

*Research Article***MODELING HUMAN-MACHINE INTERACTION WITH GAME THEORY IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 5.0****ENDÜSTRİ 5.0 BAĞLAMINDA İNSAN-MAKİNE ETKİLEŞİMİNİN OYUN TEORİSİYLE MODELLENMESİ**Serkan Genç¹ Gülper Basmacı Aktuna² Emre Bilgin Sarı³¹ Arş. Gör. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, İzmir, Türkiye, serkan.genc@deu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-9520-8466² Arş. Gör. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, İzmir, Türkiye, gulper.basmaci@deu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-8038-9639³ Doç. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, İzmir, Türkiye, emre.bilgin@deu.edu.tr
ORCID: 0000-0001-5110-1918**Article Info:**

Received: November 24, 2025

Revised: December 5, 2025

Accepted: December 7, 2025

Keywords:

Industry 5.0

Human-Machine Interaction

Game Theory

Linear Programming

Cobot

Anahtar Kelimeler:

Endüstri 5.0

İnsan-Makine Etkileşimi

Oyun Teorisi

Doğrusal Programlama

İşbirlikçi Robot

ABSTRACT

Industry 5.0 has emerged as a paradigm that redefines the interaction between humans and machines. However, in hybrid production environments, situations where humans and machines collaborate create new planning and optimization problems in terms of task allocation and scheduling. In this study, in line with Industry 5.0's human-centric production vision, within the framework of rational decision-making in human-machine interaction, the game theory framework is used to analyze which strategies human and machine players will employ, with what probabilities, and at what utility level the game will reach equilibrium. Three strategies representing different levels of interaction for human and machine players (25%, 50%, and 75% human and machine) were evaluated by three field experts based on nine dimensions derived from the literature. A gain/loss-based Human-Machine Collaboration Game (IMIPO) was created using utility values scored by the experts between -10 and +10 for each strategy intersection in the payoff matrix. The resulting matrix was modeled using linear programming techniques and solved using Excel Solver to calculate the equilibrium value and strategy probabilities for human and machine players. The solution found the equilibrium value of the game to be 3.245 under mixed strategies, with the human player most likely choosing the "High Human Involvement" strategy, while the machine player most likely chose the "Dominant Cobot" strategy.

ÖZ

Endüstri 5.0, insan ve makine arasındaki etkileşimi yeniden tanımlayan bir paradigma olarak ortaya çıkmıştır. Ancak hibrit üretim ortamlarında insan ve makinenin ortak faaliyet yürüttüğü durumlar, görev paylaşımı ve zamanlama açısından yeni planlama ve optimizasyon problemlerini beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada Endüstri 5.0'ın insan merkezli üretim vizyonuna uygun olarak, insan-makine etkileşiminin rasyonel karar verme yaklaşımı çerçevesinde, insan ve makine oyuncularının hangi oyun stratejilerini hangi olasılıklarla oynayacakları ve oyunun hangi fayda düzeyinde dengeye varacağı oyun teorisi çerçevesinde iki kişilik, sıfır toplamı karma stratejili oyun olarak ele alınmaktadır. Çalışmada, insan ve makine oyuncuları için farklı etkileşim düzeylerini temsil eden üçer strateji (%25, %50, %75 insan ve makine) üç alan uzmanı tarafından literatürden elde edilen dokuz boyut temel alınarak değerlendirilmiştir. Uzmanların ödemeler matrisindeki her strateji kesişimini -10 ile +10 arasında puanladığı fayda değerleri kullanılarak kazanç/kayıp temelli İnsan-Makine İşbirliği Oyunu (İMİPO) oluşturulmuştur. Elde edilen matris, doğrusal programlama tekniğiyle modellenmiş ve Excel Solver ile çözülerek insan ve makine oyuncuları için oyunun denge değeri ve strateji olasılıkları hesaplanmıştır. Çözüm sonucunda, oyunun denge değeri karma stratejiler altında 3.245 olarak bulunmuş ve insan oyuncusunun "Yüksek İnsan Katılımı", makine oyuncusunun ise "Baskın Cobot" stratejisini en yüksek olasılıkla tercih ettiği belirlenmiştir.

