

Araştırma Makalesi

Yapay Zeka Destekli Sürdürülebilir Reshoring Kararları: Endüstri 5.0 Tabanlı Bir Çerçeve

Artificial Intelligence Enabled Reshoring Decisions: An Industry 5.0 Based Framework

Muhammet Mustafa AKKAN

Dr. Öğr. Üyesi, KTO Karatay Üniversitesi

Ticaret ve Sanayi Meslek Yüksekokulu

muhammet.mustafa.akkan@karatay.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0001-9409-7525>

Makale Geliş Tarihi	Makale Kabul Tarihi
09.07.2025	02.03.2026

Öz

Küresel tedarik zincirlerindeki artan belirsizlikler, reshoring (üretim faaliyetlerinin menşei ülkeye geri taşınması) operasyonlarını stratejik bir zorunluluk haline getirmiştir. Bu çalışmanın amacı, Endüstri 5.0 prensipleri doğrultusunda, reshoring kararlarının maliyet, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik ekseninde optimize edilmesini sağlayan yapay zeka tabanlı bütünsel bir karar destek modeli sunmaktır. Araştırmanın metodolojisi, sistematik literatür sentezi yoluyla belirlenen stratejik parametrelerin, beş aşamalı hibrit bir analitik süreçte işlenmesine dayanmaktadır. Bu çerçevede, operasyonel durum tespiti için SVM ve LSTM algoritmaları, gelecek dönem talep tahmini için ARIMAX, belirsizlik altındaki risk analizi için Monte Carlo Simülasyonu ve operasyonel iş akışı optimizasyonu için DES teknikleri entegre edilmiştir. Stratejik risk puanlaması ise RF algoritması ile gerçekleştirilerek modelin karar mekanizması oluşturulmuştur. Endüstri 5.0'in siber-fiziksel ve insan merkezli paradigmasını yansıtan model hem performans optimizasyonuna hem de sürdürülebilirlik uyumuna katkıda bulunmaktadır. Genel olarak, bu araştırma, reshoring süreçlerinin modellenmesine metodolojik bir katkı sunmakta ve hem akademik sorgulama hem de endüstriyel dağıtım için eyleme geçirilebilir içgörüler sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Tedarik zinciri, optimizasyon, sürdürülebilirlik, endüstri 5.0, yapay zeka

Abstract

Increasing uncertainties in global supply chains have made reshoring (the relocation of production activities back to the country of origin) operations a strategic necessity. The aim of this study is to present an AI-based integrated decision support model that optimizes reshoring decisions in terms of cost, resilience, and sustainability in line with Industry 5.0 principles. The methodology of the research is based on processing the strategic parameters identified through systematic literature synthesis in a five-stage hybrid analytical process. Within this framework, SVM and LSTM algorithms have been integrated for operational status detection, ARIMAX for forecasting future demand, Monte Carlo Simulation for risk analysis under uncertainty, and DES techniques for operational workflow optimization. Strategic risk scoring is performed using the RF algorithm, thereby establishing the model's decision-making mechanism. The model, reflecting the cyber-physical and human-centered paradigms of Industry 5.0, contributes to both performance optimization and sustainability compliance. Overall, this research contributes methodologically to the modeling of reshoring processes and provides actionable insights for both

Önerilen Atıf /Suggested Citation

Akkan, M.M., 2026, Yapay Zeka Destekli Sürdürülebilir Reshoring Kararları: Endüstri 5.0 Tabanlı Bir Çerçeve, Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi, 61(1), 862-885.

academic inquiry and industrial implementation.

Keywords: Supply chain, optimization, sustainability, industry 5.0, artificial intelligence

1. Giriş

Küresel tedarik zincirleri son zamanlarda çeşitli ekonomik, politik ve sosyal dalgalanmalara maruz kalarak önemli bir dönüşüm sürecinden geçmiştir (Giammetti vd., 2021). Özellikle Kovid-19 salgını ile yaşanan tedarik zinciri aksaklıkları ve jeopolitik gerilimler, şirketleri daha dayanıklı ve esnek yapılar oluşturmaya zorlamıştır (Lee vd., 2022). Bu bağlamda, daha önce kıyı ötesi lokasyonlarda gerçekleştirilen üretim faaliyetlerinin ana ülkelere veya yakın coğrafyalara taşınması anlamına gelen reshoring, şirketler için stratejik bir tercih haline gelmiştir (Tsai & Urmetzer, 2023).

Reshoring süreçlerinde karşılaşılan başlıca zorluklar yüksek maliyetler, düşük esneklik, tedarik zinciri kesintileri ve uzun teslimat süreleri olarak sıralanabilir (Longauer, Hauck & Vasvari, 2023; Charpin, 2021). Endüstri 5.0, bu sorunların üstesinden gelmek için çeşitli yenilikçi yaklaşımlar sunmaktadır. Endüstri 4.0'ın sağladığı dijitalleşme ve otomasyonun ötesine geçen bu yeni paradigma, insan faktörünü merkeze alan bir yapı olarak tanımlanmaktadır (Akundi vd., 2022; Zhen & Yao, 2024). Bu doğrultuda Endüstri 5.0, insan yaratıcılığını ve problem çözme yeteneklerini ileri teknolojilerle birleştirerek tedarik zinciri esnekliğini ve sürdürülebilirliğini artırmayı amaçlamaktadır (Kabir, Khan & Kabir, 2024). Nitekim literatürdeki güncel çalışmalar, Endüstri 5.0'ın getirdiği ileri teknolojilerin tedarik zinciri yönetiminde ortaya koyduğu potansiyeli vurgulamaktadır (Ivanov, 2023; Xu vd., 2021).

Dijital ikiz teknolojileri, üretimin her aşamasının takibini sağlamakta ve bu nedenle erken aşamadaki sorunların belirlenmesine yardımcı olabilmektedir (Marrone vd., 2023; Sawik, 2023). Blok zincir teknolojisi aynı anda tedarik zinciri şeffaflığını ve izlenebilirliğini geliştirirken, nesnelerin interneti (IoT) ile yönetilen cihazlar sürekli veri toplamaya yardımcı olarak operasyonel verimliliği artırmaktadır (Li, 2020; Ali vd., 2022). Bu gelişmeler, işletmelerin rekabet avantajı ile daha verimli bir reshoring planı uygulamalarını da sağlayacaktır.

Bu çalışmanın temel amacı, Endüstri 5.0 ilkelerini entegre eden ve tedarik zincirlerinde reshoring stratejilerinin etkin bir şekilde uygulanmasını sağlayan yenilikçi bir model önermektir. Araştırma kapsamında Web of Science veri tabanında yapılan literatür taraması sonucunda, reshoring ve Endüstri 5.0 kavramlarını ayrı ayrı veya dolaylı ilişkilerle ele alan çalışmalar bulunmakla birlikte, bu iki kavramı bütünsel bir optimizasyon modeli çerçevesinde doğrudan inceleyen çalışmanın bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu çerçevede, “tedarik zincirlerinde reshoring optimizasyonu” ve “tedarik zincirlerinde endüstri 5.0 optimizasyonu” olguları ayrı ayrı incelenerek analiz edilmiş ve bu bilgilere dayalı olarak teorik bir çerçeve oluşturulmuştur. Devamında, önerilen modelin ana yapı taşları tanımlanmış ve modelin uygulama adımları açıklanmıştır. Bu yöntem, tüm tedarik zinciri ağıının verimliliğini artırarak şirketleri daha rekabetçi hale getirmek için önemli fırsatlar sunmaktadır. Dolayısıyla bu bağlamda araştırma, tedarik zincirlerinde reshoring olgusu ve Endüstri 5.0 optimizasyonunun birlikte incelenmesi açısından önemli ve dikkate değer bir çalışmadır.

Makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi düzenlenmiştir: İkinci bölümde, mevcut literatür ayrıntılı olarak gözden geçirilmekte ve önemli alanlar vurgulanmaktadır. Devamında ise reshoring ile Endüstri 5.0 olgusu ve tedarik zinciri arasındaki ilişki ifade edilmektedir. Üçüncü bölümde, araştırmanın metodolojisi açıklanmakta ve kavramsal çerçeve detaylandırılmaktadır. Modelin geliştirilme süreci tüm detaylarıyla ele alınmakta ve önerilen yapay zeka (YZ) odaklı modelin gereksinimleri sunulmaktadır. Dördüncü bölümde, önerilen model örnek bir uygulama üzerinden incelenmektedir. Son bölüm ise modelin genel sonuçlarını, katkılarını, sınırlamalarını ve gelecekteki araştırma yönlerini içermektedir.

2. Teorik Arka Plan

Bu bölüm, çalışmanın temelini oluşturan reshoring stratejileri, Endüstri 5.0 paradigması ve bu süreçlerde YZ tabanlı optimizasyon yaklaşımlarını kapsamlı bir şekilde incelemektedir.

2.1. Tedarik Zincirlerinde Reshoring Stratejileri ve Motivasyonları

Küresel tedarik zincirlerindeki artan belirsizlik ve karmaşıklık, üretim faaliyetlerinin yeniden yapılandırılmasını ve reshoring operasyonlarını stratejik bir zorunluluk haline getirmiştir. Literatür incelendiğinde, bu kararların maliyet, risk, strateji ve politika ekseninde şekillendiği görülmektedir.

Gray vd. (2017), ABD’li KOBİ’lerin üretimlerini geri taşıma nedenlerini analiz etmiş; kararın yüksek navlun maliyetleri, kalite sorunları ve esneklik ihtiyacının bir bileşimi olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde Longauer, Hauck ve Vasvari (2023), çok aşamalı üretim süreçlerinde öğrenme etkisinin reshoring üzerindeki rolünü incelemiş ve özellikle aşamalar arası verimlilik arttığında reshoring’in etkin olduğunu göstermiştir. Yu ve Kim (2018) ise moda sektörü üzerine yaptıkları çalışmada, talep belirsizliğinin yüksek olduğu durumlarda reshoring stratejisinin finansal performansı iyileştirdiğini kanıtlamıştır.

Kovid-19 sonrası dönem ve jeopolitik riskler literatürde geniş yer bulmaktadır. Lee ve Song (2023), Kuşak ve Yol Girişimi bağlamında tedarik zinciri lojistiğini inceleyerek liman verimliliği ve yeşil ulaşım koridorlarının önemine dikkat çekmiştir. Gür ve Dilek (2023) Çin’in stratejik yükselişine odaklanırken, Freund vd. (2024) ABD ticaret politikalarının ve tarifelerin ithalat rotalarını nasıl değiştirdiğini, ancak henüz tam anlamıyla bir reshoring kanıtı sunmadığını belirtmiştir. Charpin (2021), politik risklerin yönetim stratejilerini, Giammetti vd. (2021) ise Avrupa’daki düzenlemelerin ekonomik etkilerini girdi-çıkı modelleriyle analiz etmiştir.

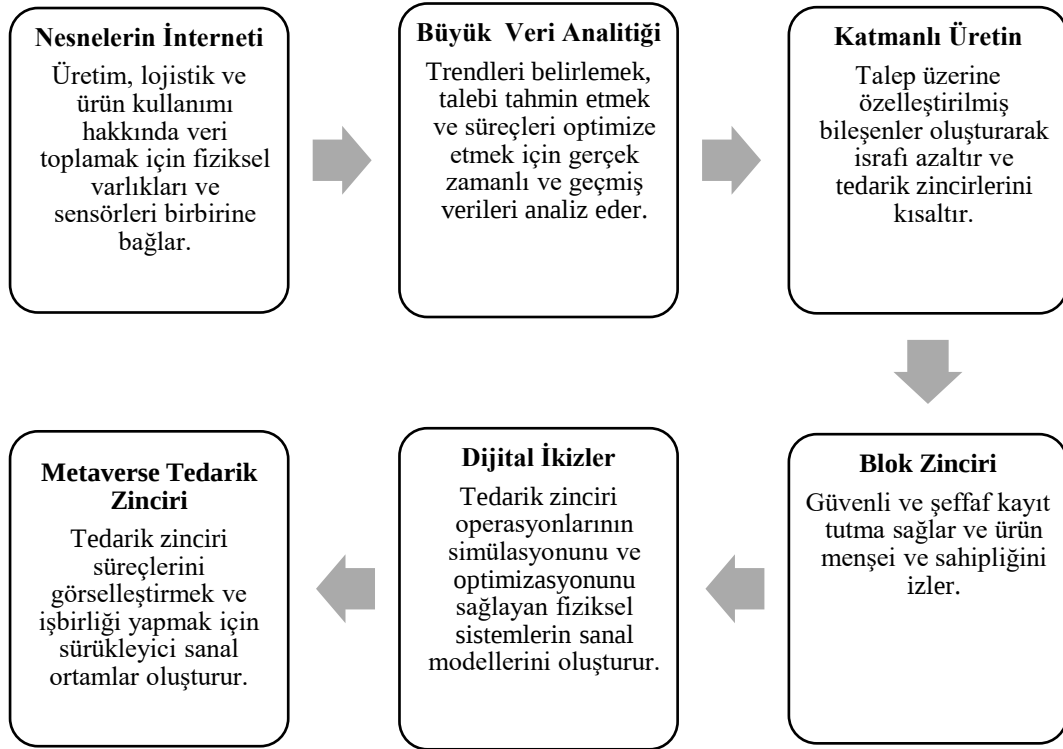
Öte yandan, reshoring kararları sektörel bazda farklılık göstermektedir. Lampon ve Rivo-Lopez (2021), düşük teknoloji sektörlerinin maliyet odaklı, yüksek teknoloji sektörlerinin ise inovasyon odaklı hareket ettiğini tespit etmiştir. Bettiol vd. (2023), İtalyan firmalarının stratejik alternatiflerini inceleyerek ürün inovasyonunun önemini vurgulamıştır. Sektörel bazda; Marrone vd. (2023) ilaç tedarik zincirlerinin millileştirilmesinin riskleri azalttığını, Park vd. (2021) tarım ve gıda sektöründeki inovasyon eğilimlerini, Ali vd. (2022) ise mineral tedarik anlaşmalarının karbon ayak izini düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Literatürde karar süreçlerini sistematize eden çalışmalar da mevcuttur. Tsai ve Urmetzer (2023), reshoring için üç aşamalı bir karar çerçevesi sunarken, Sawik (2023; 2025) geliştirdiği stokastik optimizasyon modelleri ile tedarik zinciri kesintileri altında reshoring kararlarının maliyet ve esneklik üzerindeki etkilerini senaryo bazlı olarak analiz etmiştir.

