

Makale Türü: Araştırma Makalesi

DEMATEL YÖNTEMİ İLE ENDÜSTRİ 5.0 KAPSAMINDA LOJİSTİK SİSTEMLERDE İNSAN-MAKİNE İŞ BİRLİĞİNİ ETKİLEYEN KRİTERLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Evaluation of the Criteria Affecting Human-Machine Collaboration in Logistics Systems within the Scope of Industry 5.0 Using the DEMATEL Method

Kısmet CİNGÖZ* 

Yazar Bilgileri

* Dr. Öğr. Üyesi, Tarsus Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik, e-mail: kismetcingoz@tarsus.edu.tr

Anahtar Kelimeler:

DEMATEL

Çok Kriterli Karar Verme

İnsan-Makine İş Birliği

Lojistik 5.0

Endüstri 5.0

ÖZ

Endüstri 5.0 yaklaşımı, insan merkezli üretim ve hizmet sistemlerini ön plana çıkararak insan ve akıllı teknolojiler arasındaki iş birliğinin önemini artırmaktadır. Lojistik sektöründe otomasyon sistemleri, robotik uygulamalar ve akıllı teknolojilerin yaygınlaşması, insan-makine etkileşiminin etkin şekilde yönetilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda lojistik sistemlerde insan-makine iş birliğini etkileyen faktörlerin belirlenmesi ve bu faktörler arasındaki ilişkilerin ortaya konulması önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmanın amacı, Endüstri 5.0 yaklaşımı çerçevesinde lojistik sistemlerde insan-makine iş birliğini etkileyen temel kriterleri belirlemek ve bu kriterler arasındaki nedensel ilişkileri analiz etmektir. Araştırmada, kriterler arasındaki etkileşimleri ortaya koymak amacıyla çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda insan-makine iş birliğini etkileyen kriterler belirlenmiş, ardından kriterler arasındaki doğrudan etki ilişkilerini değerlendirmek amacıyla DEMATEL yöntemi uygulanmıştır. DEMATEL analizi sayesinde kriterlerin etkileme ve etkilenme düzeyleri belirlenmiş, ayrıca kriterler arasındaki neden-sonuç ilişkileri ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, lojistik sistemlerde insan-makine iş birliği üzerinde özellikle insan odaklı faktörlerin belirleyici olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, çalışanların öğrenme süreçleri, teknolojiye yönelik tutumları ve bilişsel iş yükü gibi faktörlerin insan-makine etkileşiminin etkinliğinde önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, Endüstri 5.0 kapsamında lojistik sistemlerde insan merkezli teknolojik dönüşüm süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Author Information

* Asist. Prof. Dr., Tarsus University, Faculty of Applied Sciences, International Trade and Logistics, e-mail: kismetcingoz@tarsus.edu.tr

Keywords:

DEMATEL

Multi Criteria Decision Making

Human-Machine Collaboration

Logistics 5.0

Industry 5.0

ABSTRACT

The Industry 5.0 approach emphasizes human-centered production and service systems, increasing the importance of collaboration between humans and smart technologies. The widespread adoption of automation systems, robotic applications, and smart technologies in the logistics sector necessitates the effective management of human-machine interaction. In this context, identifying the factors affecting human-machine collaboration in logistics systems and revealing the relationships between these factors has become an important research topic. The aim of this study is to identify the key criteria affecting human-machine collaboration in logistics systems within the framework of the Industry 5.0 approach and to analyze the causal relationships among these criteria. In the study, the DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) method, one of the multi-criteria decision-making methods, was used to reveal the interactions between the criteria. First, criteria affecting human-machine collaboration were identified based on a literature review and expert opinions, and then the DEMATEL method was applied to evaluate the direct impact relationships among the criteria. Through the application of the DEMATEL analysis, the degrees to which the criteria influence and are influenced by one another were systematically determined, and the cause-and-effect relationships between the criteria were also revealed. The findings obtained indicate that human-centered factors are particularly decisive in human-machine collaboration within logistics systems. The results reveal that factors such as employees' learning processes, attitudes toward technology, and cognitive workload play a significant role in the effectiveness of human-machine interaction. This study contributes to a better understanding of human-centered technological transformation processes in logistics systems within the framework of Industry 5.0.

Makale Gönderim Tarihi: 08.03.2026

Revizyon Tarihi: 21.03.2026

Kabul Tarihi: 23.03.2026

1.GİRİŞ

Sanayi devrimleri tarihsel süreç boyunca üretim sistemlerini, iş gücü dinamiklerini ve küresel ekonomiyi sürekli olarak yeniden şekillendirmiştir (Yanytska, 2025, s. 5066). Bu evrimin en güncel aşaması olan Endüstri 5.0, Endüstri 4.0'ın siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti (IoT) ve büyük veri analitiği üzerine kurulu dijital temellerini devralırken; bu teknolojileri insan yetenekleriyle harmanlayarak daha anlamlı, uyarlanabilir ve sürdürülebilir üretim modelleri kurmayı hedefleyen bir paradigma değişimidir (Sarışık ve Demir, 2025, s. 50). Endüstri 4.0 öncelikle otomasyon ve sistem verimliliğine odaklanırken Endüstri 5.0; insan merkezilik, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık (resilience) ilkelerini stratejik birer öncelik olarak belirlemiştir (Verma, Chaurasiya ve Kumar, 2024, s. 151). Bu yeni yaklaşım, teknolojiyi insanın yerini alan bir unsur değil, onun yeteneklerini artıran (augmentation) bir iş ortağı olarak konumlandırmaktadır (Yanytska, 2025, s. 5066, Adel ve Alani, 2024, s.1750).

Lojistik sektörü, küreselleşme ve dijital dönüşümle birlikte üretim ve tüketim noktaları arasında köprü kuran hayati bir değer yaratma alanına dönüşmüştür. Ancak geleneksel lojistik sistemleri; düşük bilişim düzeyi, kaynak israfı ve esneklik eksikliği gibi ciddi yetersizliklerle karşı karşıyadır (Oğuz, 2024, s.131-132). Özellikle COVID-19 pandemisi, aşırı otomatize edilmiş ve katı yapıdaki sistemlerin beklenmedik krizler karşısındaki kırılganlığını ortaya koymuştur (Ghobakhloo, Mahdiraji, Iranmanesh ve Jafari-Sadeghi, 2024, s. 22). Bu bağlamda akıllı lojistik dönüşümü kaçınılmaz bir eğilim haline gelmiş ve Endüstri 5.0 yaklaşımı, lojistik operasyonlara esneklik kazandırmak amacıyla insan ve makinenin entegrasyonunu teşvik etmeye başlamıştır (Akundi, Euresti, Luna, Ankobiah, Lopes ve Edinbarough, 2022, s. 7).

Endüstri 5.0 vizyonunda insan unsuru operasyonel maliyet olarak değil, sistemin yaratıcılığını ve problem çözme yeteneğini artıran kritik bir yatırım olarak görülmektedir (Sheikh, Ahmed, Faqih ve Shehawy, 2025, s. 16006). Bu yeni dönemde, "Operatör 5.0" olarak adlandırılan çalışanlar siber-fiziksel sistemler, yapay zekâ (AI) ve işbirlikçi robotlar (kobotlar) ile senkronize bir şekilde çalışarak lojistik süreçlerin hem operasyonel verimliliğini hem de iş kalitesini artırmaktadır (Verma ve diğerleri, 2024, s. 153; Xu, Lu, Vogel-Heuser ve Wang, 2021, s. 553). Kobot, paylaşımlı bir çalışma alanında insanlarla fiziksel etkileşim kurmak ve doğrudan iş birliği yapmak üzere tasarlanmış akıllı robotlardır (Dhar ve Saha, 2025, s. 2). Kobotlar, fiziksel olarak zorlayıcı ve tekrarlayan görevleri üstlenirken; insanlar eleştirel düşünme, etik karar alma ve yaratıcılık gerektiren süreçlere odaklanmaktadır (Rijwani ve diğerleri, 2025, s.677; Sheikh ve diğerleri, 2025, s. 16012). Ancak, bu denli yakın bir etkileşim güven inşası, bilişsel iş yükü yönetimi, ergonomik tasarım ve çalışan refahı gibi çok boyutlu kriterlerin analiz edilmesini zorunlu kılmaktadır (Passalacqua ve diğerleri, 2025, s. 2638).