1 | GİRİŞ

Endüstri devrimleri üretim sistemlerinde verimliliği artırma, maliyetleri düşürme, otomasyon düzeyini yükseltme gibi üretim sürecinde insan rolünü ikincil konuma indirgeyen temellere dayanarak ortaya çıkmıştır. Endüstri 5.0 ise merkeze insanı yerleştiren, sürdürülebilir ve dayanıklılık temellerine dayanan bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Avrupa Komisyonu (2021) tarafından yayınlanan "Endüstri 5.0: Sürdürülebilir, İnsan Odaklı ve Dayanıklı Bir Avrupa Sanayisine Doğru" başlıklı rapor ile Endüstri 5.0 yalnızca dijital dönüşümün devamı değil, aynı zamanda insan merkezli, sürdürülebilir ve dayanıklı üretim sistemlerinin kurulmasına yönelik normatif bir vizyon olarak ilan edilmiştir (Breque, vd., 2021).

İnsanın yeniden üretim süreçlerinin merkezine yerleştirilmesi, Endüstri 5.0'in ortaya çıkışını tetikleyen temel başlıklardan biridir. Bu yeni endüstriyel vizyon, modern üretimde insan merkezli yaklaşımların gelişmiş teknolojilerle bütünleşmesini hedeflemekte ve teknolojik ilerlemenin yalnızca verimlilik artışıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda insan refahını da kapsamaya gerektiğini vurgulamaktadır (Breque, vd., 2021; Dwivedi, vd., 2023). Endüstri 5.0 ile üretim sistemlerinde insan ve makine arasındaki iş birliği yeniden tanımlanmaktadır. İnsan bilişsel, duygusal ve yaratıcılık temelli yetkinlikleriyle öne çıkarken; makine, veri işleme, hassasiyet ve tekrarlı görevlerdeki üstünlüğüyle üretim süreçlerini desteklemektedir. Bu iki aktörün etkileşimi, üretim performansının, sistem esnekliğinin ve sosyal faydanın belirleyicisi hâline gelmektedir. Çalışma ortamında, insanlar ve makineler arasında iş birliğini mümkün kılarak üretkenliği, verimliliği ve çalışan refahını artırmayı amaçlamaktadır (Keshvarparast, vd., 2024; Orso, vd., 2022).

Endüstri 5.0 ile hedeflenen üretim sistemlerinde insan ve makinenin eş zamanlı faaliyet göstermesi, üretim sistemlerinde bir takım yeni düzenlemeler gerektirmekte ve yeni problemler ile gündeme gelmektedir. Geleneksel üretim modellerinde görevlerin yalnızca makineler veya insanlar arasında dağıtılması yeterliyken, Endüstri 5.0'in hibrit yapısında görev paylaşımı, zamanlama, güvenlik ve ergonomi unsurları çok daha karmaşık bir hâl almaktadır. İnsan-makine işbirlikli üretim hatlarında, hangi görevin hangi aktör tarafından, hangi sırayla ve hangi süreyle gerçekleştirileceğinin belirlenmesi, sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, taşımacılıkla ilişkili iş yeri planlama problemleri veya insan-makine etkileşimli görev atama problemleri gibi yeni optimizasyon alanları literatürde öne çıkmaktadır (Destouet, vd., 2023; Destouet, vd., 2024). Ayrıca insan ve makine arasındaki etkileşimin yalnızca operasyonel değil, aynı zamanda stratejik boyutunu da dikkate alan problemler gündeme gelmektedir.