2.2. Endüstri 5.0 ve Tedarik Zinciri Teknolojileri

Endüstri 5.0, teknolojik yenilikleri insan odaklılık, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık ilkeleriyle birleştiren yeni bir sanayi paradigmasıdır (Akundi vd., 2022). Hussien vd. (2023)’ün belirttiği gibi, bu yaklaşım döngüsel ekonomi ilkeleriyle kaynak kullanımını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Endüstri 5.0 teknolojilerinin tedarik zinciri yönetimine katkıları literatürde çeşitli açılardan ele alınmıştır.

Kabir, Khan ve Kabir (2024), tedarik zinciri yeteneklerinin hiyerarşik yapısını Delphi yöntemiyle modellemiş, Dossou, Mozos ve Pawlewski (2024) ise sürdürülebilirlik, dijitalleşme ve optimizasyon ekseninde bir performans değerlendirme aracı geliştirmiştir. Zhen ve Yao (2024), dijital ikiz ve blok zinciri teknolojilerinin entegrasyonunun şeffaflık ve operasyonel verimlilik sağladığını ortaya koymuştur. Chidozie vd. (2024) ve Fernandez-Miguel vd. (2024), metaverse ve dijital ikizlerin süreçleri görselleştirmede ve işbirliğini artırmadaki rolüne dikkat çekmiştir. Kertens vd. (2024), IoT hizmet sağlayıcılarının performansını değerlendirirken, Andres vd. (2024) Lojistik 5.0 teknolojilerinin pratik avantajlarını analiz etmiştir. Li (2020), ABD-Meksika sınırında yerel üretimi geliştirmek için teknolojik adaptasyonun önemini vurgulamıştır. Son olarak, sürdürülebilirlik ve tersine lojistik ekseninde yapılan çalışmalar da literatürde ön plana çıkmaktadır. Dabo ve Hosseinian-Far (2023), döngüsel ekonomiye geçişte tersine lojistik operasyonlarını optimize etmek için karar ağacı yaklaşımlarını kullanmıştır. Benzer şekilde Yu ve Sun (2024) çok amaçlı modellerle sürdürülebilir tersine lojistik ağları tasarlamış; Iakovou vd. (2024) güneş enerjisi geri dönüşümü, Nicoletti ve Apolloni (2024) ise yeşil lojistik üzerine odaklanmıştır.



Şekil 1. Endüstri 5.0'ın Bileşenleri

Kaynak: Fernandez-Miguel vd. (2024)

Şekil 1’de görselleştirilen bu bileşenler, Endüstri 5.0’ın sadece izole teknolojilerden ibaret olmadığını, aksine insan-makine işbirliğini merkeze alan bütünleşik bir ekosistem sunduğunu göstermektedir. Fernandez-Miguel vd. (2024) tarafından ortaya konan bu çerçeve, dijital ikizler ve metaverse gibi sanal ortamların fiziksel üretim süreçleriyle nasıl iç içe geçtiğini somutlaştırmaktadır. Bu teknolojik altyapı, tedarik zinciri yöneticilerine reshoring gibi karmaşık kararları alırken ihtiyaç duydukları şeffaflığı ve veri gücünü sağlamaktadır. Dolayısıyla, bu bileşenlerin etkin kullanımı, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde tartışılacak olan optimizasyon modelinin de temel girdilerini oluşturmaktadır.

2.3. Reshoring Kararlarında YZ Tabanlı Optimizasyonun Rolü

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Endüstri 5.0 ve reshoring kavramlarının genellikle ayrı ayrı ele alındığı, YZ tabanlı bütünleşik yaklaşımların ise sınırlı olduğu görülmektedir. Oysa YZ, karmaşık tedarik zinciri problemlerinin çözümünde kritik bir rol oynamaktadır.

Mevcut çalışmalarda YZ, tahminleme ve süreç iyileştirme alanlarında yoğunlaşmıştır. Sharma vd. (2024), durum-eylem değerlerini tahmin etmek için Derin Öğrenme ve çok kriterli karar verme (AHP, Electre) yöntemlerini entegre etmiştir. Leng vd. (2024), arıza teşhisi alanında makine öğrenimi ve Rastgele Orman (RF) algoritmasının başarısını kanıtlamıştır. Ahmed vd. (2023), pandemi sonrası dönemde tedarik zinciri dayanıklılığını artırmaya yönelik YZ tabanlı Endüstri 5.0 gereksinimlerini analiz etmek için Bütünleşik Yorumlayıcı Yapısal Modelleme yaklaşımını kullanmıştır. Çalışma, bu gereksinimler arasındaki hiyerarşik ilişkileri ortaya koyarak, teknolojik altyapı ve veri güvenliğinin, esnek tedarik zincirleri oluşturmadaki kritik rolünü vurgulamaktadır. Lo (2023), tedarikçi değerlendirmesi için veri güdümlü karar destek sistemleri önerirken, Colimbi vd. (2024) e-endüstri uygulamalarında anomali tespiti için büyük dil modellerini incelemiştir.

Ancak, Endüstri 5.0 prensipleri çerçevesinde reshoring kararlarını optimize eden ve YZ tekniklerini doğrudan bu stratejik karara uygulayan modeller literatürde oldukça sınırlıdır. Sawik (2023; 2025)’in stokastik modelleme çalışmaları önemli bir temel oluşturmakla birlikte, YZ algoritmalarının reshoring kararlarındaki potansiyeli henüz tam olarak keşfedilmemiştir. Bu çalışma, YZ destekli bir model önererek söz konusu literatür boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır.

3. Amaç ve Yöntem

Bu çalışmanın temel amacı, tedarik zinciri yönetiminde stratejik bir zorunluluk haline gelen reshoring kararlarını, Endüstri 5.0'ın insan odaklı ve sürdürülebilir teknoloji altyapısıyla optimize eden bütünleşik bir model önermektir. Çalışma, geleneksel maliyet odaklı reshoring modellerinin ötesine geçerek, insan-teknoloji işbirliğini ve çevresel faktörleri de karar sürecine dahil eden özgün bir çerçeve sunmaktadır. Metodoloji, reshoring kararlarının doğruluğunu artırmak için durum analizi, senaryo geliştirme, simülasyon aşaması, endüstri 5.0 entegrasyonu ve performans değerlendirme ve izleme aşamalarını entegre etmektedir. Bu kapsamda ilk olarak, üç aşamalı bir veri toplama stratejisi geliştirilmiştir. Stratejinin aşamaları takip edilerek, literatürdeki boşluk vurgulanmış, reshoring ve optimizasyon eksenini ile endüstri 5.0 teknolojileri eksenini kapsayan çalışmalar ifade edilmiştir. Tespit edilen çalışmalar, önerilen modelin girdilerini ve değişkenlerini belirleyebilmek amacıyla gruplandırılmıştır. Araştırma kapsamında önerilen karar destek modeli, beş döngüsel aşamadan oluşmaktadır. Durum analizi aşamasında firmanın operasyonel, finansal ve teknolojik verileri Destek Vektör Makineleri (SVM) ile Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) gibi YZ algoritmalarıyla işlenerek mevcut durum ve modernizasyon ihtiyaçları belirlenmektedir. İkinci aşamada, durum analizi ışığında farklı optimizasyon, risk ve teknoloji senaryoları oluşturulmakta ve Ayırık Olay Simülasyonu (DES), Monte Carlo simülasyonu ile Dışsal Değişkenli Ototegresif Bütünleşik Hareketli Ortalama (ARIMAX) modelleri kullanılarak test edilmektedir. Üçüncü aşamada, simülasyon çıktılarına dayalı olarak operasyonel, finansal ve çevresel riskler RF algoritması ile puanlanmakta ve önceliklendirilmektedir. Dördüncü aşamada, söz konusu risk puanları ve senaryo sonuçları doğrultusunda firmanın dijital dönüşüm, otomasyon, insan-makine işbirliği ve sürdürülebilirlik alanlarındaki eksikliklerini gidermek üzere endüstri 5.0 teknolojileri entegre edilmektedir. Beşinci ve son aşamada ise, entegre edilen sistemin performansı gerçek zamanlı IoT verileri ve YZ tabanlı takviyeli öğrenme algoritmalarıyla sürekli izlenmekte, elde edilen geri bildirimler ile önceki aşamalar dinamik olarak güncellenmektedir. Bu döngüsel yapı sayesinde model; firmalar, tedarik zinciri paydaşları ve politika yapıcılar için veri odaklı, uyarlanabilir ve sürdürülebilir reshoring stratejileri geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

3.1. Metodolojik Yaklaşım ve Veri Toplama Stratejisi

Araştırmanın teorik altyapısı ve önerilen optimizasyon modeli, Web of Science veri tabanında gerçekleştirilen kademeli literatür taraması ile oluşturulmuştur. Literatürdeki boşluğu tespit etmek ve model parametrelerini belirlemek için üç aşamalı bir arama stratejisi izlenmektedir.

Aşama 1: Boşluk Analizi

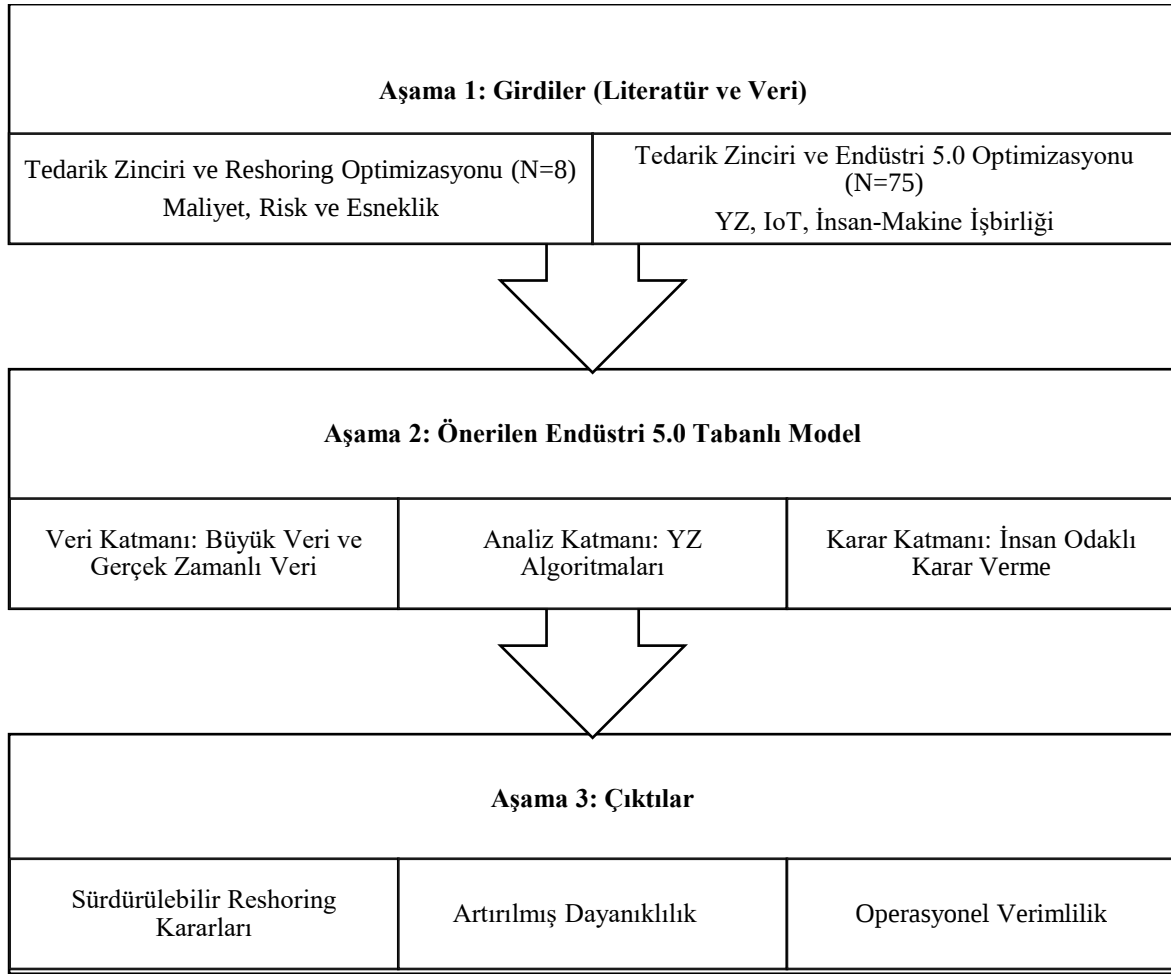
Araştırma kapsamında veri toplamak amacıyla ilk olarak "supply chain and reshoring and industry 5.0 and optimization" anahtar kelimeleri bir arada kullanılarak tarama yapılmıştır. İlgili dört kavramı doğrudan ve bütünleşik bir model kapsamında ele alan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Söz konusu bulgu, çalışmanın literatürdeki özgün bir boşluğu doldurduğunu kanıtlamaktadır.