Bu noktada, literatürde karmaşık sistemlerin yapısını analiz etmek ve kriterler arasındaki ilişkileri anlamlandırmak amacıyla Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerine başvurulmaktadır (Hsu, Chen, Huang ve Li, 2024, s.1). Bu yöntemler arasında DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) yöntemi, özellikle kriterler arasındaki mantıksal ve nedensel ilişkileri belirleme, etkileşim derecelerini ölçme ve kriterleri "sebebe" ve "sonuç" gruplarına ayırma yeteneği ile öne çıkmaktadır. DEMATEL yöntemi, lojistik gibi çok boyutlu sistemlerdeki belirsizlikleri yönetmek ve kriterlerin sistem içindeki önem derecesini belirlemek için etkili bir araçtır.

Bu kapsamda çalışmanın temel amacı, Endüstri 5.0 yaklaşımı çerçevesinde lojistik sistemlerde insan-makine iş birliğini etkileyen temel kriterleri belirlemek ve bu kriterlerin önem dereceleri ile kriterler arasındaki ilişkileri DEMATEL yöntemi ile açıklamaktır. Literatürde lojistik sistemlerin Endüstri 5.0'a geçişi üzerine yapılan çalışmalar

henüz gelişim aşamasındadır ve özellikle insan-makine iş birliğini doğrudan etkileyen kriterlerin sistematik olarak değerlendirilmesine ve bu kriterler arasındaki ilişkilerin araştırılmasına yönelik çalışmalar kısıtlıdır. Bu doğrultuda çalışma, akıllı lojistik dönüşümünü gerçekleştirmek isteyen karar vericiler için bilimsel bir çerçeve ve yol haritası sunmayı hedeflemektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Endüstri 4.0, temel olarak siber-fiziksel sistemler, IoT ve büyük veri analitiği aracılığıyla üretimde dijitalleşme ve otomasyona odaklanmış bir sanayi devrimidir. Ancak bu yaklaşım, sistem verimliliğine ve teknolojik gelişime dar bir odakla yaklaştığı için insan faktörünü ve toplumsal refahı çoğu zaman ihmal etmiştir (Neumann, Winkelhaus, Grosse ve Glock, 2021, s. 5). Endüstri 5.0, bu eksiklikleri gidermek amacıyla Avrupa Komisyonu tarafından 2021 yılında resmen tanımlanmıştır ve teknolojiyi insanın yerine geçen değil, insanı destekleyen bir araç olarak yeniden konumlandırmıştır (Sarıışık ve Demir, 2025, s. 51). Endüstri 5.0 yaklaşımı, Endüstri 4.0'ın teknoloji ve otomasyon odaklı yapısını tamamlayarak; insan merkezlik, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık ilkelerini üretimin ve lojistiğin merkezine yerleştirmektedir (Durugbo, 2025, s. 6920; Monferdini, Tebadi ve Bottani, 2025, s. 2941). Lojistik sektörü, Endüstri 5.0'ın etkisiyle geleneksel, katı ve kaynak israfına yol açan yapılardan; esnek, uyarlanabilir ve akıllı sistemlere dönüşmektedir (Hsu ve diğerleri, 2024, s.2). Akıllı lojistik, IoT, bulut bilişim ve yapay zekâ gibi ileri teknolojilerin lojistik süreçlere entegre edilerek operasyonel şeffaflığın ve verimliliğin artırılmasıdır (Barykin ve diğerleri, 2023, s. 8). Endüstri 5.0 çerçevesinde lojistik, sadece mal taşımacılığı değil, pazarın çeşitlenen ihtiyaçlarına anlık yanıt verebilen, insan-makine iş birliğine dayalı stratejik bir değer zinciri haline gelmektedir.

Bu kapsamda, dijitalleşme ve optimizasyona vurgu yaparak özelleştirilmiş dağıtım, taşıma, stok yönetimi ve depolama için akıllı lojistik sistemlerine odaklanan ve Lojistik 5.0 olarak adlandırılan yeni bir paradigma geliştirilmiştir. Lojistik 5.0 akıllı sistemleri sadece verimlilik artışı için değil, aynı zamanda insan refahını ve çevresel değerleri korumak amacıyla kullanmayı hedeflemektedir (Andres, Diaz-Madronero, Soares ve Poler, 2024, s. 43889).

Lojistik 5.0'ı geleneksel ve dijital lojistik yaklaşımlarından ayıran üç ana temel bulunmaktadır. Bunlardan ilki insan makine iş birliğidir. İnsan-makine iş birliği, makinelerin insanı ikame etmesi değil insanın yeteneklerini arttırmak için bir araç olarak kullanarak (Jefroy, Azarian ve Yu, 2022, s. 17) insanın yaratıcılığı ve problem çözme yeteneği ile makinelerin hızı ve hassasiyetinin sinerjik bir birleşimidir (Pizoñ ve Gola, 2023, s. 3). Literatür, başarılı bir insan-makine iş birliğinin sadece teknolojik yeterlilikle değil, bir dizi karmaşık kriterle mümkün olduğunu vurgulamaktadır (Panter, Leder, Keiser ve Freitag, 2024, s. 1164). Operatörün otomasyona duyduğu güven, sistemin etkin kullanımı için temel bir şarttır (Romero ve diğerleri, 2016, s. 36). Bu güven, yapay zekâ algoritmalarının açıklanabilir ve şeffaf olmasıyla inşa edilmektedir (Passalacqua ve diğerleri, 2025, s. 2650; Panter ve diğerleri, 2024, s. 1167). Benzer şekilde, operatörün süreç üzerinde kontrol sahibi olması ve teknoloji tarafından desteklenerek karar alma yetkisinin artırılması iş tatmini ve motivasyonu artırmaktadır (Sheikh ve diğeri, 2025, s. 15998). Yapay zekâ sistemlerinin etik kurallara uygunluğu ve insan ile makinenin birbirinden sürekli öğrendiği karşılıklı öğrenme (RHML) süreçleri de iş birliğinin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır (Petzoldt ve diğerleri, 2022, s. 645). Benzer şekilde lojistik operasyonlarda kullanılan kobotlar, ağır ve tehlikeli görevleri üstlenerek insanın daha katma değerli işlere odaklanmasını sağlamaktadır (Sheikh ve diğeri, 2025, s. 16012; Hoc, 2000, s. 833).

İkinci ana temel sürdürülebilirliktir. Sürdürülebilirlik, çevresel sınırları gözeterek lojistik süreçlerin karbon ayak izini azaltmayı, enerji verimliliğini artırmayı ve atıkları minimize etmeyi amaçlamaktadır (Boz ve Pinto, 2024, s. 165). Diğer bir temel ise dayanıklılıktır. Dayanıklılık, pandemiler, doğal afetler veya jeopolitik krizler gibi beklenmedik aksamalara karşı tedarik zincirinin hızlıca toparlanabilme ve uyum sağlama kapasitesini ifade etmektedir (Machado ve Rodriges, 2025, s. 171).

Bu doğrultuda yapılan literatür araştırmasına göre lojistik sistemlerde insan-makine iş birliğini ve etkileşimini değerlendiren çalışmalar değerlendirildiğinde; çalışmaların Endüstri 5.0'ın getirdiği insan odaklılık, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık ilkeleri doğrultusunda çeşitlendiği görülmektedir.