İnsan ve makine, ortak hedeflere ulaşmak üzere iş birliği içinde olsa da, her birinin fayda fonksiyonu ve davranışsal dinamikleri farklılık göstermekte, bu nedenle, sistemin toplam faydasını maksimize edecek denge noktasının belirlenebilmesi önem arz etmektedir (Zou, vd., 2024). İnsan ve makine arasındaki bu işbirlikçi rekabetin nasıl dengeleneceği, Endüstri 5.0 literatüründe hem kuramsal hem de uygulamalı düzeyde önemli bir araştırma sorusu olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, Endüstri 5.0 bağlamında insan ve makine arasındaki etkileşimin modellenmesi amaçlanmaktadır. Bu etkileşimin, oyun teorisi çerçevesinde bir modelleme yaklaşımı ile ele alınması, farklı insan-makine etkileşim düzeylerini temsil eden senaryolar ile değerlendirilmesi sağlanmaktadır. Her senaryo için, insanın üretim sürecindeki katılım oranına göre oyun değeri hesaplanmaktadır. Uzmanlar, her senaryoda insan faktörünün sağladığı görece faydayı puanlamakta; böylece insan ve makine faydalarını içeren bir oyun matrisi oluşturulmaktadır. Elde edilen oyun matrisi, doğrusal programlama yaklaşımı kullanılarak çözülmekte ve oyun teorisinin temel ilkelerine dayalı olarak her iki oyuncu (insan ve makine) için optimal stratejiler ve bu stratejilerin olasılık dağılımları hesaplanmaktadır. Analiz sonucunda, sistemin denge değeri elde edilerek, insan ve makinenin hangi koşullarda karşılıklı fayda sağlayacak şekilde iş birliği kurabileceği ortaya çıkarılmaktadır.

Geliştirilen model, insan-makine etkileşimini nicel biçimde değerlendirmeye olanak tanıırken, aynı zamanda insan merkezli üretim tasarımı için karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Oyun teorisinin normatif doğası, sistemdeki aktörlerin rasyonel davranışlarını biçimsel olarak temsil ederken; doğrusal programlama, çözümün hesaplanabilir, tekrarlanabilir ve denetlenebilir olmasını temin etmektedir. Böylelikle geliştirilen yaklaşım, Endüstri 5.0 vizyonuna uygun olarak hem kavramsal hem de uygulamalı düzeyde insan ve makine arasındaki stratejik dengeyi ortaya koymaktadır.

2 | KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Endüstri 5.0, Endüstri 4.0'dan farklı olarak yalnızca üretim verimliliğine odaklanmayan, teknolojik ilerlemenin tam merkezinde insanın olması gerektiğini savunan; tüm bunlara ek olarak da toplumsal ve çevresel sürdürülebilirliği önceliğe alan bir dönüşümü temsil etmektedir (Breque, vd., 2021). Endüstri 5.0, Endüstri 4.0'ın getirdiği dijitalleşme, otonom sistemler ve siber-fiziksel entegrasyon etrafında şekillenen dijital dönüşümün getirilerinin korunmasını, fakat insanın varlığının getireceği avantajların da dikkate alınarak dönüşümün sürdürülmesini amaçlamaktadır (Carayannis, vd., 2022; Nahavandi, 2019). Buna bağlı olarak, sistemde insan yalnızca "operatör" olarak değil "değer yaratıcısı" özellikleri ile de bilişsel kapasitesini, yaratıcılığını ve etik değerlerini ortaya koyabilecektir. Bu durum da sistemlerin tasarlanmasında insan-makine etkileşiminin incelenmesi gerekliliğini öne çıkarmaktadır (Dwivedi et al., 2023).

Endüstri 5.0'da insan karar verici, gözlem yapan, dengeleyici ve yaratıcı konumdadır. Makineler ise, sistemde yüksek veri işleme kapasitesi, hassas iş yapma becerisi ve güvenliği artırıcı özellikleri ile rutin işlerde insanın fiziksel ve bilişsel kapasitesini destekleyen tamamlayıcı unsurlar olarak görülmektedir (Keshvarparast, vd., 2024). Bu yapısı ile insan-makine etkileşimi sinerjik bir sistemi temsil etmektedir. Bu sistemde yalnızca görev paylaşımı bulunmamakta, aynı zamanda özerklik seviyesinin belirlendiği karar süreçleri de kapsama alınmaktadır (Yang, ve Zhang, 2024).

Endüstri 5.0 üretim sistemleri üzerinde bir değişim yaratarak, insan, robot, sensör sistemleri, bilişsel algoritmalar gibi birden fazla etmenin karar verici konumunda bulabildiği yapılar halinde gelmiştir. Sistem üzerinde yer alan tüm etmenler, kendi amaç, görev ve hedefleri doğrultusunda hareket etmektedirler (Wang, ve Jiao, 2025). Sistemin yapısından kaynaklı olarak yaşanan bu durum, insan-makine etkileşiminin deterministik algoritmalarla modellenmesinin yetersiz kalacağı, etkileşimli bir yapı olarak incelenmesi gerekliliğini meydana getirmektedir (Lawless, ve Moskowitz, 2025).