Aşama 2: Reshoring ve Optimizasyon Eksenini

Veri toplama stratejisinin ikinci aşamasında, reshoring kararlarının matematiksel ve stratejik temellerini ortaya koyabilmek amacıyla "supply chain and reshoring and optimization" kombinasyonu taranmıştır. Bu tarama neticesinde, ilgili konuları ele alan 8 adet çalışma tespit edilmiştir. Bu çalışmalardan, modelin karar değişkenleri ve kısıtlarının belirlenmesi kapsamında faydalanılmaktadır.

Aşama 3: Endüstri 5.0 Teknolojileri Eksenini

Veri toplama stratejisinin son aşamasında, modelin teknolojik katmanını oluşturmak amacıyla "supply chain and industry 5.0 and optimization" anahtar kelimeleri taranmıştır. Tarama sonucunda 75 adet çalışmaya ulaşılmıştır. Söz konusu çalışmalar içerisinden özellikle YZ ve insan-makine işbirliğini içeren optimizasyon teknikleri incelenmiş ve önerilen modelin teknolojik altyapısına entegre edilmiştir. Şekil 2'de araştırmanın kavramsal çerçevesi gösterilmektedir.



Şekil 2. Kavramsal Çerçeve

Bu çerçeve, tedarik zincirlerinde reshoring bileşenlerinin ve Endüstri 5.0 optimizasyonunun nasıl entegre edileceğine dair yapılandırılmış bir genel bakış sunmaktadır.

3.1. Model Geliştirme

Çalışmada önerilen YZ destekli bütünsel çerçeve, tedarik zincirlerinde reshoring operasyonlarını değerlendirmek, farklı veri kaynaklarını entegre etmek ve Endüstri 5.0 prensipleri doğrultusunda karar alma süreçlerini optimize etmek üzere tasarlanmıştır.

Bölüm 2’de sunulan teorik altyapı ve literatür bulgularından hareketle, modelin temel girdilerini oluşturan karar kriterleri ve değişkenler belirlenmiştir. Bu aşamada, literatürdeki geniş faktör havuzu içerisinden maliyet etkinliği, operasyonel riskler ve teknolojik uyum gibi reshoring başarısını doğrudan etkileyen kritik parametreler filtrelenmiştir. Böylece, teorik tartışmalar somut bir modele dönüştürülmüştür.

Modelin inşasında temel alınan, önceki çalışmalarda validasyonu sağlanmış yöntemler ve modele dahil edilen değişken seti Tablo 1’de özetlenmektedir.

Tablo 1. Önerilen Modelin Girdilerini Oluşturan Temel Çalışmalar ve Belirlenen Değişken Seti

Kategori ve Odak Alanı	Yazar ve Yıl	Yöntem	Model İçin Seçilen Kritik Değişkenler ve Faktörler
Stratejik Reshoring Kararları (Modelin Amaç Fonksiyonu ve Kısıtları)	Gray vd., 2017	Vaka Çalışması & Sistem Dinamiği	Maliyet ve Belirsizlik: İşçilik maliyetleri, toplam sahip olma maliyeti, navlun maliyetleri ve karar ortamındaki belirsizlik düzeyi.
	Sawik, 2023; 2025	Stokastik Programlama	Risk ve Esneklik: Tedarik zinciri kesintileri (dalgalanma etkisi), hizmet düzeyi performansı ve senaryo bazlı en kötü durum maliyetleri.
	Freund vd., 2024	Ekonometrik Analiz	Ticaret Politikaları: Gümrük tarifeleri, ticari anlaşmazlıklar ve yüksek teknoloji ürünlerin stratejik önemi.
	Tsai & Urmetzer, 2023	Sistematiik Tarama	Konumlandırma Faktörleri: Pazara yakınlık, politik riskler, stratejik firma kaynakları ve dinamik yetenekler.
	Lampon & Rivo-Lopez, 2021	Ekonometrik Analiz	Teknoloji Yoğunluğu: Düşük vs. yüksek teknoloji sektör ayrımı, inovasyon kapasitesi ve arz güvenliği.
	Yu & Kim, 2018	Simülasyon Analizi	Finansal Performans: Brüt kar marjı, stok dönüş hızı ve talep belirsizliği altındaki hacim hataları.
	Ali vd., 2022	Kavramsal Araştırma	Çevresel Kısıtlar: Karbon ayak izi azaltma stratejileri, enerji verimliliği ve hammadde tedarik güvenliği.
	Gür & Dilek, 2023	Vaka Çalışması	Jeopolitik Riskler: Bölgesel güvenlik stratejileri, diplomatik ilişkilerin ticaret rotalarına etkisi ve ekonomik büyüklük.
	Li, 2020	Politika Analizi	Altyapı Kapasitesi: Yerel üretim potansiyeli, lojistik ağ güvenliği ve bölgesel iş birliği teşvikleri.
Endüstri 5.0 Teknolojileri (Modelin Araçları ve Veri Kaynakları)	Kabir, Khan & Kabir, 2024	Delphi, ISM, DEMATEL	Endüstri 5.0 Yetkinlikleri: Gerçek zamanlı veri akışı, şeffaflık, kişiselleştirme, çeviklik ve insan odaklı proaktif yaklaşım.
	Akundi vd., 2022	Metin Madenciliği	İnsan-Makine İşbirliği: Çalışan güvenliği, insan odaklı üretim süreçleri ve işbirlikçi robot (kobot) entegrasyonu.
	Zhen & Yao, 2024	Vaka Çalışması	Dijital Entegrasyon: Dijital ikiz uygulamaları, blok zinciri tabanlı veri şeffaflığı ve operasyonel verimlilik.
	Iakovou vd., 2024	Kaynak-Görev Modeli	Döngüsel Ekonomi: Tersine lojistik ağ performansı, geri dönüşüm oranı ve atık minimizasyonu.
	Chidozie vd., 2024	Kavramsal İnceleme	Sanal Ortamlar: Metaverse tabanlı tedarik zinciri görselleştirme ve sanal işbirliği ortamları.
YZ ve Optimizasyon (Modelin Çözüm Yöntemleri)	Ahmed vd., 2023	TISM (Bütünleşik Yorumlayıcı Yapısal Modelleme)	Uygulama Engelleri: Teknolojik altyapı eksikliği, veri güvenliği riskleri ve esnek üretim için gereken YZ gereksinimleri.
	Sharma vd., 2024	AHP, ELECTRE, DEMATEL	Karar Destek Mekanizması: Endüstri 5.0 benimseme zorluklarının sıralanması ve çözüm alternatiflerinin puanlanması.
	Yu & Sun, 2024	Bulanık Programlama & Monte Carlo	Ağ Tasarımı: Belirsizlik altında kapasite planlama, talep tahmini ve çok amaçlı (ekonomik, çevresel) optimizasyon.
	Hussien vd., 2023	Derin Öğrenme	Hata Analizi: Geri bildirim hatalarının tespiti, gecikme analizi ve süreç iyileştirme algoritmaları.
	Leng vd., 2024	Makine Öğrenmesi	Tahminleme: Arıza teşhisi, veri özelliklerinin analizi ve yeniden üretim süreçlerinde verimlilik tahmini.
	Colimbi vd., 2024	Büyük Dil Modelleri	Anomali Tespiti: Görsel ve metinsel veriler üzerinden süreçteki sapmaların (anomalilerin) otomatik tespiti.

Not: Tablo 1’de sınıflandırılan bu değişkenler, Bölüm 3.2’de detaylandırılacak olan önerilen optimizasyon modelinin temel girdilerini ve kısıtlarını oluşturmaktadır.

3.2. Veri Toplama ve Ön İşleme Stratejisi

Tedarik zincirlerinde etkili reshoring kararları alabilmek için üretim ve talep, ekonomik, politik, teknolojik ve potansiyel risk faktörlerini içeren çeşitli veri kaynaklarının kullanılması gerekmektedir. Tablo 2, üretim ve talep verileri, tedarik zinciri verileri, finansal veriler, teknolojik veriler, politik ve

yasal durum ve potansiyel riskler olarak kategorize edilen birincil veri kaynaklarına genel bir bakış sunmaktadır. Her kategori, etkili reshoring kararları için temel içgörüler sağlayan farklı faktörlerden oluşan geniş bir veri setini bir araya getirmektedir. Bu bağlamda üretim ve talep verileri, şirketlerin temel kaynaklarını ve potansiyellerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Tedarik zinciri operasyonlarına ilişkin elde edilen veriler, devam eden operasyonların verimliliği, kalitesi ve güvenliği açısından önemli bir genel bakış sağlamakta ve finansal verilerle yapılacak ekonomik analizlerle geleceğe yönelik bir yol çizilebilmektedir. Özellikle Endüstri 5.0 ve YZ tabanlı dönüşüm süreci çerçevesinde değerlendirildiğinde teknolojik veriler, şirketlerin mevcut durumunu net bir şekilde ortaya koymakta ve geliştirilmesi gereken konularda rehberlik sağlamaktadır. Politik ve yasal durum verileri, reshoringin düzenleyici etkilerine ilişkin bir çerçeve sunarken, potansiyel riskler karar alma sürecindeki belirsizlikleri net bir şekilde hesaba katmaya yardımcı olmaktadır.

Tablo 2. Veri Kaynakları ve Türleri

Kategori	Veri Kaynağı	Veri Türleri	Ölçüm ve Frekans
Üretim ve Talep Verileri	Dahili kurumsal kaynak verileri, pazar araştırması, kamuya açık raporlar	Yerel üretim kapasitesi, yerel işgücü kapasitesi	Haftalık/aylık kayıtlar
	Üretim hatları verileri	Üretim hata oranı, üretim hatlarının performansı, envanter seviyesi, işgücü başına üretim kapasitesi	Gerçek zamanlı/günlük kayıtlar
	Satış ve müşteri verileri, pazar araştırması	Mevcut talep, potansiyel talep	Üç aylık/yıllık kayıtlar
Tedarik Zinciri Verileri	Tedarik zinciri operasyonları	Lojistik altyapısının kalitesi	Üç aylık/yıllık güncellemeler
		Teslim süreleri ve güvenlik	Gerçek zamanlı/günlük veriler
		Lojistik zinciri aksaklıkları, tedarik zinciri bağımlılığı	Haftalık/aylık veriler
		Liman/istasyon etkinliği	Haftalık/aylık veriler
Finansal Veriler	Dahili kurumsal kaynak verileri	İşçilik maliyetleri, ekipman maliyetleri, yatırım maliyetleri, nakliye ve navlun maliyetleri	Haftalık/aylık veriler
		Toplam sahip olma maliyeti, brüt kar marjı	Üç aylık/yıllık kayıtlar
		Makroekonomik değişkenler	GSYİH, sanayi üretimi, ticari faaliyet
Teknoloji Verileri	Envanter departmanı raporları	Bilgisayarlar, sunucular, IoT cihazları, ağ ekipmanları	Üç aylık/yıllık kayıtlar
	Bilgi teknolojileri departman raporları	Yapay zeka tabanlı teknoloji ve uygulama kullanımı, IoT cihazlarının entegrasyonu, büyük veri analitiği araçlarının benimsenme düzeyi, siber güvenlik uygulamaları	Gerçek zamanlı/günlük veriler
	Bilgi teknolojileri departman raporları	Kurumsal kaynak planlaması, tedarik zinciri yönetimi ve müşteri ilişkileri yönetimi veri uygulamaları	Haftalık/aylık veriler
	İnsan kaynakları departmanı raporları	Çalışanların teknoloji kullanımındaki yetkinliği (eğitim, teknoloji becerileri)	Üç aylık/yıllık veriler
	Yerel yönetim düzenlemeleri	Vergi indirimleri ve yeniden yapılanma teşvikleri, yerel işgücü desteği	Gerçek zamanlı/haftalık raporlar
Potansiyel Riskler	Jeopolitik riskler	Savaşlar, bölgesel gerilimler, gümrük vergileri, ticaret savaşları	Haftalık/aylık raporlar
	Politik riskler	Gümrük tarifeleri ve ticaret savaşları	Haftalık/aylık raporlar
	Çevresel ve sürdürülebilirlik riskleri	Doğal afetler, yangın, sel, deprem, pandemi, üretim ve atık yönetimi	Aylık/üç aylık raporlar
	Ekonomik riskler	Yatırım getirisinin belirsizliği	Aylık/üç aylık raporlar
	Operasyonel riskler	Kritik bileşenlerin yerel kaynağı, vasıflı işgücünün mevcudiyeti, üretim hatlarının modernizasyonu	Haftalık/aylık raporlar

Tedarik zincirlerinde reshore operasyonlarını Endüstri 5.0 ve YZ tabanlı yöntemlerle optimize etmek ve

bir karar alma modeli oluşturmak, veri toplama ve ön işleme dayanmaktadır. Bu araştırmada, veri kaynakları altı kategoriye ayrılmıştır: üretim ve talep verileri, tedarik zinciri verileri, finansal veriler, teknolojik veriler, politik ve yasal durumlar ve potansiyel riskler. İşlenen her veri türü, doğru kararı vermek için anahtardır.