Nixdorf ve diğerleri (2026), insan-makine iş birliğinde karşılıklı öğrenme süreçlerini haritalandırmayı amaçladıkları çalışmalarında, sistematik bir literatür incelemesi (SLR) gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada karşılıklı öğrenme (RHML) prensipleri altında; sistem bileşimi, etkileşim biçimleri (iletişim ve geri bildirim), görev tahsisi/sıralama ve öğrenme çıktıları temel kriterler olarak analiz edilmiştir.

Monferdini ve diğerleri (2025) Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0'ın lojistik yönetimi üzerindeki birleşik etkisini inceledikleri çalışmalarında bibliyometrik analiz yöntemi kullanılmıştır. Değerlendirmede; ergonomi, insan faktörleri, çalışan eğitimi, bilişsel esenlik, operasyonel verimlilik ve sürdürülebilirlik kriterleri ön plana çıkarılmıştır. Çalışmada, Endüstri 4.0 teknolojilerinin izlenebilirlik ve müşteri memnuniyetinde önemli iyileşmeler sağladığı, Endüstri 5.0'ın ise bu temelin üzerine insan-teknoloji entegrasyonunu ekleyerek operasyonel verimliliği en üst düzeye çıkardığı sonucuna ulaşmışlardır.

Karim, Balijepalli ve Whiteing (2025), depo operasyonlarında insan-makine etkileşimlerinin sistem yapısı üzerindeki etkisini incelemeyi amaçladıkları çalışmalarında Delphi benzeri bir yaklaşım ve nitel Sistem Dinamiği (Neden-Sonuç Döngü Diyagramları) yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmada stres, bilişsel iş yükü (zihinsel ve fiziksel), motivasyon, iş tatmini ve hata oranları kriterleri ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, teknolojik eğitimin çalışanların bilgi açığını kapattığını ve insan-makine iş birliğinin iş yükünü optimize ederek hem üretkenliği hem de çalışan esenliğini artırdığını ortaya koymuştur.

Islam, Sepanloo, Woo, Woo ve Son (2025), Endüstri 4.0'dan 5.0'a geçiş sürecinde teknoloji ve insan-makine iş birliğinin kesişim noktasındaki fırsat ve zorlukları inceledikleri çalışmalarında kavramsal inceleme ve literatür taraması yöntemini kullanarak ergonomi, güvenlik, işçi refahı, etik muhakeme ve bilişsel yük kriterlerini ele almışlardır. Araştırmanın sonuçları, yapay zekâ ve artırılmış gerçeklik gibi teknolojilerin insanı ikame etmek yerine onun karar verme süreçlerini desteklemesi gerektiğini ve çalışanların ruh sağlığına odaklanan girişimlerin yenilikçiliği ve üretkenliği artırdığını göstermektedir.

Hsu ve diğerleri (2024), Lojistik 5.0'ın gelişimini destekleyen itici faktörleri belirlemeyi ve bu faktörleri önem sırasına koymayı amaçladıkları çalışmalarında Bulanık Delphi yöntemi kullanarak 15 itici faktör belirlenmiştir. Sonrasında yazarlar Gri-DEMATEL yöntemi ile bu itici faktörler arasındaki nedensel ilişkileri ortaya koymuşlardır. Çalışmada beceri eğitimi, insan-robot uyumu, çalışan refahı ve esenliği, akıllı ve dostane iş yerleri, teknolojinin çalışan çeşitliliğine uyulanabilirliği ve yönetim taahhüdü gibi kriterler ele alınmıştır. Çalışma sonucunda hükümetin politikaları desteği ve lojistik standardizasyonu ve altyapı geliştirme faktörlerinin, akıllı lojistik dönüşümü için en kritik ve öncelikli iticiler olduğu sonucuna varmışlardır.

Panter ve diğerleri (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Endüstri 5.0 çerçevesinde İnsan-Makine Arayüzü (HMI) gereksinimlerini ve tasarım kılavuzlarını belirlemek amaçlanmıştır. Çalışmada, literatür incelemesi

ve vaka çalışması yöntemini kullanılmıştır. Ele alınan ana kriterler arasında etik ilkeler, ergonomi, uyarlanabilirlik, insan merkezli tasarım, sezgisel etkileşim ve etkili iş birliği yer almaktadır.

Boz ve Pinto (2024), Lojistik 5.0'ın temel bileşenlerini Lojistik 4.0 ile karşılaştırarak değerlendirmeyi amaçladıkları çalışmada, karşılaştırmalı değerlendirme yöntemini kullanmışlardır. Kriter olarak insan-robot etkileşimi, yeşil lojistik, yaşam kalitesi (hız ve güvenilirlik), çalışan psikolojisi ve teknolojiye uyum konularına odaklanılmıştır. Çalışma sonucunda, Lojistik 5.0'ın Lojistik 4.0'ın bir uzantısı olduğunu ve en temel farkın çevre koruma ve insan merkezli hizmetlere verilen aşırı önem olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma, Endüstri 5.0 ile birlikte teknolojik işsizlik kaygısının yerini, robotların insanlarla birlikte çalıştığı iş birliği modellerine bıraktığını göstermiştir.

Ranasinghe, Grosse ve Lerher (2024), çalışmalarında yaşanan iş gücünün Endüstri 5.0 kapsamındaki üretim ve lojistik sistemlerine entegrasyonunu incelemeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla Sistematik Literatür Taraması (SLR) yöntemini kullanan yazarlar, Scopus ve Web of Science veri tabanlarından seçilen 19 ampirik makaleyi analiz etmişlerdir. Çalışmada algısal, fiziksel, bilişsel ve psikososyal insan faktörleri temel kriterler olarak ele alınmıştır. Araştırma sonucunda, kobotların fiziksel zorlanmayı azalttığı ancak yaşlı çalışanlar için daha sezgisel arayüzler ve sürekli eğitim programlarının zorunlu olduğu; Endüstri 5.0 hedeflerine ulaşmak için otomasyonun insan becerileriyle kapsayıcı bir şekilde dengelenmesi gerektiği ortaya konmuştur.

Teoman (2024), Endüstri 5.0 ilkeleri çerçevesinde insan merkezli bir tedarik zinciri yapılandırması için stratejik ve teknolojik gereksinimleri belirlemeyi amaçladığı çalışmada son beş yıla ait literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada insan odaklı teknolojik tasarım, insan-makine etkileşimi, insan-robot, insan merkezli otomasyon ve müşteri merkezli tedarik zinciri gibi stratejik kriterler ve dijital ikiz, blokzincir, işbirlikçi robotlar, katmanlı imalat gibi teknolojiler insan merkezli tedarik zinciri yapılandırmasında önemli kriterler olarak öne çıkmıştır. Çalışmanın sonuçları, insan-robot iş birliğinin sadece operasyonel verimliliği artırmakla kalmayıp aynı zamanda çalışan refahını merkeze alan ve iş kazası risklerini minimize eden bir dönüşüm sağladığını göstermektedir.