Sosyoteknik sistem entegrasyonu (Ang, vd., 2025) kavramı, literatürde insan-makine işbirliğinde (Romero, vd., 2020) yer alan makinenin hesaplama kapasitesi ile insanın bilişsel esnekliğinin sinerjik bir biçimde biraya getirilmesini ifade etmek için kullanılmaktadır. Yaratılan bu sinerji etkisi, sistem üzerinde yalnızca görevlerin paylaşımının değil adaptif öğrenme ve karar alma süreçlerini de kapsamaktadır (Nahavandi, 2019). Ang ve diğerleri (2025), çalışmalarında sosyoteknik entegrasyonun temelinde rasyoneli adaptif bir sistem mimarisinin yer almakta olduğunu vurgulamaktadır. Romero ve diğerleri (2020), çalışmalarında insan-makine işbirliğinin bulunduğu sistemlerde tarafların ilişkilerinin "karşılıklı güven, görev farkındalığı ve bilişsel tamamlayıcılık" ilkeleri üzerinden tanımlandığını ifade etmektedir. Bu sistemler; sinerjik zeka (Longo, vd., 2020), değişen çevresel koşullara anlık tepki verebilen, öğrenen sistem yapısı (Ang, vd., 2025; Nahavandi, 2019), insan merkezli makine destekli iş bölümü dinamiği (Kadir, vd., 2019) özellikleri ile öne çıkmaktadırlar. Bu sistemlerin sürdürülebilirliği tarafların güven ve sorumluluk paylaşımlarına bağlıdır (Carayannis ve Morawska-Jancelewicz, 2022). Bu özellikler, Endüstri 5.0'ın insan-makine etkileşimi ile insan merkezli üretim anlayışını yalnızca teknik değil, aynı zamanda etik, bilişsel ve sosyal bir bütünlük içinde ele aldığını göstermektedir.

Endüstri 5.0'da insan ve makine arasındaki etkileşimin, yalnızca operasyonel düzeyde değil, aynı zamanda değer yaratma ve stratejik uyum boyutlarında da tanımlanması, insanın güvenlik, refah ve bilişsel dengeye öncelik verirken; makinenin, verimlilik, kalite ve üretim hızını maksimize etmeye odaklanması anlamına gelmektedir. Bu noktada iki farklı amaç fonksiyonunun aynı üretim sisteminde bir arada bulunması, çok düzeyli bir dengeleme problemi ortaya çıkarmaktadır.

3 | LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde yer alan çalışmaların saptanabilmesi amacıyla insan-makine etkileşimin incelendiği çalışmalar Web of Science veri tabanında başlığında insan-makine (human-machine), insan-robot (human-robot) ve optimizasyon (optimization) anahtar kelime sorgusu ile incelenmiştir. Sorgu sonucunda bu kavramların geçtiği, 1990-2025 yılları arasında yapılmış 9619 akademik çalışma bulunmuştur. Endüstri 5.0 bağlamında bu araştırma kısıtlandığında 2021-2025 yılları arasında yayınlanan 125 akademik çalışma incelenmiştir.

Endüstri 5.0 bağlamında insan makine etkileşiminin optimizasyonu ile ilgili 125 çalışma incelendiğinde 94 araştırma makalesi, 23 derleme çalışması, 14 bildiri olarak yayınlandığı görülmüştür. Ayrıca bu çalışmaların

alan disiplini açısından değerlendirilmesi ile, mühendislik, bilgisayar bilimleri, yöneylem araştırması, yönetim bilimi alanlarında ağırlık gösterdiği anlaşılmıştır.