Üretim ve talep verileri, bir şirketin operasyonel verimliliğini iyileştirmede ve pazar ihtiyaçlarına daha etkili bir şekilde yanıt vermede kritik bir rol oynamaktadır. Yerel ve kıyı ötesi üretim kapasitesi, iş gücü başına üretim kapasitesi ve yerel iş gücü kapasitesi gibi göstergeler, üretim süreçlerinin optimize edilmesini sağlamaktadır (Gray vd., 2017; Ahmed vd., 2023; Sharma vd., 2024). Üretim süreçlerindeki kusur oranlarını belirlerken operasyonel iyileştirmelerde israfı ortadan kaldırma ve tedarik zinciri operasyonel maliyetlerini dengeleme fırsatlarını belirleyebilmektedir (Sawik, 2023; Nicoletti ve Apolloni, 2024). Satış ve müşteri ilişkileri yönetimi sistemlerinden güncel ve potansiyel olarak satılabilir ürünler hakkında üretilen talep verileri, tahminde bulunmaya yardımcı olmakta ve böylece üretim planlamasını optimize etmek için müşterilerin beklentileri hakkında bir anlayış sağlamaktadır (Marrone vd., 2023; Akundi vd., 2022). Ayrıca, talep dalgalanmaları pazar araştırmasından gelen girdilerle birleştirildiğinde daha doğru bir şekilde tahmin edilebilmekte ve hem yerel hem de kıyı ötesi üretim stratejileri uygun şekilde şekillendirilebilmektedir (Chidozie vd., 2024; Gray vd., 2017; Yu & Kim, 2018). Operasyonel verilerin analiz edilmesi, kaynak verimliliğinin ilerlemesi, uyarlanabilir üretim süreçleri ve pazar esnekliğini karşılayacak koşullarda esneklik için çok önemli görülmektedir (Hussien vd., 2023). Organizasyon için artan rekabete rağmen, tüketici mutluluğu daha fazla karlılık getirmektedir.

Tedarik zinciri bilgisi, lojistik tesislerinin en üst düzey kalitesi, hazırlık, emniyet ve güvenlik, tedarik zinciri kesintileri, liman/istasyon etkinliği ve tedarik zinciri bağımlılığından oluşan hayati bir değerlendirme kaynağıdır. Bu bilginin derinlemesine değerlendirilmesi, tedarik zincirinin performansını artırmanın yanı sıra olası kesintilerden kaçınmak için önemlidir. Örneğin, lojistik altyapısının kalitesi, sevkiyat sürelerini kısaltarak maliyetleri düşürmeye ve müşteri memnuniyetini artırmaya yardımcı olabilmektedir (Lee & Song, 2023; Ali vd., 2022; Lo, 2023). Teslim süreleri ve emniyet verileri, risklerin daha iyi yönetilmesini sağlayarak tedarik zincirinde dayanıklılık ve esneklik oluşturmaktadır (Dabo & Hosseinian-Far, 2023; Giammetti vd., 2021).

Ek olarak, tedarik zinciri kesintileri ve liman/istasyon etkinliği gibi bilgiler, tedarik zinciri prosedürlerinin savunmasız faktörlerini tanımak ve ayrıca iyileştirme olasılıkları sağlamak için kullanılabilir (Lee & Song, 2023; Kabir, Khan & Kabir, 2024; Yu & Sunlight, 2024). Bu sadece işlevsel performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedeflerini de hesaba katarak ve ekolojik etkileri azaltmaktadır (Sawik, 2025; Lampon & Rivo-Lopez, 2021). Bu tür bilgilerin değerlendirilmesi ve analiz edilmesi, firmaların kritik kararlarını sürdürmeleri ve ayrıca daha kalıcı, etkili ve çok yönlü bir tedarik zinciri oluşturmaları için bir temel sağlamaktadır.

İşletmelerin stratejik kararlarını desteklemek için finansal veriler hem şirket içi kaynaklardan hem de makroekonomik veri kaynaklarından elde edilmektedir. İç kaynaklardan gelen işgücü maliyetleri, ekipman maliyetleri, yatırım maliyetleri, nakliye ve navlun maliyetleri gibi veriler, şirketin operasyonel maliyet yapısını analiz ederek maliyet optimizasyonu ve bütçe yönetimi için önemli bir temel sağlamaktadır (Tsai & Urmetzer, 2023; Longauer, Hauck ve Vasvari, 2023; Charpin, 2021). Brüt marj verileri, karlılığı analiz ederek mevcut iş modellerinin sürdürülebilirliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Ahmed vd., 2023; Yu ve Kim, 2018). Makroekonomik veri kaynaklarından elde edilen Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYİH), endüstriyel üretim ve iş faaliyeti verileri, ekonomik koşulların genel görünümünü ve talep tahminlerini anlamada kritik bir rol oynamaktadır (Akundi vd., 2022; Gray vd., 2017; Yu & Kim, 2018). Örneğin, GSYİH büyümesi pazar genişleme potansiyelini değerlendirmek için bir göstergedir, endüstriyel üretim verileri ise sektöre göre talep eğilimlerini izlemek için değerli bilgiler içermektedir (Andres vd., 2024; Longauer, Hauck & Vasvari, 2023). Bu veri setini analiz etmek, şirketlere maliyet verimliliği, stratejik olarak doğrudan yatırımlar ve pazar dinamiklerine esnek yanıtlar oluşturma açısından önemli katkılar sunmaktadır. Böylece şirketler hem finansal hem de operasyonel sürdürülebilirliklerini artırabilirler.

Politik ve yasal durumla ilgili veriler, firmaların stratejik planlamalarını ve operasyonel kararlarını desteklemektedir. Vergi indirimleriyle ilgili bilgiler, işletmelerin maliyet avantajlarını artırmalarına ve

mevcut finansal kaynaklarını daha etkili bir şekilde kullanmalarına yardımcı olmaktadır (Freund vd., 2024; Tsai & Urmetzer, 2023). Reshoring operasyonlarına verilen teşvikler, yerel üretim faaliyetlerini artırarak işletmelerin tedarik zinciri dayanıklılığını iyileştirmeye ve küresel risklere karşı dayanıklılıklarını artırmaya katkıda bulunmaktadır (Ali vd., 2022; Akundi vd., 2022; Andres vd., 2024). Yerel işgücü desteği, işletmelerin bölgesel istihdam fırsatlarını güçlendirmelerine ve işletmeler için yetenek havuzunu genişletmelerine yardımcı olurken aynı zamanda sosyal sorumluluk hedeflerine ulaşmalarını kolaylaştırmaktadır (Charpin, 2021; Iakovou vd., 2024). Bu veri seti, yasal düzenlemelerin ve siyasi desteğin ekonomik ve sosyal etkilerini değerlendirerek işletmelerin rekabet avantajı elde etmelerine ve uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarına katkıda bulunmaktadır. İşletmeler, siyasi ve hukuki teşvikleri değerlendirerek hem yerel hem de küresel pazarlarda daha stratejik konumlara gelebilmektedir.

Teknoloji verileri, firmaların dijital dönüşüm süreçlerini desteklemek ve rekabet avantajı sağlamak için kritik bir kaynaktır. Ekipman ve tesis bilgileri, mevcut teknik çerçevenin yeteneğini analiz ederek verimlilik iyileştirmelerinin yanı sıra finansal yatırım gereksinimlerini belirlemede önemli bir görev oynamaktadır (Freund vd., 2024; Chidozie vd. 2024; Kertens vd., 2024). YZ tabanlı modern teknolojilerin kullanılması, otomasyon prosedürlerini artırarak performansı artırırken, IoT araçlarının birleşimi, gerçek zamanlı bilgi toplama ve değerlendirme ile tedarik zinciri yönetiminde önemli avantajlar sağlamaktadır (Lampon & Rivo-Lopez, 2021; Ahmed vd., 2023; Andres vd., 2024). Büyük veri analitiği cihazlarının teşvik edilme düzeyi, veri odaklı karar alma prosedürlerini sürdürerek çok daha öngörülebilir ve uyarlanabilir organizasyon tasarımlarına olanak tanımaktadır (Dossou Mozos & Pawlewski, 2024). Kurumsal kaynak planlaması, tedarik zinciri yönetimi ve müşteri ilişkileri yönetimi gibi uygulamalar, prosedür kombinasyonuna yardımcı olarak işlevsel performansı artırırken, siber koruma yazılımı, dijital ortamların güvenliğini sağlamada hayati bir parça olarak güvenliği sağlamaktadır (Dabo & Hosseinian-Far, 2023; Hussien vd., 2023). Ek olarak, çalışan yenilik becerileri bilgisi, dijital cihazların verimli kullanımını ve ayrıca iş uyumunu artırarak elektronik iyileştirme işlerinin başarısını dikkate almak için önemlidir (Kabir Khan & Kabir, 2024; Leng vd., 2024). Bu bilgi, modern teknoloji çerçevesini en üst düzeye çıkarma, organizasyon prosedürlerini artırma ve ayrıca dijital çağın taleplerine uyum sağlama açısından hizmetlere kritik bir destek sunmaktadır.

Potansiyel riskler, işletmelerin stratejik planlama ve dayanıklılık stratejileri geliştirmeleri için kapsamlı bir analiz gerektiren kritik unsurlardır. Jeopolitik riskler, savaşlar, bölgesel gerginlikler, ticaret savaşları ve tarifeler gibi faktörler nedeniyle tedarik zincirlerini bozabilir ve maliyetleri artırabilir; bu nedenle, bölgesel istikrar analizleri ve alternatif tedarik zinciri senaryoları oluşturmak önemli katkılar sunmaktadır (Gray vd., 2017; Tsai & Urmetzer, 2023). Ekonomik riskler, yatırım getirilerindeki belirsizlik ve finansal piyasaların davranışıyla ilgilidir ve bunların analizi, finansal tahminler ve bir şirketin likiditesi için gerekli bilgileri sağlamaktadır (Longauer, Hauck ve Vasvari, 2023; Sawik, 2025). Operasyonel risk faktörleri, kritik bileşenlerin ve uzmanların yerel kaynaklarından sağlanması, kalifiye işgücü eksikliği ve üretim hatlarının modernizasyonu ile ilgilidir ve bunların analizi, süreçlerde ve teknoloji yatırımlarında stratejik iyileştirmeler için yön vermektedir (Chidozie vd., 2024; Kertens vd., 2024; Giammetti vd., 2021). Çevresel ve sürdürülebilirlik riskleri, doğal afetler, pandemi gibi küresel krizler ve üretim ve atık yönetiminden kaynaklanmakta ve işletmelerin sürdürülebilirlik politikalarını güçlendirme ve çevresel etkilerini azaltma fırsatlarını yakalamalarına olanak tanımaktadır (Sharma vd., 2024; Yu & Kim, 2018; Charpin, 2021). Bu risk kategorilerinin her biri, işletmelerin risk yönetimi stratejilerini optimize etmelerine, operasyonel dayanıklılıklarını artırmalarına ve uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemelerine yardımcı olmaktadır. Etkili bir risk analizi, yalnızca tehditlerin değil, aynı zamanda fırsatların da daha iyi tanımlanmasına olanak tanımaktadır.

İlgili veriler kullanılabilirlik açısından incelendiğinde kaynaklar arasında farklılıklar görülmektedir. Bazı veriler gerçek zamanlı olarak ölçülebilirken, bazıları haftalık, üç aylık veya yıllık olarak elde edilmektedir. Bu bağlamda, büyük veri kümelerini temizlemek, işlemek ve anlamlandırmak için YZ destekli veri ön işleme modelleri kullanılmaktadır. Bu modeller genellikle makine öğrenmesi, derin öğrenme ve istatistiksel teknikleri kullanmaktadır. Bazı çalışmalarda ilgili tekniklerin veri ön işleme aşamasında da kullanılabileceği kanıtlanmıştır (Giammetti vd., 2021; Zhen & Yao, 2024; Andres vd., 2024; Kabir, Khan & Kabir, 2024, Akundi vd., 2022, Chidozie vd., 2024). Bu bağlamda, boyut indirgeme ve kategorik veri işleme için temel bileşen analizi, anormal verileri tespit etmek ve eksik

verileri tamamlamak için tekrarlayan sinir ağıları, modelin verimliliğini ve yorumlanabilirliğini artırmada rol oynamaktadır. Bu şekilde yapılandırılmış ön işleme yaklaşımı, modelin ayrıntılı ve güncel verileri kullanmasını sağlamaktadır.

3.3. Beş Aşamalı Karar Destek Modeli

3.3.1. Durum analizi

Durum analizi, mevcut bir sorunu tanımlamanın, mevcut sistemlerin veya süreçlerin performansını değerlendirmenin ve gelecekteki kararlara rehberlik edecek stratejiler geliştirmenin temelini oluşturmaktadır (Tsai & Urmetzer, 2023; Longauer, Hauck & Vasvari, 2023). İlgili analiz, üretim kapasitesi, talep tahminleri, finansal performans, tedarik zinciri yapısı, politik ve yasal durum ve potansiyel riskler gibi kritik faktörlerin değerlendirilmesini içermektedir. İncelenen çalışmalarda durumu analiz etmek için kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Giammetti vd., 2021; Lo, 2023; Dossou, Mozos & Pawlewski, 2024).

Bu bağlamda, şirketin mevcut operasyonel durumu incelenmektedir. Hangi üretim süreçlerinin reshoring kararları için uygun olduğu belirlenmektedir. Tedarik zinciri riskleri analiz edilmekte ve tüm veriler sınıflandırılmaktadır (Giammetti vd., 2021; Dossou, Mozos & Pawlewski, 2024; Hussien vd., 2023). Verileri sınıflandırmak ve önceliklendirmek için SVM yöntemi kullanılmaktadır. Bu aşamanın sonunda veri eğilimlerini tahmin etmek ve analiz etmek ve mevcut durumu sunmak için LSTM yöntemi kullanılmaktadır. Analiz sonucunda şirketin mevcut operasyonel yapısı, risk profili ve modernizasyon gereksinimleri net bir şekilde belirlenmektedir.

3.3.2. Senaryo geliştirme ve simülasyon

Durum analizinde elde edilen çıktıların ardından senaryo geliştirme aşaması optimize edilmiş ve sınıflandırılmış verilerle başlamaktadır. Senaryo geliştirme, farklı koşulların ve gelecekteki belirsizliklerin etkisini anlamak ve olası stratejileri test etmek açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu aşamada geliştirilen senaryolar simüle edilmekte ve şirketler, tedarik zinciri paydaşları ve politika yapıcılar için önemli içgörüler sağlamaktadır.