Grosse, Sgarbossa, Berlin ve Neumann (2023), Endüstri 4.0'dan Endüstri 5.0'a geçişte lojistik sistem tasarımını insan merkezli bir bakış açısıyla ele aldıkları çalışmada, içerik analizi ve kavramsal çerçeve oluşturma yöntemini kullanmıştır. Çalışan esenliği, dayanıklılık, destekleyici teknolojiler (AR, kobotlar) ile algısal, bilişsel ve fiziksel iş yükü temel değerlendirme kriterleri olarak belirlenmiştir. Endüstri 4.0'ın sadece teknoloji odaklı yaklaşımının çalışan refahını artırmada yetersiz kaldığı, Endüstri 5.0'ın ise daha sistemik ve etik odaklı bir yapı sunarak bu boşluğu doldurduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Trstenjak, Opetuk, Dukic ve Canjer (2022), Lojistik 5.0 unsurlarının uygulanması için bir karar destek modeli geliştirmeyi amaçladıkları çalışmada Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi uygulanmıştır. Araştırmada başlangıç yatırımı, yatırımın geri dönüş süresi, uygulama karmaşıklığı, motivasyon, iletişim kanalları ve çalışanların değişime istekliliği gibi operasyonel ve psikososyal kriterler değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, şirketlerin dijital dönüşümden ziyade yeşil lojistik unsurlarını (enerji verimliliği vb.) uygulamaya daha açık oldukları sonucuna varmışlardır. Geliştirilen modelde, kullanılmadığında bilgisayarların kapatılması gibi basit yeşil uygulamaların, düşük yatırım maliyeti nedeniyle yeşil depolamada en yüksek önceliğe sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Habib, Pacaux-Lemoine, Berdal ve Trentesaux (2021), iş organizasyonunun performans ve iş yükü üzerindeki etkisini değerlendirdikleri çalışmada deneysel çalışma ve NASA-TLX yöntemi kullanılmıştır. Araştırmanın ana

kriterleri; bilişsel iş yükü, durumsal farkındalık, kullanılabilirlik ve iş birliği bilgisi (know-how-to-cooperate) olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, akıllı sistemlerin insanın yerini alması yerine onu desteklemesi (augmentation) gerektiğini ve etkileşim kalitesinin ancak performans, dijitalleşme ve insan esenliği arasında kurulan denge ile mümkün olacağını ortaya koymuşlardır.

Klumpp (2018) lojistikte insan-bilgisayar etkileşiminin (HCI) rolünü ve gereksinimlerini analiz etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, disiplinler arası analiz ve simülasyon yöntemini kullanılmıştır. İnsan sezgisi, teknoloji kabulü (TAM), özyeterlilik, reaksiyon hızı, algılanan fayda/kullanım kolaylığı ve güven kriterleri üzerinde durulmuştur. Çalışma sonucunda hem insanın sezgisini hem de makinenin veri işleme gücünü birleştiren hibrit karar modellerinin, sadece insan veya sadece robot odaklı yaklaşımlardan daha verimli sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Çalışmaların ortak noktası, lojistik sistemlerdeki başarının sadece teknolojik verimlilikle değil psikososyal faktörlerin yönetimi, bilişsel yükün dengelenmesi ve insan-makine arasında karşılıklı bir öğrenme ortamının yaratılması ile mümkün olduğunu vurgulamasıdır.

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda Endüstri 5.0 yaklaşımı çerçevesinde lojistik sistemlerde insan-makine iş birliğine etki eden kriterler aşağıda tanımlanmıştır.

Ergonomik uyumluluk (C1), sistem tasarımı ile insan fiziksel ve bilişsel özellikleri arasındaki uyumu yansıtır ve hataları azaltmak ve performansı artırmak için kritik öneme sahiptir (Grosse ve diğerleri, 2023; Romero, Stahre ve Taisch, 2020; Dul ve diğerleri, 2012). Bilişsel iş yükü (C2), karar verme süreçlerinde operatörler üzerinde oluşan zihinsel talepleri ele alır; çünkü aşırı iş yükü karar kalitesini düşürebilir (Endsley, 2017; Longo, Padovano ve Umbrello, 2020). Operatör yorgunluğu (C3), sürekli insan-makine etkileşiminin dikkat ve güvenilirlik üzerindeki uzun vadeli etkilerini hesaba katar (Grosse ve diğerleri 2023). İnsan müdahale süresi (C4), özellikle anormal koşullar altında, insanların otomatik veya yarı otonom lojistik sistemlerine müdahale etme hızını ve etkinliğini temsil eder (Parasuraman, Sheridan ve Wickens, 2000). Çalışan kabulü (C5), operatörlerin/kullanıcıların akıllı lojistik sistemlerini benimseme ve bunlara güvenme istekliliğini yansıtır; bu da başarılı bir uygulama için kritik bir ön koşuldur (Passalacqua ve diğerleri, 2025). Hayat boyu öğrenme (C6), operatörlerin yapay zekâ, IoT ve robotik sistemlerle uyumlu çalışabilmesi için sürekli teknik eğitim alması ve bilgilerini güncellemesi bir zorunluluktur (Hsu ve diğerleri, 2024). Karşılıklı öğrenme (C7), insan-makine iş birliğinde bir diğer önemli kriterdir. İnsanların makinelerle yeni görevleri öğretmesi (HITL - human-in-the-loop), makinelerin ise topladıkları verilerle insana karar desteği sağlaması (CITL - computer-in-the-loop) yoluyla çift yönlü bir öğrenme süreci hedeflenmektedir (Nixdorf ve diğerleri, 2026).

3.YÖNTEM

Karar verme süreçlerinde birden fazla kriterin bulunduğu karmaşık problemlerde kriterler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi önemli bir gerekliliktir. Özellikle sistem içerisindeki faktörlerin birbirlerini nasıl etkilediğini ortaya koymak, karar vericilerin daha doğru ve etkin kararlar almasına yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen yöntemlerden biri DEMATEL yöntemidir. DEMATEL yöntemi ilk olarak 1970'li yıllarda Battelle Memorial Institute tarafından geliştirilmiş ve karmaşık sistemlerdeki kriterler arasındaki nedensel ilişkileri açıklamak için kullanılmaktadır (Amiri, Sadaghiyani, Payani ve Shafieezadeh, 2011, s. 281).

DEMATEL yöntemi, çok kriterli karar verme teknikleri içerisinde yer almakta olup özellikle karmaşık problemler içerisindeki faktörler arasındaki doğrudan ve dolaylı ilişkileri ortaya koyarak sistemin yapısal analizini

gerçekleştirmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde bir sistemde yer alan kriterlerin birbirleri üzerindeki etkileri belirlenebilmekte, kriterler arasındaki etkileşimler analiz edilerek nedensel ilişkiler görselleştirilebilmektedir (Zhang ve Deng, 2019, s. 8209). DEMATEL yöntemi aynı zamanda faktörler arasındaki etkileşim yoğunluğunu da ortaya koyarak sistemdeki ilişkilerin görsel olarak ifade edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda yöntem, faktörler arasındaki ilişkileri matrisler aracılığıyla analiz etmekte ve sonuçları bir sebep-sonuç diyagramı şeklinde sunmaktadır. Bu diyagram sayesinde sistemdeki kriterlerin önem dereceleri ve birbirleriyle olan ilişkileri daha kolay anlaşılabilir (Chen, 2012, s. 27). Yöntemin uygulama aşamaları aşağıdaki gibidir (Tzeng, Chiang ve Li, 2007, s. 1035; Liou, Tzeng ve Chang, 2007, s. 244-245);

Doğrudan İlişki Matrisinin Oluşturulması: uzmanlar her bir kriter i'nin her bir kriter j üzerindeki doğrudan etkisini x_{ij} ile gösterildiği gibi 0 ile 4 (0- hiç etki yok, 1-düşük etki var, 2- orta etki, 3- yüksek etki, 4-çok yüksek etki) arasında değişen bir tamsayı ölçeği kullanarak değerlendirmeleri istenmektedir (Braga ve diğerleri, 2021, s. 5). Birden fazla uzmanın katıldığı uygulamalarda uzmanların görüşlerinin ortalaması alınır. Böylece doğrudan ilişki matrisi X oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & x_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1n} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Normalize Edilmiş Direkt İlişki Matrisinin (M) Oluşturulması: direkt ilişki matrisinin normalize edilmesi için Denklem (2) ve Denklem (3) kullanılır. İlk olarak matrisin tüm satır ve sütunlarının toplamı hesaplanır. Satır ve sütun toplamlarının en büyük değeri k ile gösterilebilir. Sonrasında, doğrudan ilişki matrisinin her elemanının k'ye bölünmesi ile direkt ilişki matrisi normalize edilir.