Literatür taraması kapsamında, Endüstri 5.0 bağlamında insan makine etkileşiminin optimizasyonu ile ilgili 125 çalışma içinde yayınlandıkları yıl itibarıyla en çok atıf alan çalışmalardan alan yazım taraması üzerine olan Proia ve diğerleri (2021) çalışması, dijital endüstride güvenli, ergonomik ve verimli insan-robot iş birliği için kontrol teknikleri üzerine bir alan araştırması üzerine yapılmıştır. İnsan -makine işbirliğinde güvenlik, ergonomi ve verimlilik konularında optimizasyonun mevcut olup olmamasına bağlı olarak sorun ve kontrol türüne göre yapılan çalışmalar kategorize edilmiştir. Gao ve diğerleri (2025) tarafından yapılan “insan odaklıdan insan merkezliye: Endüstri 5.0 kapsamında üretim sahası planlama probleminin incelenmesi” başlıklı çalışmada, 2014-2024 yılları arasında ikili kaynak kısıtlamalarını, çalışan atamalarını ve insan-makine iş birliğini ele alan üretim sahası planlaması üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir ve bunların problem modelleme, optimizasyon hedefleri ve insan faktörü entegrasyonuna katkılarını analiz edilmiştir.

Literatür taraması kapsamında, incelenen çalışmalar içinde modelleme konulu çalışmalardan yayınlandıkları yıl itibarıyla en çok atıf alan Nourmohammadi, ve diğerleri (2022) tarafından yapılan çalışmada, montaj hatlarının insan-robot işbirliği görevleriyle dengelemek ve planlamak üzerine yapılmıştır. Çalışanın, montaj hattı dengeleme, insan-robot işbirliği, birden fazla insan ve robot, ortak görevler matematiksel model, meta-sezgisel anahtar kelimeleri ile literatürde yer aldığı ve simüle edilmiş tavlama yöntemini kullandığı görüşmüştür.

Zhang ve diğerleri (2025a) çalışmasında, heterojen etkileşimli insan-robot işbirlikçi demontaj hattı dengeleme üzerine çalışılmıştır. Demontaj hatlarında çeşitli operatörlerin esnek yapılandırılmalarını desteklemek, sökme sırasındaki belirsizlikleri daha hassas bir şekilde temsil etmek için aralıklı tip-2 üçgen bulanık kümeleri kullanılmıştır. Problemin NP-zor doğası göz önüne alınarak, çok amaçlı ayrık arılar algoritması geliştirilmiştir.

Zhang ve diğerleri (2025b) çalışmasında ise insan-robot işbirlikçi demontaj dizisi planlaması için çok amaçlı, çift popülasyonlu evrimsel bir algoritma geliştirilmiştir. Zaman ve enerji tüketimini en aza indirirken kârı en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan birbiriyle çelişen üç hedefi içeren model örnek vaka çalışmaları üzerinde denenmiştir.

Sanogo ve diğerleri (2025) çalışmasında insan-robot ortamlarında ulaşım ile ilgili iş yeri planlama problemlerini optimize etmek için oyun teorisi yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışmada, Otonom Akıllı Araçları potansiyel bir oyun çerçevesi içinde rasyonel araçlar olarak modellenerek, Ulaşım ile İş Yeri Planlama Problemi için, genel üretim süresini en aza indiren bir Nash dengesine ulaşmak için yinelemeli en iyi yanıt stratejilerini uygulayan bir Çoklu Robot Görev Dağıtım Problemi olarak yeniden formüle edilmiştir. Çalışma insan hareketlerini planlama sürecine benzersiz bir şekilde entegre ederek, dalgalanan üretim ortamlarına gerçek zamanlı adaptasyon sağlamayı öngörmektedir. İnsan hareketine ilişkin kısıtlayıcı varsayımlara rağmen, bu çalışma, Endüstri 5.0 vizyonu doğrultusunda, oldukça değişken ortamlarda dinamik planlama yaklaşımlarının önemini vurgulayarak, daha dayanıklı ve verimli üretim sistemlerine katkıda bulunmaktadır.