Senaryo geliştirme, gelecekteki olayları tahmin etmek, riskleri yönetmek ve stratejik kararlar almak için kullanılan sistematik bir süreçtir. Senaryo analizi, belirsizlikleri içeren karar alma süreçlerinde farklı alternatifleri değerlendirmeye yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda, değişkenler hakkında önceden tanımlanmış varsayımlara dayalı olarak birden fazla tahmin seçeneği oluşturulmaktadır. Bu senaryolar üç kategoriye ayrılmaktadır: Optimizasyon senaryoları, risk tabanlı senaryolar ve teknoloji uyarlama senaryoları.

- Optimizasyon senaryolarıyla en düşük maliyetli veya en verimli üretim stratejileri belirlenmektedir (Yu & Kim, 2018; Yu & Sun, 2024; Dossou, Mozos & Pawlewski, 2024).
- Risk tabanlı senaryolarla, üretim kesintileri, lojistik aksaklıkları ve diğer belirsizliklere dayalı stres testleri yapılmaktadır (Giammetti vd., 2021; Andres vd., 2024).
- Teknoloji uyarlama senaryolarıyla, dijital ikizler, otomasyon ve YZ entegrasyonu gibi Endüstri 5.0 bileşenleri test edilmektedir (Zhen & Yao, 2024; Kabir, Khan & Kabir, 2024; Andres vd., 2024).

Bu senaryolar ile farklı belirsizlik ve risk durumları modellenerek, sistemlerin farklı koşullar altında nasıl performans gösterdiğinin değerlendirilmesi ve daha iyi kararlar alınması için bir yol haritası oluşturulmaktadır.

Simülasyon aşaması, tedarik zinciri süreçlerini modellemek, analiz etmek ve optimize etmek için önemli bir modelleme sürecidir ve olası gelecekteki sonuçları tahmin etmek için kullanılmaktadır. Özellikle reshoring, tedarik zinciri optimizasyonu ve Endüstri 5.0 dönüşümü ile ilgili olarak, tedarik zincirinin simülasyonu farklı senaryoları simüle etmeyi, performansı ölçmeyi ve riskleri azaltmayı sağlamaktadır. Birçok makale, karar alma, optimizasyon, süreç analizi ve risk değerlendirmesi için farklı metodolojileri ifade etmek için simülasyon aşamasını benimsemektedir (Kabir, Khan & Kabir, 2024; Andres vd., 2024; Akundi vd., 2022; Zhen & Yao, 2024). Bu çalışmada, oluşturulan senaryoları modellemek için çeşitli YZ ve istatistiksel simülasyon teknikleri kullanılmaktadır:

- Ayrık olay simülasyonu (DES), üretim hatları, envanter yönetimi ve lojistik süreçleri gibi ayrık olayların analizine olanak tanımaktadır (Dossou, Mozos & Pawlewski, 2024; Leng vd., 2024; Yu & Sun, 2024). Her olayın sistem üzerinde farklı bir etkiye sahip olduğu varsayılmakta ve olaylar arasındaki ilişkiler modellenmektedir. İlgili simülasyon; üretim süreçlerindeki kesintilerin etkisini belirlemede, rotaları optimize etmede, işgücünün verimli kullanımı için kriterleri belirlemede kullanıma uygundur.
- Monte Carlo simülasyonu, belirsizlikleri incelemek ve farklı olasılıklara dayalı tahmini çıktıları tahmin etmek için çok kullanışlı bir yöntem olarak ifade edilmektedir (Kabir, Khan & Kabir, 2024; Akundi vd., 2022, Yu & Sun 2024). Özellikle, farklı senaryoların iş performansı üzerindeki ve ayrıca bu senaryoların uzun vadeli etkisinin analiz edilmesine olanak tanımakta, en düşük riskli ve en verimli senaryoları belirlemeye yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda, çeşitli risk faktörleri simüle edilebilmekte ve potansiyel kayıplar belirlenebilmektedir.
- ARIMAX modeli, talebi etkili bir şekilde tahmin edebilmekte ve tedarik zinciri dalgalanmalarını analiz edebilmektedir (Dossou, Mozos & Pawlewski, 2024; Lo, 2023; Ahmed vd., 2023). ARIMAX yalnızca geçmiş verileri değil, aynı zamanda ekonomik göstergeler, mevsimsellik ve politik faktörler gibi dışsal değişkenleri de analiz etmektedir. Model, tedarik zincirindeki gecikmeleri tahmin etmek ve üretim hacimlerinin müşteri talebine göre nasıl optimize edileceğini belirlemek için kullanılmaktadır.

Bu modeller birlikte kullanıldığında, tedarik zinciri yönetiminde veri odaklı, riskleri en aza indiren ve geleceği tahmin eden bütünsel bir sistemin kurulmasını sağlamaktadır.

3.3.3. Risk yönetimi ve sürdürülebilir strateji geliştirme

Risk yönetimi ve sürdürülebilir stratejilerin geliştirilmesi, tedarik zinciri sürekliliğini sağlamak, operasyonel riskleri en aza indirmek ve uzun vadeli sürdürülebilir büyümeyi desteklemek için kritik bir aşamadır. Özellikle tedarik zincirlerinde ve Endüstri 5.0 optimizasyon süreçlerinde reshoring kararlarında potansiyel risk faktörlerini belirlemek ve yönetmek, şirketlerin rekabet avantajı elde etmelerine yardımcı olabilmektedir.

Risk yönetimi, öngörülemezlikleri azaltmak, olası tehlikeleri belirlemek ve olası kayıpları azaltmak için önemli bir prosedürdür (Zhen & Yao 2024; Akundi vd., 2022). Bu prosedür, finansman, tedarik zinciri, üretim, lojistik, enerji sağlığı ve ekolojik yönetim gibi birçok pazarda hayati öneme sahiptir. Kalıcı yöntemler, ekolojik, finansal ve sosyal unsurları dikkate alarak uzun vadeli başarıyı sağlamak için oluşturulmuş stratejiler ve tekniklerdir (Andres vd., 2024; Chidozie vd., 2024). YZ ve melez değerlendirme teknikleri, tehlike yönetimi prosedürlerini çok daha canlı, veri odaklı ve geliştirilmiş hale getirerek kalıcı yöntemlerin performansını artırmaktadır (Kabir, Khan & Kabir 2024). Bu bağlamda, simülasyon aşamasından elde edilen veriler kullanarak operasyonel risklerin tanımlanması ve yönetimi, finansal risk yönetimi ve ekonomik sürdürülebilirlik, çevresel risk azaltımı ve sürdürülebilirlik planlaması, tedarik zinciri dayanıklılığını etkileyen konular ve Endüstri 5.0 teknolojilerinin uygun şekilde optimize edilmesine yönelik riskler analiz edilmektedir. RF yöntemi kullanılarak (Akundi vd., 2022; Dossou, Mozos & Pawlewski, 2024), her kategorideki risk puanlanmaktadır. Her risk başlığı için önceliklendirme ve risk puanlamasına göre sıralama yapılarak sürdürülebilir stratejiler geliştirilmektedir.

3.3.4. Endüstri 5.0 teknolojilerinin entegrasyonu

Oluşturulan stratejiler ışığında, sürecin etkin bir şekilde işletilmesi için Endüstri 5.0 teknolojilerinin modernizasyonu, entegrasyonu ve optimizasyonu gerçekleştirilmektedir. Endüstri 5.0, insan-makine iletişimini artıran ve YZ, dijital ikizler, blok zinciri IoT, büyük veri analitiği ve artırılmış gerçeklik gibi gelişmiş modern teknolojilerden oluşan bir üretim ve tedarik zinciri değişikliğini tanımlamaktadır (Dabo & Hosseinian-Far 2023; Leng vd., 2024). Bununla birlikte, işletmenin bu modern teknolojilerden tam olarak yararlanamaması durumunda, yetersizlikleri gidermek ve doğru entegrasyon eylemlerini belirlemek gerekmektedir.

Endüstri 5.0'ın başarısı teknoloji, insanlar ve süreçler arasındaki sağlıklı entegrasyona bağlıdır (Nicoletti & Apolloni, 2024). Bu aşamada, hangi Endüstri 5.0 bileşenlerinin eksik olduğu ve bunların önceki

aşamalarda gerçekleştirilen analizler, senaryo geliştirme, risk yönetimi ve simülasyonlardan elde edilen çıktılar doğrultusunda nasıl entegre edileceği değerlendirilmelidir. Önceki aşamalardan elde edilen kanıtlar, aşağıdaki öncüllerin ne ölçüde gerçekleştirildiğini göstermektedir:

- Dijital dönüşüm altyapısı eksiklikleri,
- Otomasyon ve robotik entegrasyon eksiklikleri
- Veri yönetimi ve YZ kullanım eksiklikleri,
- İnsan-makine iş birliğinin yeterliliği,
- Tedarik zincirinin güvenliği,
- Sürdürülebilirlik ve yeşil teknolojilere uyum.

Endüstri 5.0 uygulama ve optimizasyon stratejisi uygulanmalı ve belirlenen eksiklikleri ortadan kaldırmak için stratejik eylem planları uygulanmalıdır.

Öncelikle şirketin mevcut yapısı, IoT, bulut bilişim ve büyük veri analitiği gibi dijital dönüşüm teknolojilerine yeterince uyum sağlamayabilir. Bu bağlamda tüm süreçlerde IoT sensörlerinin kullanımı etkinleştirilmeli ve gerçek zamanlı veri toplanması sağlanmalıdır. Öte yandan dijital ikiz modelleri oluşturularak üretim süreçleri gerçek zamanlı olarak dijital ortamda modellenmeli ve sanal simülasyonlarla optimizasyon yapılmalıdır (Kabir, Khan & Kabir, 2024; Yu & Sun, 2024).

Şirket içi veri merkezleri yetersizse bulut tabanlı çözümler kullanılmalıdır. Büyük veri analizleri için YZ destekli veri yönetim sistemleri devreye alınmalıdır. İlgili verilerin güvenliğini sağlamak için blok zincir tabanlı güvenlik çözümleri kullanılarak veri güvenliği sağlanmalıdır (Andres vd., 2024).

Öte yandan, şirketin mevcut otomasyon sistemleri, Endüstri 5.0'ın getirdiği esnekliğe ve adaptasyona sahip olmayabilir. Bu şekilde, robotları süreçlere adapte etmek için destekli öğrenme yöntemleri uygulanmalıdır (Zhen & Yao, 2024). Ek olarak, yapılan araştırmalarda robotların ileri ekonomilerde kullanılmasının, yerel üretimin göreceli maliyetini düşürerek ve dolayısıyla denizaşırı ülkelerden yapılan ithalata talebi azaltarak ilgili ülkelerde yapılan istihdamı reshoring yoluyla azaltma potansiyeline sahip olduğu ifade edilmektedir (Faber, 2020; Calatayud & Rochina-Barrachina, 2025). Yine, otomasyonun üretkenliği ve pazar büyüklüğünü artırarak, istihdam talebini artırdığı yönünde kanıtlar mevcuttur (Artuc vd., 2022). Bu kapsamda üretim hatlarında akıllı robot sistemleri kullanılarak işgücü optimizasyonu sağlanmalı ve YZ destekli kalite kontrol sistemleri etkinleştirilmelidir.

Şirket, verileri etkili bir şekilde toplama ve analiz etme konusunda eksik olabilir. Bu bağlamda, büyük veri kümelerini daha iyi bir şekilde analiz etmek için makine öğrenimi ve derin öğrenme teknikleri kullanılmalıdır. Öte yandan, özellikle oluşabilecek arızaları ve sorunları tahmin etmek için YZ destekli bakım sistemleri kurulmalıdır. Envanter yönetimi ve lojistik süreçlerinde ARIMAX ve LSTM gibi gelişmiş tahmin yöntemlerinin kullanılması önemlidir. Ayrıca, üretim hatlarındaki anormallikleri tespit etmek için Evrişimli Sinir Ağı (CNN) tabanlı görüntü işleme sistemlerinin kullanılmasının önemli işgörüler sağlama potansiyeli barındırdığı ifade edilmektedir (Zhen & Yao, 2024).

Bir diğer taraftan şirket çalışanları, otomasyon sistemleriyle tam olarak bütünleşik olmayabilir. Bu bağlamda, endüstriyel robotların ve işçilerin birlikte çalışmasını sağlayacak kooperatif robot sistemleri (Kobot) devreye alınmalıdır (Kabir, Khan & Kabir, 2024). Robotların üretim süreçlerinde insanlarla güvenli bir şekilde çalışabilmesi için YZ tabanlı algılama sistemleri geliştirilmelidir.

Öte yandan, çalışanları eğitmek ve dijital yeteneklerini geliştirmek de önemlidir. Yapılan araştırmalarda YZ destekli otomasyonun doğrudan işten çıkarma etkisi yaratırken aynı zamanda verimlilik artışı, sermaye birikimi ve otomasyonun derinleşmesi gibi karşıt güçler aracılığıyla iş gücü talebini artırabileceği belirtilmektedir (Acemoğlu & Restrepo, 2018). Robotik teknolojilerin ve otomasyonun özellikle vasıfsız genç ve orta yaşlı erkek işçileri olumsuz etkilediği, ancak yüksek vasıflı işçilerin ücretlerini artırdığı ifade edilmektedir. (Chen & Frey, 2024; Krenz, Prettnner & Strulik, 2021). Bu kapsamda çalışanlara artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik eğitimleri verilmeli ve simülasyon destekli eğitim programları oluşturularak dijital beceriler geliştirilmelidir.

Şirketin tedarik zincirinde yeterli veri güvenliği ve izlenebilirlik yoksa, blok zinciri tarafından yönetilen

akıllı sözleşmeler tetiklenmelidir. Blok zinciri teknolojisi, tedarikçiler ve lojistik şirketleri arasında gerekli verilerin paylaşımını güvence altına almak için kullanılmalıdır.