$$k = \max \left\{ \max \sum_{j=1}^n x_{ij}, \sum_{i=1}^n x_{ij} \right\} \quad (2)$$

$$M = \frac{1}{k} * X \quad (3)$$

Toplam İlişki Matrisinin Hesaplanması: Öncelikle uygulamada ele alınan kriter sayısı boyutunda birim matris oluşturulur. Sonrasında oluşturulan birim matris normalize edilmiş direkt ilişki matrisinden çıkarılır ve tersi alınır. Elde edilen bu matris ile normalize edilmiş matris çarpılır ve toplam ilişki matrisi (T) elde edilir. Bu işlemler Denklem (4)'te gösterilen formül yardımı ile gerçekleştirilir.

$$T = M \times (I - M)^{-1} \quad (4)$$

Gönderici ve Alıcı Grubun Hesaplanması: Gönderici ve alıcı gruplar Denklem (5), Denklem (6), ve Denklem (7) kullanılarak hesaplanmaktadır. T matrisindeki sütunlar toplamı D ile, satırlar toplamı ise R ile ifade edilmektedir. D ve R değerleri hesaplandıktan sonra D+R ve D-R değerleri hesaplanmaktadır. D-R'de pozitif değere sahip olan kriterler diğer kriterler üzerinde daha yüksek etkiye sahiptir. Bu kriterler gönderici kriterler olarak adlandırılır. D-R

değeri negatif olan kriterler ise diğer kriterlerden daha çok etkilenir. D+R değeri ise bir kriterin diğer kriterler ile arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$T = [t_{ij}]_{n \times n^1} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$D = \left[\sum_{j=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1} \quad (6)$$

$$R = \left[\sum_{i=1}^n t_{ij} \right]' \quad (7)$$

Denklem (8) ve Denklem (9) kullanılarak kriter ağırlıkları hesaplanır.

$$w_i = \sqrt{(D_i + R_i)^2 + (D_i - R_i)^2} \quad (8)$$

$$W_i = \frac{w_1}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (9)$$

4.ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışma kapsamında 3 lojistik firması yöneticisi uzman olarak kriterleri değerlendirmişlerdir. Uzmanların yaptıkları değerlendirmeler ile her bir uzman tarafından ilişki matrisi oluşturulmuştur. Sonrasında 3 uzman görüşünün aritmetik ortalaması alınarak doğrudan ilişki matrisi oluşturulmuştur. Doğrudan ilişki matrisi Tablo 1’de sunulduğu gibidir.

Tablo 1. Doğrudan İlişki Matrisi

	Ergonomik uyumluluk	Bilişsel iş yükü	Operatör yorgunluğu	İnsan müdahale süresi	Çalışan kabulü	Hayat Boyu Öğrenme	Karşılıklı Öğrenme
Ergonomik uyumluluk	0	2,333	4	2,667	2,667	0	0,667
Bilişsel iş yükü	0	0	2,667	3	3,667	2	2
Operatör yorgunluğu	0	2,667	0	4	2	2,333	2,333
İnsan müdahale süresi	1	1	0	0	0	1	1
Çalışan kabulü	2,667	2	2,667	3	0	3,667	3,667
Hayat Boyu Öğrenme	4	3	3,667	3	4	0	4
Karşılıklı Öğrenme	4	2	1,333	3,333	4	3,333	0

İşlem adımları doğrultusunda doğrudan ilişki matrisinin satır ve sütunları toplanır. Sonrasında bu toplam değerlerinden en büyüğü seçilir ve doğrudan ilişki matrisinde yer alan her değer en büyük satır/sütun toplam değerine bölünür. Böylece toplam ilişki matrisi oluşturulmuş olur. Normalize edilmiş doğrudan ilişki matrisi Tablo 2’de sunulduğu gibidir.

Tablo 2. Normalize Edilmiş Doğrudan İlişki Matrisi

	Ergonomik uyumluluk	Bilişsel iş yükü	Operatör yorgunluğu	İnsan müdahale süresi	Çalışan kabulü	Hayat Boyu Öğrenme	Karşılıklı Öğrenme
Ergonomik uyumluluk	0,000	0,108	0,185	0,123	0,123	0,000	0,031
Bilişsel iş yükü	0,000	0,000	0,123	0,138	0,169	0,092	0,092
Operatör yorgunluğu	0,000	0,123	0,000	0,185	0,092	0,108	0,108
İnsan müdahale süresi	0,046	0,046	0,000	0,000	0,000	0,046	0,046
Çalışan kabulü	0,123	0,092	0,123	0,138	0,000	0,169	0,169
Hayat Boyu Öğrenme	0,185	0,138	0,169	0,138	0,185	0,000	0,185
Karşılıklı Öğrenme	0,185	0,092	0,062	0,154	0,185	0,154	0,000

Denklem (4) kullanılarak toplam ilişki matrisi oluşturulmuştur. Denklemden de anlaşılacağı üzere, birim matristen normalize edilmiş ilişki matrisi çıkarılır ve elde edilen matrisin tersi alınır. Sonrasında elde edilen matris ile normalize edilmiş doğrudan ilişki matrisi çarpılır. Bu sayede toplam ilişki matrisi elde edilmiş olunur. Toplam ilişki matrisi Tablo 3'te gösterildiği gibidir.

Tablo 3. Toplam İlişki Matrisi

	Ergonomik uyumluluk	Bilişsel iş yükü	Operatör yorgunluğu	İnsan müdahale süresi	Çalışan kabulü	Hayat Boyu Öğrenme	Karşılıklı Öğrenme
Ergonomik uyumluluk	1,102	0,228	0,297	0,303	0,258	0,137	0,170
Bilişsel iş yükü	0,150	1,154	0,268	0,348	0,332	0,247	0,258
Operatör yorgunluğu	0,143	0,256	1,148	0,375	0,261	0,249	0,259
İnsan müdahale süresi	0,092	0,094	0,058	1,071	0,067	0,090	0,095
Çalışan kabulü	0,305	0,290	0,327	0,416	1,249	0,349	0,366
Hayat Boyu Öğrenme	0,383	0,365	0,407	0,471	0,452	1,240	0,416
Karşılıklı Öğrenme	0,356	0,288	0,282	0,425	0,405	0,332	1,217

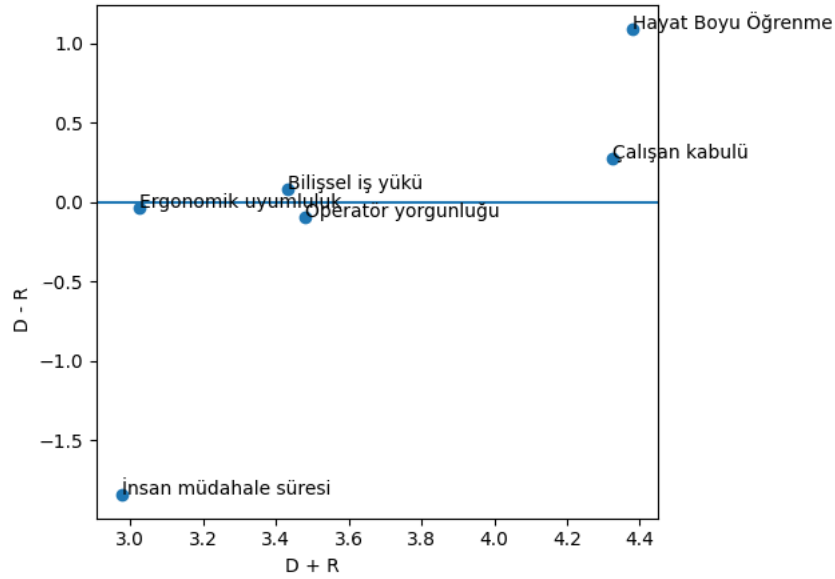
Denklem (6) ve Denklem (7) kullanılarak satır toplamaları (R) ve sütun toplamaları (D) değerleri elde edilir. Sonrasında her bir kriter için D+R ve D-R değerleri hesaplanır. Devam eden kısımda Denklem (8) ve Denklem (9) kullanılarak değerlendirilen kriterlerin ağırlıkları hesaplanır. D+R ve D-R değerleri ile kriterlerin ağırlıkları (w) Tablo 4'teki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 4. D+R ve D-R Değerleri ile Kriterlerin Ağırlıkları (w)

