. (2013). Pythagorean membership grades in multicriteria decision making. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 22(4), 958-965.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Zhikharevich, V., Matsiuk, N. A., & Ostapov, S. E. (2016). Solving the routing problem by ant colony optimization algorithms. *International Journal of Computing*, 15(2), 84–91. <https://doi.org/10.47839/IJC.15.2.841>
- Zisi, V., Psaraftis, H. N., & Zis, T. (2021). The impact of the 2020 global sulfur cap on maritime CO2 emissions. *Maritime Business Review*, 6(4), 339-357.
- Zou, H., Lü, Y., Zhang, T., Yu, C., & Huang, J. (2025). Deep reinforcement learning-based optimisation of reverse logistics transport in closed-loop supply chain. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1–18. <https://doi.org/10.1680/jtran.24.00163>