Son olarak, şirketin tedarik zinciri süreçlerinde karbon emisyonu, enerji verimliliği ve geri dönüşüm süreçlerinde verimsiz süreç yönetimi olabilir. Enerji verimliliğini artırmak için IoT tabanlı enerji yönetim sistemleri kullanılmalı ve fabrika içinde enerji tüketimini optimize etmek için derin öğrenme tabanlı tahmin modelleri oluşturulmalıdır. Ayrıca, malzeme kullanımında sürdürülebilirliği artırmak için blok zincir tabanlı izleme sistemleri kullanılmalıdır.

Elde edilen çıktılardan sonra, şirkete özgü eksiklikleri gidermek için Endüstri 5.0 teknolojilerinin entegre edilmesi çok önemlidir. Bu süreçte hangi teknolojilerin önceliklendirileceği şirkete özgü analizler yoluyla belirlenmeli ve entegrasyon süreci aşamalı olarak gerçekleştirilmelidir. Dijital ikizler, YZ destekli optimizasyon, blok zincir tabanlı tedarik zinciri yönetimi ve işbirlikçi robotların kullanımı gibi çözümler şirketin dijital dönüşümünü hızlandırmakta ve uzun vadeli rekabet avantajı elde etmesini sağlamaktadır. Bu optimizasyon süreci tamamlandıktan sonra, Endüstri 5.0'a tam entegrasyonu sağlamak için sürekli iyileştirme ve adaptasyon mekanizmaları devreye alınabilir. Bu aşamaların tamamlanmasıyla temel performans göstergeleri oluşturulmakta ve kurulan sistemin etkinliği garanti altına alınmaktadır.

3.3.5. Performans İzleme ve Adaptasyon

Performans izleme ve uyarılama aşaması, Endüstri 5.0 teknolojileriyle optimize edilen süreçlerin etkinliğini değerlendirme ve iyileştirme ve değişen koşullara uyum sağlama sürecidir. Önceki aşamalarda gerçekleştirilen risk yönetimi, simülasyon, sürdürülebilir strateji geliştirme, optimizasyon ve entegrasyon süreçlerinin düzgün çalıştığını doğrulamak için sürekli izleme ve uyarılama gereklidir.

Bu aşama ayrıca modelin ilk üç aşaması hakkında geri bildirim sağlar ve bu aşamaların elde edilen çıktılarla uyumlu şekilde güncellenmesini içermektedir. Bu nedenle karar alma süreçleri verilere dayalı olarak dinamik hale getirilmekte ve işletmeler Endüstri 5.0 dönüşüm sürecinde sürekli iyileştirme sağlamaktadır.

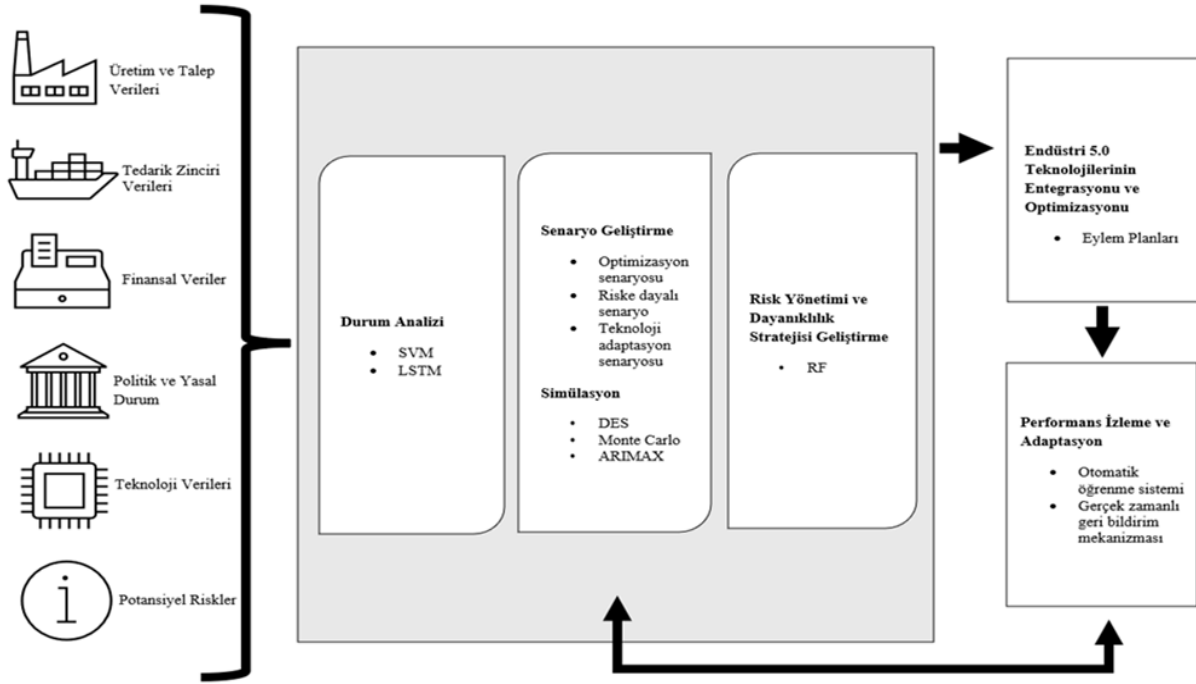
Performans izleme ve uyarılama aşamasının temel hedefleri şunlardır:

- Sistemin performansını gerçek zamanlı veri analiziyle sürekli olarak izlemek,
- Anormallikleri, darboğazları ve iyileştirme fırsatlarını belirlemek,
- Önceki aşamalarda oluşturulan modelleri sürekli olarak güncellemek ve optimize etmek,
- Risk yönetimi, simülasyon ve optimizasyon süreçleri hakkında geri bildirim sağlamak,
- İnsan-makine etkileşimini ve sürdürülebilirliği geliştirmek için uyarılama stratejileri geliştirmek.

Endüstri 5.0 bileşenleri tarafından desteklenen performans izleme ve uyarılama süreçleri, işletmelerin hızlı kararlar almasını sağlayan otomatik öğrenme sistemleri ve gerçek zamanlı geri bildirim mekanizmalarını içermektedir. Performans izleme, sensörler, büyük veri analitiği, YZ ve IoT özellikli sistemler aracılığıyla gerçek zamanlı veri toplayarak sistemin durumunu sürekli olarak izlemeyi sağlamaktadır. İlgili çerçevede, temel performans göstergeleri sürekli olarak analiz edilmekte ve sistemin performansı hedeflere uygunluk açısından değerlendirilmektedir. Burada elde edilen verilere dayanarak uyarılama mekanizmaları geliştirilmekte ve süreçler optimize edilmektedir. YZ destekli derin takviyeli öğrenme modelleri, sistemlerin kendi başlarına öğrenmesini ve performansını optimize etmesini sağlamaktadır. İkiz modellerle gerçek dünya ve sanal ortam entegre edilmekte ve performans senaryoları sürekli olarak güncellenmektedir. Bu aşamalar, makine bakım süreçlerindeki anormalliklerin tespiti ile otomatik bakım planlamasından akıllı enerji yönetim sistemlerindeki değişikliklere uyum sağlamaya kadar uzanmaktadır.

Performans izleme aşamasından elde edilen veriler, önceki dört aşamayı da besler ve sistemin sürekli iyileştirilmesine olanak tanımaktadır. Optimizasyon algoritmaları gerçek zamanlı performans verileriyle güncellenmekte ve süreçler sürekli olarak daha verimli hale getirilmektedir. Simülasyon modelleri gerçek dünya verileriyle doğrulanmakta ve yeni senaryolar oluşturulmaktadır. Süreçlerde kullanılan Endüstri 5.0 teknolojilerinin iş yükü optimize edilmektedir. Ayrıca performans verileri analiz edilerek

Yeni risk faktörleri belirlenmekte ve risk yönetim stratejileri güncellenmektedir. Geri bildirim mekanizmalarıyla şirketler, sistemdeki dinamik değişikliklere hızla uyum sağlayarak sürekli iyileştirme süreçlerini destekleyen bir ekosistem oluşturmaktadır. Bu şekilde uzun vadeli rekabet gücü artmakta ve şirketin operasyonel mükemmelliği sağlanmaktadır.



Şekil 3. Karar Destek Modeli

4. Modelin İşleyişine İlişkin Örnek Bir Senaryo: Elektronik Sektöründe Sayısal Bir Uygulama

Önerilen Endüstri 5.0 ve YZ tabanlı reshoring çerçevesinin metodolojik tutarlılığını test etmek amacıyla, literatürdeki benzer çalışmalarda (Sawik, 2023; Yu & Sun, 2024; Sharma vd., 2024) izlenen yaklaşımla uyumlu olarak sayısal bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, yüksek teknoloji segmentinde faaliyet gösteren ve üretiminin %70'ini offshore (kıyı şeridinden uzakta veya açık sularda bulunan faaliyetler) lokasyonlarda gerçekleştiren hipotetik bir elektronik bileşen üreticisi ele alınmıştır.

4.1. Veri Girişi ve Ön İşleme

Modeli beslemek amacıyla, Gray vd. (2017) ve Sawik (2025) çalışmalarındaki parametrelerle ve Tablo 1'de belirtilen literatür verileriyle uyumlu temsili bir veri seti oluşturulmuştur. Altı kategorideki temel girdiler şu şekildedir:

- Üretim ve Talep: Aylık 50.000 birim talep, %4 talep dalgalanması ve %3 kusur oranı (hatalı mal) mevcuttur.
- Tedarik Zinciri: 45 günlük teslim süresi bulunmaktadır ve son 12 ayda navlun maliyetlerinde %22 artış gerçekleşmiştir.
- Finansal: Offshore işçilik maliyetlerinde yıllık %10 artış vardır, yerel üretim için öngörülen devlet teşviki ise %15'tir.
- Teknolojik: İşletmenin mevcut dijital olgunluk seviyesi 0.45/1.00 düzeyindedir.
- Politik ve Yasal: Ticaret savaşları kaynaklı %10 ek gümrük tarifesini riski bulunmaktadır.
- Potansiyel Riskler: Jeopolitik risk endeksi skoru yüksek olarak kabul edilen 0.70 seviyesindedir.

4.2. Durum Analizi, Teşhis ve Öngörü

Toplanan veriler SVM algoritması ile sınıflandırılmıştır. Analiz sonucunda, mevcut offshore stratejisinin "Kritik Risk ve Düşük Esneklik" kümesinde yer aldığı belirlenmiştir. Ardından, LSTM ağı

kullanılarak yapılan 12 aylık talep ve maliyet projeksiyonunda, offshore operasyonel maliyetlerinin artan navlun ve gümrük tarifeleri nedeniyle sürdürülebilirlik eşliğini aşacağı öngörülmüştür.

4.3. Senaryo Analizi ve Model Çıktılarının Karşılaştırılması

Belirlenen durum parametreleri üzerinden üç ana senaryo Monte Carlo simülasyonu ile 10.000 iterasyon üzerinden test edilmiştir:

- Optimizasyon Senaryosu (Maliyet Odaklı): En düşük maliyetli rotayı belirlemeyi hedeflemektedir. Sadece navlun ve işçilik dengesine odaklanmaktadır.
- Risk Tabanlı Senaryo (Stres Testi): Lojistik kesintiler ve liman grevleri gibi %20'lik bir aksama olasılığında sistemin dayanıklılığını ölçmektedir.
- Teknoloji Uyarlama Senaryosu (Endüstri 5.0): Kobotların, dijital ikizlerin ve YZ tabanlı envanter yönetiminin sisteme entegre edildiği hibrit modeli test etmektedir.

4.3. Çok Boyutlu Simülasyon ve Modelleme Süreci

Metodoloji bölümünde tanımlanan senaryoların sayısal analizi, üç farklı teknikten oluşan bütünsel bir simülasyon mimarisi üzerinden gerçekleştirilmiştir:

1. Stratejik Tahminleme (ARIMAX): Vaka çalışmasının başlangıç parametrelerini belirlemek için ARIMAX modeli kullanılmıştır. Geçmiş talep verilerine ek olarak, GSYİH büyüme oranı ve sektörel vergi teşvikleri dışsal değişken olarak modele dahil edilmiştir. ARIMAX analizi, önümüzdeki 24 ay için talep miktarını ve gümrük tarifesi kaynaklı maliyet artışlarını tahmin ederek Monte Carlo simülasyonuna doğrulanmış veri girdisi sağlamıştır.
2. Risk ve Belirsizlik Analizi (Monte Carlo): ARIMAX'tan gelen talep verileri ve literatürden (Sawik, 2025) alınan risk olasılıkları kullanılarak 10.000 iterasyonluk bir Monte Carlo simülasyonu üzerinden test edilmiştir. Tedarik zinciri kesintilerinin ve döviz kuru dalgalanmalarının toplam maliyet üzerindeki dağılımı hesaplanmış, Senaryo 2 (Risk Tabanlı) ve Senaryo 3 (Endüstri 5.0) için güven aralıkları belirlenmiştir.
3. Operasyonel Süreç Optimizasyonu (DES): Senaryo 3 kapsamında önerilen Endüstri 5.0 entegrasyonu, DES yöntemiyle modellenmiştir. Üretim hattındaki iş akışı, robot-insan etkileşim süreleri ve darboğazlar simüle edilmiştir.