	D	R	D+R	D-R	w
Ergonomik uyumluluk	1,495	1,531	3,026	-0,036	0,115
Bilişsel iş yükü	1,757	1,675	3,432	0,082	0,130
Operatör yorgunluğu	1,692	1,787	3,479	-0,096	0,132
İnsan müdahale süresi	0,567	2,409	2,977	-1,842	0,133
Çalışan kabulü	2,301	2,023	4,325	0,278	0,164
Hayat Boyu Öğrenme	2,735	1,644	4,379	1,090	0,171
Karşılıklı Öğrenme	2,308	1,782	4,090	0,526	0,156

Bu çalışmada Endüstri 5.0 yaklaşımı çerçevesinde lojistik sistemlerde insan-makine iş birliğini etkileyen kriterler arasındaki ilişkileri ortaya koymak amacıyla DEMATEL yöntemi uygulanmıştır. Analiz sonucunda her bir kriter için R (etkileme derecesi), D (etkilenme derecesi), D+R (toplam ilişki düzeyi) ve D-R (neden-sonuç ilişkisi)

değerleri hesaplanmıştır. DEMATEL yönteminde özellikle D–R değerleri, kriterlerin sistem içerisinde neden (etkileyen) ya da sonuç (etkilenen) faktörler olarak sınıflandırılmasına imkân sağlamaktadır. D–R değeri pozitif olan kriterler etkilenen (sonuç) faktörleri, negatif olan kriterler ise etkileyen (neden) faktörleri temsil etmektedir. Tablo 4’te yer alan D+R ve D-R değerlerine göre hazırlanan ilişki matrisi Şekil 1’de sunulduğu gibidir.



Şekil 1. DEMATEL İlişki Diyagramı

Tablo 4’e ve Şekil 1’e göre, kriterlerin toplam ilişki düzeyini gösteren D+R değerleri incelendiğinde, en yüksek D+R değerinin 4,379 ile “Hayat Boyu Öğrenme” kriterine ait olduğu görülmektedir. Bu kriteri sırasıyla “Çalışan kabulü” (4,325), “Karşılıklı Öğrenme” (4,090), “Operatör yorgunluğu” (3,479) ve “Bilişsel iş yükü” (3,432) kriterleri takip etmektedir. Bu sonuçlar, insan-makine iş birliği süreçlerinde özellikle çalışanların sürekli öğrenme yetkinlikleri ile teknolojiyi benimseme düzeylerinin kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Buna karşın “Ergonomik uyumluluk” (3,026) ve “İnsan müdahale süresi” (2,977) kriterlerinin sistem içerisindeki toplam ilişki düzeylerinin diğer kriterlere kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

DEMATEL analizinde D–R değeri negatif olan kriterler sonuç (etkilenen) grubu içerisinde yer almakta olup bu kriterlerin sistem içerisindeki diğer kriterlerden daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Çalışmada operatör yorgunluğu (-0,096), ergonomik uyumluluk (-0,036) ve insan müdahale süresi (-1,842) kriterlerinin sonuç grubunda yer aldığı belirlenmiştir. Sonuç grubunda yer alan kriterler içerisinde insan müdahale süresi ise (-1,842) değeri ile en düşük D–R değerine sahip kriter olarak belirlenmiştir. Bu durum, söz konusu kriterin sistem içerisindeki diğer kriterlerden en fazla etkilenen değişken olduğunu göstermektedir. İnsan müdahale süresi, insan-makine iş birliğinin etkinliğini belirleyen önemli bir performans göstergesi olup operatörün sistemle etkileşim düzeyi, bilişsel iş yükü, operatör yorgunluğu ve çalışanların teknolojiye yönelik yetkinlikleri gibi kriterlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Özellikle Endüstri 5.0 yaklaşımında insanın üretim ve lojistik süreçlerinin merkezinde yer alması, insan müdahale süresinin çalışan yetkinlikleri ve iş tasarımıyla ilgili olarak değişebileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, çalışanların sürekli eğitim ile desteklenmesi, sistem tasarımının kullanıcı dostu hale getirilmesi ve bilişsel iş yükünün dengelenmesi gibi uygulamaların insan müdahale süresini optimize edebileceği değerlendirilmektedir.

Neden-sonuç ilişkileri incelendiğinde hayat boyu öğrenme (D–R=1,090), karşılıklı öğrenme (0,526), çalışan kabulü (0,278) ve bilişsel iş yükü (0,082) kriterlerinin neden grubu içerisinde yer aldığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu kriterlerin diğer kriterleri etkileyen temel belirleyiciler olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle hayat

boyu öğrenme kriterinin en yüksek D-R değerine sahip olması, Endüstri 5.0 ortamında çalışanların sürekli beceri geliştirme ve teknolojiye uyum sağlama kapasitesinin insan-makine iş birliğinin başarısında belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, Endüstri 5.0'in başarısının çalışanların sadece teknik becerilerde değil, aynı zamanda metodolojik ve organizasyonel yetkinliklerde de ustalaşması gerektiği görüşünü desteklemektedir (Cimini ve diğerleri, 2022, s. 3-4). Literatürde, lojistik operasyonların veri odaklı hale gelmesiyle birlikte çalışanların sürekli eğitim (upskilling/reskilling) yoluyla yeni rollere adapte edilmesinin kritik olduğu vurgulanmaktadır (Han, 2025, s. 11031). Karşılıklı öğrenme kriteri literatürde yeni tanımlanan Karşılıklı İnsan-Makine Öğrenmesi (RHML) kavramıyla örtüşmektedir (Nixdorf ve diğerleri, 2026, s. 1561). Literatür, bu çift yönlü öğrenme sürecinin tek yönlü bilgi transferinden (bilgisayar-döngüde veya insan-döngüde) daha verimli olduğunu ve insan-makine etkileşimini güçlendirdiğini savunmaktadır (Nixdorf ve diğerleri, 2026, s. 1579). Çalışan kabulü kriterinin bir diğer temel sebep kriteri olması, literatürdeki Teknoloji Kabul modeli (TAM) ile örtüşmektedir (Han, 2025, s. 11029). Kaynaklar, çalışanların yeni teknolojileri bir tehdit yerine yardımcı olarak görmesinin ancak güven ve şeffaflıkla mümkün olacağını belirtmektedir (Ranasinghe, Grosse ve Lerher, 2024, s. 368). Bilişsel iş yükü kriterinin sebep grubunda yer alması Endüstri 5.0'in bilişsel ergonomiye verdiği önemi doğrulamaktadır. Literatür, aşırı bilgi yüklemesinin operatörlerde zihinsel yorgunluğa ve hata oranlarının artmasına yol açtığını, bu nedenle sistemlerin insan zihinsel kapasitesine uyarlanması gerektiğini savunmaktadır (Dhar ve Saha, 2025, s. 2). Bu bulgu, bilişsel yükün doğru yönetilmesinin, birer "sonuç" faktörü olan operatör yorgunluğunu ve müdahale sürelerini iyileştirmek için öncelikli olarak ele alınması gereken bir girdi olduğunu ortaya koymaktadır.

Kriter ağırlıkları incelendiğinde ise hayat boyu öğrenme ($w=0,171$) kriteri en yüksek ağırlığa sahip kriter olarak belirlenmiştir. Bu kriteri çalışan kabulü (0,164), karşılıklı öğrenme (0,156), insan müdahale süresi (0,133), operatör yorgunluğu (0,132) ve bilişsel iş yükü (0,130) kriterleri takip etmektedir. Ergonomik uyumluluk (0,115) kriteri ise en düşük ağırlığa sahip kriter olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, lojistik sistemlerde insan-makine iş birliğinin etkinliği açısından çalışanların öğrenme yetkinlikleri ve teknolojiyi benimseme düzeylerinin öncelikli kriterler olduğunu göstermektedir.

5.SONUÇ

Endüstri 5.0 yaklaşımının insan merkezli üretim ve lojistik anlayışı doğrultusunda, lojistik sistemlerde insan-makine iş birliğini etkileyen temel kriterlerin belirlenmesi ve bu kriterler arasındaki ilişkilerin ortaya konulması oldukça önemlidir. Günümüzde lojistik operasyonlarında otomasyon sistemleri, akıllı teknolojiler ve robotik uygulamaların kullanımının giderek artması, insan ve makine arasındaki etkileşimin etkin şekilde yönetilmesini kritik bir konu haline getirmiştir.

Bu kapsamda, bu çalışmada Endüstri 5.0 yaklaşımı çerçevesinde lojistik sistemlerde insan-makine iş birliğini etkileyen temel kriterler belirlenmiş ve bu kriterler arasındaki ilişkiler DEMATEL yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. DEMATEL yöntemi sayesinde kriterler arasındaki nedensel ilişkiler ortaya konmuş ve hangi kriterlerin sistemi etkileyen, hangilerinin ise sistemden etkilenen kriterler olduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın bulguları incelendiğinde hayat boyu öğrenme, karşılıklı öğrenme, çalışan kabulü ve bilişsel iş yükü kriterlerinin sistemde neden grubu içerisinde yer aldığı ve diğer faktörleri etkileyen temel belirleyiciler olduğu görülmektedir. Özellikle hayat boyu öğrenme kriterinin hem en yüksek D-R değerine hem de en yüksek ağırlığa

sahip olması, Endüstri 5.0 kapsamında insan-makine iş birliğinin başarısında çalışanların sürekli öğrenme yetkinliklerinin ve yeni teknolojilere uyum sağlama kapasitelerinin kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Bunun yanı sıra çalışanların teknolojiyi benimseme düzeyi de sistemin etkinliğini doğrudan etkileyen önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır.

Diğer taraftan operatör yorgunluğu, ergonomik uyumluluk ve insan müdahale süresi kriterlerinin sonuç grubunda yer aldığı belirlenmiştir. Bu durum söz konusu kriterlerin sistemdeki diğer kriterlerden etkilendiğini ve insan-makine iş birliğinin performans çıktıları olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Özellikle insan müdahale süresinin diğer kriterlerden yüksek düzeyde etkilenmesi, insan-makine etkileşim süreçlerinde çalışanların yetkinlikleri, bilişsel iş yükü ve iş tasarımı gibi faktörlerin operasyonel performansı doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda lojistik sektörüne yönelik bazı öneriler geliştirilebilir. Öncelikle lojistik işletmelerinin insan-makine iş birliğini artırmak amacıyla çalışanların dijital yetkinliklerini geliştirmeye yönelik sürekli eğitim ve hayat boyu öğrenme programlarına yatırım yapmaları büyük önem taşımaktadır. Ayrıca çalışanların yeni teknolojileri benimsemelerini kolaylaştıracak organizasyonel kültürün oluşturulması, insan-makine etkileşim süreçlerinin daha verimli hale gelmesine katkı sağlayacaktır. Bununla birlikte sistem tasarımlarında ergonomik faktörlerin dikkate alınması ve bilişsel iş yükünün dengelenmesi, operatör yorgunluğunu azaltarak insan müdahale süresinin optimize edilmesine yardımcı olabilir. Özellikle otomasyon ve yapay zekâ tabanlı sistemlerin kullanıldığı lojistik operasyonlarda insanın sistem içerisindeki rolünü destekleyen kullanıcı dostu arayüzlerin geliştirilmesi de önemli bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Gelecek çalışmalarda farklı lojistik operasyon türleri (depo yönetimi, otonom taşıma sistemleri, robotik toplama sistemleri vb.) dikkate alınarak daha geniş kriter setleri oluşturulabilir. Ayrıca insan-makine iş birliğinin değerlendirilmesinde farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılması ve hibrit modellerin geliştirilmesinin literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca farklı ülkelerdeki lojistik sistemlerin karşılaştırıldığı ampirik çalışmalar, insan-makine iş birliğinin sektörel ve kültürel farklılıklar açısından değerlendirilmesine katkı sağlayabilir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Bu çalışma bilimsel araştırma ve yayın etiği kurallarına uygun olarak hazırlanmıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar açısından ya da üçüncü taraflar açısından çalışmadan kaynaklı çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Etik Kurul Onayı

Bu araştırma Etik Kurul Onayı gerektirmemektedir.

KAYNAKÇA

- Adel, A., ve HS Alani, N. (2024). Human-centric collaboration and Industry 5.0 framework in smart cities and communities: Fostering sustainable development goals 3, 4, 9, and 11 in Society 5.0. *Smart Cities*, 7(4), 1723-1775.
- Akundi, A., Euresti, D., Luna, S., Ankobiah, W., Lopes, A. ve Edinbarough, I. (2022). State of Industry 5.0—Analysis and identification of current research trends. *Applied System Innovation*, 5(1), 27, 1-14.
- Andres, B., Diaz-Madroño, M., Soares, A. L. ve Poler, R. (2024). Enabling technologies to support supply chain logistics 5.0. *IEEE Access*, 12, 43889-43906.
- Amiri, M., Sadaghiyani, J., Payani, N. ve Shafieezadeh, M. (2011). Developing a DEMATEL method to prioritize distribution centers in supply chain. *Management Science Letters*, 1(3), 279-288.
- Barykin, S. E., Strimovskaya, A. V., Sergeev, S. M., Borisoglebskaya, L. N., Dedyukhina, N., Sklyarov, I., Sklyarov, J. ve Saychenko, L. (2023). Smart city logistics on the basis of digital tools for ESG goals achievement. *Sustainability*, 15(6), 5507.
- Braga, I. F., Ferreira, F. A., Ferreira, J. J., Correia, R. J., Pereira, L. F. ve Falcão, P. F. (2021). A DEMATEL analysis of smart city determinants. *Technology in Society*, 66, 101687.
- Boz, E. ve Pinto, A. R. F. (2024). Evaluation of logistics 5.0 vs. logistics 4.0. *Information Logistics For Organizational Empowerment And Effective Supply Chain Management* içinde (163-184 ss.). Dubai: IGI Global Scientific Publishing.
- Chen, C. A. (2012). Using DEMATEL method for medical tourism development in Taiwan. *American Journal Of Tourism Research*, 1(1), 26-32.
- Cimini, C., Lagorio, A., Cavalieri, S., Riedel, O., Pereira, C. E. ve Wang, J. (2022). Human-technology integration in smart manufacturing and logistics: current trends and future research directions. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108261.
- Dhar, S. ve Saha, A. K. (2025). Synergy over spiral: A logistics 5.0 game-theoretic model for trust-fatigue co-regulation in human-cobot order picking. *arXiv preprint*, arXiv:2508.03765.
- Dul, J., Bruder, R., Buckle, P., Carayon, P., Falzon, P., Marras, W. S., Wilson, J. R. ve Van der Doelen, B. (2012). A strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession. *Ergonomics*, 55(4), 377-395.
- Durugbo, C. M. (2025). Uncertainties of supply chain transition and integration for Industry 5.0: a review of operations management literature. *International Journal of Production Research*, 63(18), 6915-6937.
- Endsley, M. R. (2017). From here to autonomy: lessons learned from human–automation research. *Human Factors*, 59(1), 5-27.
- Ghobakhloo, M., Mahdiraji, H. A., Iranmanesh, M. ve Jafari-Sadeghi, V. (2024). From Industry 4.0 digital manufacturing to Industry 5.0 digital society: A roadmap toward human-centric, sustainable, and resilient production. *Information Systems Frontiers*, 1-33.
- Grosse, E. H., Sgarbossa, F., Berlin, C. ve Neumann, W. P. (2023). Human-centric production and logistics system design and management: Transitioning from Industry 4.0 to Industry 5.0. *International Journal of Production Research*, 61(22), 7749–7759.
- Habib, L., Pacaux-Lemoine, M. P., Berdal, Q. ve Trentesaux, D. (2021). From human-human to human-machine cooperation in manufacturing 4.0. *Processes*, 9(11), 1910.
- Han, L. L. (2025). Logistics industry 5.0 in malaysia: human-machine synergy in workforce management. *International Journal of Recent Advances in Multidisciplinary Research*, 12 (04), 11028-11035.
- Hoc, J. M. (2000). From human–machine interaction to human–machine cooperation. *Ergonomics*, 43(7), 833-843.
- Hsu, C. H., Chen, S. J., Huang, M. Q. ve Le, Q. (2024). Industry 5.0 drivers analysis using Grey-DEMATEL: A logistics case in emerging economies. *Mathematics*, 12(22), 3588. 1-27.