4.4. Risk Yönetimi ve Karar Puanlaması

Simülasyonlardan elde edilen çıktılar RF algoritması ile puanlanarak risk matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 2. Senaryo Sonuçlarının Karşılaştırmalı Analizi

Performans Göstergeleri	Senaryo 1: Optimizasyon Odaklı (Maliyet Süreci)	Senaryo 2: Risk Tabanlı (Dayanıklılık Testi)	Senaryo 3: Teknoloji Uyarlama (Endüstri 5.0)
Referans Temeli	Yu ve Kim (2018)	Giammetti vd. (2021)	Zhen ve Yao (2024)
Operasyonel Maliyet Endeksi	95 (En Düşük)	112	103
Tedarik Dayanıklılığı (0-1)	0.55	0.90 (En Yüksek)	0.88
Hizmet Seviyesi	%88	%96	%98
Dijital Olgunluk Skoru	0.45	0.60	0.95 (En Yüksek)
Sürdürülebilirlik (Ekolojik)	0.50	0.75	0.92
Bütünsel Karar Skoru (0-1)	0.52	0.78	0.91 (Optimal)

Tablo 2'de sunulan sayısal sonuçlar, modelin karar verme mantığını şu şekilde somutlaştırmaktadır:

- Optimizasyon Senaryosu: Sadece maliyet odaklı (Yu & Kim, 2018) bir yaklaşım sergilendiğinde, operasyonel maliyet endeksi en düşük seviyeye (95) inmektedir. Ancak bu durum, tedarik dayanıklılığının (0.55) ve dijital olgunluğun düşük kalmasına neden olarak sistemi küresel krizlere karşı savunmasız bırakmaktadır.
- Risk Tabanlı Senaryo: Giammetti vd. (2021) yaklaşımıyla kesintilere odaklanıldığında, dayanıklılık skoru 0.90 ile zirveye ulaşmakta, ancak bu güvenlik marjı maliyetlerin 112 seviyesine çıkmasına yol açmaktadır.
- Teknoloji Uyarlama (Endüstri 5.0) Senaryosu: Zhen & Yao (2024) ile uyumlu olan bu senaryo, modelin önerdiği optimal yoldur. YZ ve otomasyon sayesinde maliyetleri makul seviyede (103) tutarken, dayanıklılık (0.88) ve hizmet seviyesinde (%98) üstün başarı sağlamaktadır. En yüksek Bütünleşik Karar Skoru (0.91), teknolojik adaptasyonun reshoring başarısı için vazgeçilmez olduğunu kanıtlamaktadır.

4.5. Teknoloji Entegrasyonu ve Uygulama Planı

En yüksek skora sahip (0.91) Endüstri 5.0 Destekli Reshore senaryosu için model şu aksiyon planını önermektedir:

- Öncelik 1: Üretim hattına kobot entegrasyonu ile yerel işgücü maliyetinin %12 sübvansede edilmesi.
- Öncelik 2: Şeffaflık ve veri güvenliği için blok zinciri tabanlı akıllı sözleşmelerin devreye alınması.
- Öncelik 3: Gerçek zamanlı izleme için Dijital İkiz altyapısının kurulması.

4.6. Performans İzleme ve Adaptasyon

Entegrasyon sonrası, üretim hattından gelen gerçek zamanlı IoT verileri ve takviyeli öğrenme algoritmalarıyla sistem sürekli izlenmektedir. Örneğin, enerji tüketiminde beklenmeyen bir artış tespit edildiğinde, sistem otomatik olarak üretim parametrelerini yeniden optimize etmekte ve simülasyon modellerini güncelleyerek gelecek senaryoları iyileştirmektedir. Bu döngüsel yapı sayesinde, reshoring kararının getirdiği avantajları sürekli olarak maksimize edilmektedir.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, tedarik zinciri yönetiminde reshoring kararlarını Endüstri 5.0 teknolojileri ve yapay zekâ destekli optimizasyon yöntemleriyle bütünleştiren bütüncül bir model sunarak literatüre önemli katkılar sağlamaktadır. Mevcut literatürde reshoring kararları genellikle maliyet, risk veya stratejik faktörler bağlamında ele alınırken (Gray vd., 2017; Sawik, 2023; Tsai & Urmetzer, 2023), Endüstri 5.0'ın insan-teknoloji işbirliği, dijital ikizler, IoT ve blok zincir gibi teknolojik yeteneklerinin bu karar süreçlerine entegrasyonu sınırlı düzeyde incelenmiştir. Bu bağlamda çalışmamız, iki ayrı literatürü (reshoring ve Endüstri 5.0) birleştirerek, reshoring kararlarını yalnızca operasyonel bir yer değiştirme değil, aynı zamanda bir dijital dönüşüm ve sürdürülebilirlik fırsatı olarak ele alan özgün bir çerçeve sunmaktadır.

Önerilen beş aşamalı model, durum analizinden performans izlemeye kadar tüm süreçleri kapsayarak, teorik düzeyde bütünleşik bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Modelde kullanılan SVM, LSTM, RF, Monte Carlo simülasyonu, ARIMAX ve takviyeli öğrenme gibi YZ ve istatistiksel yöntemler, reshoring karar süreçlerinin veri odaklı, dinamik ve öngörücü bir yapıya kavuşturulmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca model; otomotiv, sağlık, enerji, perakende ve lojistik gibi farklı sektörlerde uygulanabilecek esneklikte tasarlanmış olup, bu yönüyle disiplinler arası bir nitelik taşımaktadır.

Elde edilen sonuçlar, literatürdeki çalışmalarla hem benzerlikler göstermekte hem de özgün farklar ortaya koymaktadır. Çalışmamız, Gray vd. (2017) ve Sawik (2023) tarafından vurgulanan; işçilik maliyetlerindeki artışın ve tedarik zinciri kesintilerinin reshoring kararlarındaki belirleyici rolünü doğrulamaktadır. Sayısal uygulamamızda görüldüğü üzere, risk puanı yüksek olan offshore senaryoları, tıpkı Giammetti vd. (2021)'in belirttiği gibi, sistemin dayanıklılığını kritik seviyelere düşürmektedir.

Literatürdeki çalışmaların çoğu reshoring kararlarını statik veya sınırlı parametrelili modellerle ele alırken, önerilen 5 aşamalı YZ çerçevesi, Endüstri 5.0 teknolojilerini bir maliyet artırıcı değil, verimlilik

katalizörü olarak konumlandırmaktadır. Ahmed vd. (2023) ve Sharma vd. (2024)'ün çalışmalarında belirttikleri teknolojik engeller, modelimizde SVM ve RF algoritmalarıyla optimize edilerek aşılmış ve yerel üretimin maliyet dezavantajının otomasyonla nasıl kapatılabileceği somutlaştırılmıştır.

5.2. Yönetsel ve Pratik Çıkarımlar

Geliştirilen model, farklı paydaş grupları için somut ve uygulanabilir çıkarımlar sunmaktadır. Firmalar açısından model, operasyonel verimliliği artıracak araçlar sağlamaktadır. Dijital ikizler ve YZ destekli simülasyonlar sayesinde üretim süreçleri gerçek zamanlı optimize edilebilmekte, makine öğrenimi algoritmalarıyla arıza oranları azaltılabilmekte ve envanter maliyetleri düşürülebilmektedir. Ayrıca IoT ve blok zincir teknolojileriyle tedarik zinciri boyunca tam şeffaflık sağlanmakta, insan-robot işbirliğini güçlendiren kobot uygulamalarıyla işgücü verimliliği artırılmaktadır.

Tedarik zinciri paydaşları ve teknoloji sağlayıcılar için model, veri odaklı ve entegre bir yapı sunmaktadır. Tedarikçiler daha şeffaf ve güvenilir ticaret süreçlerine kavuşurken, lojistik sağlayıcılar dinamik rota optimizasyonları ve öngörücü analiz sistemleriyle daha verimli taşıma süreçleri oluşturabilecektir. Teknoloji sağlayıcılar ise, modelin öngördüğü YZ tabanlı üretim yönetim sistemleri, akıllı lojistik çözümleri ve IoT platformları gibi alanlarda yeni iş fırsatları yakalayabilecektir.

Politika yapıcılar için model, yerel üretimi teşvik eden ve ekonomik sürdürülebilirliği artıran stratejik bir yol haritası niteliğindedir. Hükümetler, modeldeki dijital dönüşüm ve YZ yatırımlarını destekleyecek teşvik programlarını şekillendirebilir, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik yeşil üretim düzenlemelerini modelin öngördüğü teknolojik altyapıya dayandırabilir. Ayrıca, çalışanların dijital becerilerinin geliştirilmesine yönelik eğitim politikaları için model bir referans oluşturabilir.

5.3. Sınırlılıklar ve Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Önerilen model, kapsamlı bir çerçeve sunmakla birlikte bazı sınırlılıklar içermektedir. Birincisi, modelin etkin biçimde uygulanabilmesi için IoT altyapısı, blok zincir sistemleri ve veri analitiği yetkinliklerinin belirli bir düzeyde olması gerekmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde veya KOBİ'lerde bu altyapının yetersizliği, modelin uygulanabilirliğini kısıtlayabilir. İkincisi, modelde yoğun biçimde kullanılan IoT cihazları ve blok zincir sistemleri, beraberinde siber güvenlik risklerini getirmektedir. Veri gizliliği ve sistem güvenliği, modelin başarısını doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Üçüncüsü, Endüstri 5.0 teknolojilerinin etkin kullanımı, çalışanların dijital yetkinlik düzeyine bağlıdır. İşgücünün bu teknolojilere adaptasyonu, firmalar için önemli bir eğitim ve değişim yönetimi gereksinimi doğurmaktadır.

Bu sınırlılıklar, gelecek araştırmalar için önemli yönelimler sunmaktadır. Öncelikle, modelin farklı sektörlerde ve farklı büyüklükteki firmalarda uygulamalı vaka çalışmalarıyla test edilmesi, modelin sektörel uyarlanabilirliğini ve ölçeklenebilirliğini ortaya koyacaktır. İkinci olarak, modelde öngörülen insan-makine işbirliğinin çalışan verimliliği, iş tatmini ve istihdam üzerindeki etkileri, sosyo-teknik bir perspektifle incelenebilir. Üçüncü olarak, modelde kullanılan YZ algoritmalarının performanslarının karşılaştırmalı analizleri yapılarak, farklı karar bağlamları için en uygun algoritma seti belirlenebilir. Son olarak, modelin döngüsel ekonomi ilkeleriyle entegrasyonu derinleştirilerek, reshoring kararlarının çevresel sürdürülebilirlik boyutu daha ayrıntılı modellenenebilir.

Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen YZ destekli ve Endüstri 5.0 odaklı karar destek modeli, reshoring süreçlerini veri odaklı, dinamik ve sürdürülebilir bir temele oturtmayı hedeflemektedir. Teorik katkıları, pratik çıkarımları ve gelecek araştırmalara yön gösterici niteliğiyle model, tedarik zinciri yönetimi alanında bütüncül bir dönüşüm aracı olarak değerlendirilebilir.

6. Kaynaklar

- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2018). The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment. *American economic review*, 108(6), 1488-1542.
- Ahmed, T., Karmaker, C. L., Nasir, S. B., Moktadir, M. A., & Paul, S. K. (2023). Modeling the artificial intelligence-based imperatives of industry 5.0 towards resilient supply chains: A post-COVID-19 pandemic perspective. *Computers & Industrial Engineering*, 177, 109055. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109055>

- Akundi, A., Euresti, D., Luna, S., Ankobiah, W., Lopes, A., & Edinbarough, I. (2022). State of Industry 5.0—Analysis and identification of current research trends. *Applied System Innovation*, 5(1), 27. <https://doi.org/10.3390/asi5010027>
- Ali, S. H., Kalantzakos, S., Eggert, R., Gauss, R., Karayannopoulos, C., Klinger, J., ... & Perrons, R. K. (2022). Closing the infrastructure gap for Decarbonization: The case for an integrated mineral supply agreement. *Environmental Science & Technology*, 56(22), 15280-15289. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05413>
- Andres, B., Díaz-Madroñero, M., Soares, A. L., & Poler, R. (2024). Enabling Technologies to Support Supply Chain Logistics 5.0. *IEEE Access*, 12, 43889-43906. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3374194>
- Artuc, E., Bastos, P., Copestake, A., & Rijkers, B. (2022). Robots and trade: Implications for developing countries. In *Robots and AI* (pp. 232-274). Routledge.
- Bettiol, M., Chiarvesio, M., Di Maria, E., Di Stefano, C., & Fratocchi, L. (2023). Post-offshoring manufacturing strategies: decision-making and implementation. *Management Decision*, 61(12), 3755-3784. <https://doi.org/10.1108/MD-12-2022-1764>
- Calatayud, C., & Rochina-Barrachina, M. E. (2026). Robots and firm reshoring. *Industry and Innovation*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/13662716.2025.2495758>
- Charpin, R. (2022). The resurgence of nationalism and its implications for supply chain risk management. *International journal of physical distribution & logistics management*, 52(1), 4-28. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2021-0019>
- Chen, C., & Frey, C. B. (2024). Robots and reshoring: a comparative study of automation, trade, and employment in Europe. *Industrial and Corporate Change*, 33(6), 1331-1377. <https://doi.org/10.1093/icc/dtae012>
- Chidozie, B., Ramos, A., Ferreira, J., & Ferreira, L. P. (2024). The Importance of digital transformation (5.0) in supply chain optimization: an empirical study. *Production Engineering Archives*, 30(1), 127-135. <https://doi.org/10.30657/pea.2024.30.12>
- Colombi, L., Gilli, A., Dahdal, S., Boleac, I., Tortonesi, M., Stefanelli, C., & Vignoli, M. (2024, May). A machine learning operations platform for streamlined model serving in industry 5.0. In *NOMS 2024-2024 IEEE Network Operations and Management Symposium*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/NOMS59830.2024.10575103>
- Dabo, A. A. A., & Hosseinian-Far, A. (2023). An Integrated Methodology for Enhancing Reverse Logistics Flows and Networks in Industry 5.0. *Logistics*, 7(4), 97. <https://doi.org/10.3390/logistics7040097>
- Dossou, P. E., Alvarez-de-los-Mozos, E., & Pawlewski, P. (2024). A Conceptual Framework for Optimizing Performance in Sustainable Supply Chain Management and Digital Transformation towards Industry 5.0. *Mathematics*, 12(17), 2737. <https://doi.org/10.3390/math12172737>
- Faber, M. (2020). Robots and reshoring: Evidence from Mexican labor markets. *Journal of International Economics*, 127, 103384. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2020.103384>
- Fernández Miguel, A., Riccardi, M. P., García-Muiña, F. E., Fernández del Hoyo, A. P., Veglio, V., & Settembre-Blundo, D. (2024). From Global to Glocal: Digital Transformation for Reshoring More Agile, Resilient, and Sustainable Supply Chains. *Sustainability*, 16(3), 1196. <https://doi.org/10.3390/su16031196>
- Freund, C., Mattoo, A., Mulabdic, A., & Ruta, M. (2024). Is US trade policy reshaping global supply chains?. *Journal of International Economics*, 152, 104011. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2024.104011>
- Giammetti, R., Papi, L., Teobaldelli, D., & Ticchi, D. (2022). The network effect of deglobalisation on European regions. *Cambridge Journal of Regions. Economy and Society*, 15(2), 207-235. <https://doi.org/10.1093/cjres/rsac006>