- Islam, M. T., Sepanloo, K., Woo, S., Woo, S. H. ve Son, Y. J. (2025). A review of the Industry 4.0 to 5.0 transition: exploring the intersection, challenges, and opportunities of technology and human-machine collaboration. *Machines*, 13(4), 267.
- Jefroy, N., Azarian, M. ve Yu, H. (2022). Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0: what are the implications for smart logistics?. *Logistics*, 6(2), 26.
- Karim, N. H., Balijepalli, C. ve Whiteing, A. (2025). A systems thinking framework of human-machine interactions and their impact on warehouse operations. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 28(10), 1247-1270.
- Klump, M. (2018). Automation and artificial intelligence in business logistics systems: Human reactions and collaboration requirements. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 21(3), 224-242.
- Liou, J. J., Tzeng, G. H. ve Chang, H. C. (2007). Airline safety measurement using a hybrid model. *Journal of Air Transport Management*, 13(4), 243-249.
- Longo, F., Padovano, A. ve Umbrello, S. (2020). Value-oriented and ethical technology engineering in industry 5.0: A human-centric perspective for the design of the factory of the future. *Applied Sciences*, 10(12), 4182.
- Machado, N. T. ve Rodriguez, C. M. T. (2025). A measurement model of logistics 5.0 maturity: An integrative review and framework proposal based on literature. *ITEGAM-JETIA*, 11(51), 171-178.
- Monferdini, L., Tebaldi, L. ve Bottani, E. (2025). From industry 4.0 to industry 5.0: opportunities, challenges, and future perspectives in logistics. *Procedia Computer Science*, 253, 2941-2950.
- Neumann, W. P., Winkelhaus, S., Grosse, E. H. ve Glock, C. H. (2021). Industry 4.0 and the human factor—a systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal Of Production Economics*, 233, 107992.1-16.
- Nixdorf, S., Zhang, M., Grosse, E. H. ve Ansari, F. (2026). Reciprocal learning in human-machine collaboration: a systematic literature review and implications for production and logistics. *International Journal of Production Research*, 64(4), 1561-1585.
- Oğuz, S. (2024). Endüstri 5.0 ile lojistik ve tedarik zinciri yönetiminde dönüşüm. Merdivenli, F. ve Koç Ustalı N. (Ed). *Lojistiğin Geleceği – 3 içinde* (130-145. ss.). İzmir: Duvar Yayınları.
- Panther, L., Leder, R., Keiser, D. ve Freitag, M. (2024). Requirements for human-machine-interaction applications in production and logistics within Industry 5.0—A case study approach. *Procedia Computer Science*, 232, 1164-1171.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B. ve Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286-297.
- Passalacqua, M., Pellerin, R., Magnani, F., Doyon-Poulin, P., Del-Aguila, L., Boasen, J. ve Léger, P. M. (2025). Human-centred AI in industry 5.0: a systematic review. *International Journal of Production Research*, 63(7), 2638-2669.
- Petzoldt, C., Lütjen, M., Panther, L., Niermann, D., Vur, B., Quandt, M., ... ve Mast, J. (2022). Operator 5.0: Intelligente Arbeitsergonomie im Automobilumschlag. Konzept zur Mensch-Technik-Interaktion mit autonomen Transportsystemen und sensorischen Exoskeletten. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 117(10), 644-650.
- Pizoń, J. ve Gola, A. (2023). Human-machine relationship—perspective and future roadmap for industry 5.0 solutions. *Machines*, 11(2), 203. 1-22.
- Ranasinghe, T., Grosse, E. H. ve Lerher, T. (2024). Aging in industry 5.0: Enhancing human-robot Synergy in manufacturing and logistics. *IFAC-Papers OnLine*, 58(19), 367-372.
- Rijwani, T., Kumari, S., Srinivas, R., Abhishek, K., Iyer, G., Vara, H., Dubey, S., Revathi, V. ve Gupta, M. (2025). Industry 5.0: A review of emerging trends and transformative technologies in the next industrial revolution. *International Journal On Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19(2), 667-679.
- Romero, D., Stahre, J., Wuest, T., Noran, O., Bernus, P., Fast-Berglund, Å. ve Gorecky, D. (2016, October). Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. In

- Proceedings Of The International Conference On Computers And Industrial Engineering (CIE46) içinde (29-31 ss.), China.
- Romero, D., Stahre, J. ve Taisch, M. (2020). The Operator 4.0: Towards socially sustainable factories of the future. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106128.
- Sarıışık, G. ve Demir, S. (2025). Industry 5.0: A Human-centric paradigm for sustainable and resilient industrial transformation. *Journal of Social Perspective Studies*, 2(2), 50-66.
- Sheikh, R. A., Ahmed, I., Faqih, A. Y. A. ve Shehawy, Y. M. (2025). Global perspectives on navigating Industry 5.0 knowledge: Achieving resilience, sustainability, and human-centric innovation in manufacturing. *Journal of the Knowledge Economy*, 16(5), 15997-16032.
- Teoman, S. (2024). Endüstri 5.0 kapsamında insan merkezli tedarik zinciri yapılandırmasına yönelik stratejik ve teknolojik çerçeve analizi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 25(2), 375-387.
- Trstenjak, M., Opetuk, T., Đukić, G. ve Cajner, H. (2022). Logistics 5.0 implementation model based on decision support systems. *Sustainability*, 14(11), 6514.
- Tzeng, G. H., Chiang, C. H. ve Li, C. W. (2007). Evaluating intertwined effects in e-learning programs: A novel hybrid MCDM model based on factor analysis and DEMATEL. *Expert Systems With Applications*, 32(4), 1028-1044.
- Verma, R. C., Chaurasiya, S. ve Kumar, A. (2024). Human-machine collaboration in smart factories: A transition from Industry 4.0 to Industry 5.0. *International Journal of Cultural Studies and Social Science*, 20, 149-158.
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B. ve Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530-535.
- Yanytska, L. (2025). The rise of human-centric manufacturing in the Industry 5.0 era. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 139(9), 5067-5077.
- Zhang, W. ve Deng, Y. (2019). Combining conflicting evidence using the DEMATEL method. *Soft Computing*, 23(17), 8207-8216.