- Gray, J. V., Esenduran, G., Rungtusanatham, M. J., & Skowronski, K. (2017). Why in the world did they reshore? Examining small to medium-sized manufacturer decisions. *Journal of Operations Management*, 49, 37-51. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2017.01.001>
- Hussien, M., Nguyen, K. K., Ranjha, A., Krichen, M., Alshammari, A., & Cheriet, M. (2023). Enabling efficient data integration of industry 5.0 nodes through highly accurate neural CSI feedback. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 69(4), 813-824. <https://doi.org/0.1109/TCE.2023.3294832>
- Iakovou, E., Pistikopoulos, E. N., Walzberg, J., Iseri, F., Iseri, H., Chrisandina, N. J., ... & Nkoutche, C. (2024). Next-generation reverse logistics networks of photovoltaic recycling: Perspectives and challenges. *Solar Energy*, 271, 112329. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112329>
- Ivanov, D. (2023). The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. *International Journal of Production Research*, 61(5), 1683-1695. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892>
- Kabir, M. A., Khan, S. A., & Kabir, G. (2024). A Hierarchical Structure Modeling and Relationships Exploration of Supply Chain 5.0 Capabilities. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 11253-11268. <https://doi.org/10.1109/TEM.2024.3408669>
- Kerstens, K., Azadi, M., Matin, R. K., & Saen, R. F. (2024). Double Hedonic Price-Characteristics Frontier Estimation for IoT Service Providers in the Industry 5.0 Era: A Nonconvex Perspective Accommodating Ratios. *European Journal of Operational Research*, 319(1), 222-233. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.05.047>
- Krenz, A., Prettner, K., & Strulik, H. (2021). Robots, reshoring, and the lot of low-skilled workers. *European Economic Review*, 136, 103744. <https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2021.103744>
- Lampón, J. F., & Rivo-López, E. (2022). The effect of the industry technology intensity on the drivers of manufacturing backshoring. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(1), 1-21. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2021-0071>
- Lee, P. T. W., & Song, Z. (2023). Exploring a new development direction of the Belt and Road Initiative in the transitional period towards the post-COVID-19 era. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 172, 103082. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103082>
- Leng, J., Zhu, X., Huang, Z., Li, X., Zheng, P., Zhou, X., ... & Liu, Q. (2024). Unlocking the power of industrial artificial intelligence towards Industry 5.0: Insights, pathways, and challenges. *Journal of Manufacturing Systems*, 73, 349-363. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.02.010>
- Li, J. (2020). Grow local manufacturing along US/Mexico border region for an integrated supply chain in the Post COVID-19 era. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*. <https://doi.org/10.1520/SSMS20200067>
- Lo, H. W. (2023). A data-driven decision support system for sustainable supplier evaluation in the Industry 5.0 era: A case study for medical equipment manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, 56, 101998. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101998>
- Longauer, D., Hauck, Z., & Vasvári, T. (2023). Make-or-buy strategies in a multi-stage manufacturing process and the role of learning effect in relocation decisions. *Computers & Industrial Engineering*, 180, 109259. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109259>
- Marrone, P. V., Mathias, F. R., Bernardo, W. M., Orlandini, M. F., Serafim, M. C. A., Scoton, M. L. R. P. D., ... & Dias, E. M. (2023). Decision Criteria for Partial Nationalization of Pharmaceutical Supply Chain: A Scoping Review. *Economies*, 11(1), 25. <https://doi.org/10.3390/economies11010025>
- Nicoletti, B., & Appolloni, A. (2024). Green Logistics 5.0: a review of sustainability-oriented innovation with foundation models in logistics. *European Journal of Innovation Management*, 27(9), 542-561. <https://doi.org/10.1108/EJIM-07-2024-0787>
- Sawik, T. (2023). Reshore or not reshore: a stochastic programming approach to supply chain

- optimization. *Omega*, 118, 102863. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102863>
- Sawik, T. (2025). Economically viable reshoring of supply chains under ripple effect. *Omega*, 131, 103228. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103228>
- Sharma, M., Sehrawat, R., Luthra, S., Daim, T., & Bakry, D. (2022). Moving towards industry 5.0 in the pharmaceutical manufacturing sector: Challenges and solutions for Germany. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 13757-13774. doi: 10.1109/TEM.2022.3143466
- Tsai, T. Y., & Urmetzer, F. (2024). A decisional framework for manufacturing relocation: Consolidating and expanding the reshoring debate. *International Journal of Management Reviews*, 26(2), 254-284. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12352>
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of manufacturing systems*, 61, 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Yu, H., & Sun, X. (2024). Uncertain remanufacturing reverse logistics network design in industry 5.0: Opportunities and challenges of digitalization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108578. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108578>
- Yu, U. J., & Kim, J. H. (2018). Financial productivity issues of offshore and “Made-in-USA” through reshoring. *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*, 22(3), 317-334. <https://doi.org/10.1108/JFMM-12-2017-0136>
- Zhen, Z., & Yao, Y. (2024). The confluence of digital twin and blockchain technologies in Industry 5.0: Transforming supply chain management for innovation and sustainability. *Journal of the Knowledge Economy*, 1-27. <https://doi.org/10.1007/s13132-024-02151-0>

Research Article

Yapay Zeka Destekli Sürdürülebilir Reshoring Kararları: Endüstri 5.0 Tabanlı Bir Çerçeve

Artificial Intelligence Enabled Reshoring Decisions: An Industry 5.0 Based Framework

Muhammet Mustafa AKKAN

Dr. Öğr. Üyesi, KTO Karatay Üniversitesi

Ticaret ve Sanayi Meslek Yüksekokulu

muhammet.mustafa.akkan@karatay.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0001-9409-7525>

Extended Summary

Introduction

In recent years, global supply chains have become vulnerable to multidimensional and unpredictable risks such as pandemics, political tensions, natural disasters, technological transformation pressures and sustainability requirements (Giammetti et al., 2021). Especially after the COVID-19 pandemic, disruptions in international transportation, delays in raw material supply and rising logistics costs have forced businesses to review their existing supply chain structures (Lee et al., 2022). In this context, reshoring strategies have come to the fore with the idea of moving production from offshore regions to home countries or nearby geographies (Tsai & Urmetzer, 2023). However, reshoring decisions are a complex decision process that considers many factors such as cost, flexibility, operational risks, legal regulations and sustainability (Longauer, Hauck & Vasvari, 2023; Charpin, 2021). It is often not possible to make such decisions in a sound manner with traditional methods, which increases the need for data-driven, multidimensional and dynamic tools for decision makers. Industry 5.0 has the potential to respond to this need with human-centered, sustainable and technologically integrated production and supply structures (Akundi et al., 2022; Zhen & Yao, 2024). In this context, the main objective of the study is to develop a sustainable decision support model for the optimization of reshoring decisions using Industry 5.0 components and artificial intelligence-supported approaches.

Theoretical Background

The literature shows that reshoring decisions are usually made to reduce costs, improve production quality, shorten lead times and reduce supply risks. Gray et al. (2017) argue that the lessons learned by small and medium-sized enterprises from past offshoring experiences are important in reshoring decisions, while Lampon & Rivo-Lopez (2021) emphasize that technology intensity plays a decisive role in the decision process. On the other hand, Sawik (2023) showed that reshoring decisions are effective in terms of cost reduction and flexibility enhancement with scenario-based stochastic models. However, most of these studies are based on either theoretical analysis or traditional decision models, providing limited information on how to integrate Industry 5.0 technologies into the reshoring process.

Literature focused on Industry 5.0 shows that technologies such as digital twins, the internet of things, artificial intelligence, big data analytics, blockchain and augmented reality increase transparency, efficiency and predictive capabilities in supply chain management. Kabir et al. (2024) modeled the hierarchical structure of supply chain 5.0 competencies; Zhen & Yao (2024) examined the contribution of digital twin and blockchain technologies to sustainability in the supply chain. However, there are very

few studies in literature that integrate these technologies into reshoring decisions in a holistic and systematic way.

Purpose and Method

The main objective of this study is to develop a comprehensive decision support model that optimizes reshoring decisions with artificial intelligence-based analysis and integrates Industry 5.0 principles. The model integrates strategic planning, operational assessment, risk analysis and technology integration under the same structure. In this direction, firstly, a literature review was conducted in the Web of Science database with the keywords “supply chain”, “reshoring”, “optimization” and “Industry 5.0”, and the limitations and gaps of existing models were identified in light of the findings obtained. A five-stage method was adopted in the development of the model: (1) situation analysis, (2) scenario development and simulation, (3) risk management and sustainability strategies, (4) integration and optimization of Industry 5.0 technologies, (5) continuous performance monitoring and system adaptation. Each stage was supported by various artificial intelligence techniques (SVM, LSTM, RF, ARIMAX, PCA) and data-driven decision-making processes were created.

Model Development

The first stage of the model involves analyzing companies’ production capacities, demand projections, financial indicators, technological infrastructure, legal regulations and operational risks. The collected data is first subjected to a pre-processing process. In this context, classified, predicted and analyzed data are obtained using artificial intelligence algorithms. The situation analysis aims to clearly identify the current operational structure, risk profile and modernization needs.

In the second stage, the scenario development process was initiated and scenario types based on cost optimization, risk management and technology adaptation were created. These scenarios are tested with Monte Carlo simulation, DES and ARIMAX models. Thus, it will be ensured to determine which reshoring strategy will yield the most efficient results in situations faced with different possibilities.

In the third stage, operational, financial, environmental and technological risks are scored and prioritized with artificial intelligence algorithms, and sustainability strategies are developed for each risk heading. In this context, Internet of Things-based energy management systems against environmental risks and solutions to reduce carbon footprint have been integrated into the model.

In the fourth stage, the deficiencies of the digital transformation infrastructure, incompatibilities of automation and robotic systems, data management deficiencies and the level of human-machine collaboration are analyzed. Accordingly, digital twins will be used to model production processes in a virtual environment, blockchain technology will ensure data security and traceability in the supply chain, and artificial intelligence will facilitate predictive maintenance, quality control and demand forecasting. In addition, human-machine interaction will be supported through cooperative robots, and employee training programs can be planned with augmented reality.

The fifth and final phase involves the establishment of performance monitoring and adaptation mechanisms to ensure continuous improvement of the system. By monitoring key performance indicators with real-time data obtained from the Internet of Things sensors, anomalies will be detected and performance evaluations will become possible. Thanks to artificial intelligence-based reinforcement learning algorithms, the system will update itself and decision-making processes will become dynamic.

Discussion and Conclusion

The developed model makes significant contributions to both academic literature and the field of practice. From an academic perspective, the model is the first holistic artificial intelligence-supported framework that addresses reshoring decisions in a multidimensional, data-driven and sustainability-oriented manner, not only based on cost. It also shows that Industry 5.0 technologies can be integrated not only into production processes but also into strategic decision-making processes.

For practitioners, the model offers a powerful strategic tool to increase operational efficiency, improve inventory management, shorten delivery times, increase production quality, reduce risks and achieve sustainability goals. The model, which has high applicability especially in sectors such as energy, automotive, healthcare, agriculture and logistics, can be tested under different scenarios, revealing a

wide range of applications. For policymakers, the model provides a strategic roadmap for promoting domestic production, strengthening digital transformation infrastructure and establishing regulations in line with green economy goals.

However, there are some limitations in applying the model. It may take time to roll out technologies, especially in regions with a lack of digital infrastructure. Cybersecurity threats related to blockchain and Internet of Things systems should also be considered. In addition, the digital competency level of the workforce will directly affect the success of the model. Therefore, it is suggested that future research should focus on areas such as field validation of the model, sectoral customization and ethical dimensions of human-robot collaboration.

As a result, this study presents a comprehensive decision support model that addresses reshoring processes with a sustainable and technology-oriented approach that can turn the crises faced in global supply chains into opportunities. By combining different data sources, the model enables decision makers to determine the most appropriate reshoring strategies by performing dynamic scenario analysis. In this context, the use of the model has the potential to significantly impact decision-making processes by enabling companies' to make their reshoring decisions more data-driven, flexible and sustainable. In this way, companies reshoring decisions are supported in various ways. Firstly, simulating production processes through digital twins will improve the accuracy of reshoring decisions. Secondly, machine learning algorithms will be able to predict how production capacity will be managed after reshoring operations and make logistics processes more predictable by enabling secure data sharing along the supply chain. Automated production lines and robot-assisted processes will be able to compensate for local labor costs in the remanufacturing process. Adopting the human-machine collaboration approach of Industry 5.0, this approach will not only increase economic and operational efficiency but also contribute to sustainable production and supply management principles. With the model developed in the study, it aims to provide a new perspective on supply chain management and optimization of reshoring decisions and to provide significant benefits to academic literature and industrial applications.