Literatür taraması kapsamında, Endüstri 5.0 bağlamında insan makine etkileşiminin, insan-makine ve insan-robot boyutlarında akademik çalışmalarda en dikkat çeken çalışmalar araştırma konuları, araştırmada kullanılan yöntemler ve uygulama alanları açısından Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1: İnsan Makine Etkileşimi Optimizasyonu Literatür Özeti

Literatür	Araştırma Konusu	Yöntem	Uygulama Alanı
Nourmohammadi ve diğerleri (2022)	İnsan-robot işbirliği montaj hattı optimizasyonu	matematiksel model, meta-sezgisel algoritma	montaj hatları, genel imalat
Mao, ve diğerleri, (2024)	insan-robot etkileşimi montaj hattı atama ve dengeleme	karma-tam sayılı programlama, sezgisel çözüm	insan-robot görev dağılımı

Literatür	Araştırma Konusu	Yöntem	Uygulama Alanı
Zhang, ve diğerleri, (2024)	belirsizlik altında insan robot çizelgeleme	stokastik modelleme + discrete bees algorithm	karma akış montaj hattı
Lou, ve diğerleri, (2024)	İnsan-robot işbirliği demontaj planlama	sıra optimizasyonu, simülasyon	geri dönüşüm
Bouaziz, ve diğerleri, (2024)	insan davranışı entegre edilmiş üretim planlama	belirsiz insan davranışı modelleme	üretim çizelgelemesi
Falerni, , ve diğerleri, (2024)	ergonomi ve tercih öğrenme ile geliştirilmiş insan-robot işbirliği	ergonomik kısıtlar	insan-robot işbirliği montaj hücresi
Rega, , ve diğerleri, (2021)	işbirlikçi iş yeri (insan-makine) tasarımı	çok amaçlı yerleşim optimizasyonu, bilgi tabanlı yöntem	iş istasyonu & hücre tasarımı
Ojstersek, , ve diğerleri, (2021)	işbirlikçi iş alanının kapasite etkisi	simülasyon + gerçek uygulama kıyaslaması	insan-cobot işyeri tasarımı
Ciccarelli, , ve diğerleri, (2024)	cobot destekli el işçiliği / zanaat üretimi	sanal gerçeklik deneyleri	el işçiliği uygulamaları

Endüstri 5.0 bağlamında insan-robot ve insan-makine işbirliğini üretim sistemleri perspektifinden inceleyen çalışmaların İnsan-Robot İşbirliğinde Montaj Hattı Optimizasyonu, Demontaj Süreçlerinde İnsan-Robot İşbirliği, İnsan Faktörü: Davranış ve Ergonomi ile İşbirlikçi İş Yeri İnsan-Makine Tasarımı konulu dört ana tema çevresinde toplandığını göstermektedir. Özetle literatür, Endüstri 5.0 kapsamında insan-makine etkileşimi hem operasyonel düzeyde (çizelgeleme, hat dengeleme, demontaj) hem de insan faktörü düzeyinde (davranış, ergonomi, işyeri tasarımı) modelleyen çalışmalardan oluşmaktadır. Yöntemsel olarak matematiksel optimizasyondan simülasyona ve VR destekli deneylere kadar geniş bir yöntemsel çeşitlilik bulunmaktadır. Ancak mevcut literatürde insan-makine etkileşimini modelleyen optimizasyon ve simülasyon çalışmaları geniş yer bulmasına rağmen, insan ve makinenin karşılıklı bağımlı seçimlerinin “stratejik etkileşim” olarak incelendiği oyun teorisi tabanlı bir yaklaşımın yetersiz olduğu görülmektedir. İnsan davranışı belirsizliği, görev paylaşımı, çatışmalı hedefler ve öğrenme süreçleri gibi Endüstri 5.0’ın temel insan-merkezli bileşenleri oyun teorisi çerçevesine aktarılmamış; Nash dengesi, işbirliği oyunları, sinyal oyunları veya dinamik oyun modelleri literatürde eksik kalmıştır. Bu noktada, Endüstri 5.0’ın gerektirdiği insan-makine uyumu için oyun teorisi tabanlı yeni modelleme çerçeveleri önemli bir araştırma boşluğuna işaret etmektedir ve bu çalışmanın alana özgün katkısı olarak ön plana çıkmaktadır.

Uzman görüşlerinin şekillenmesine yardımcı olması açısından literatürde Endüstri 5.0’ın avantaj ve dezavantajları araştırılmış, avantajları ve dezavantajları doğrudan içeren çalışma sayısının yetersiz olduğu görülmüştür. Bu sebeple SWOT analizi içeren çalışmalardan da faydalanılmış güçlü yönler ve fırsatlar avantajlar altında, zayıf yönler ve tehditler de dezavantajlar altında birleştirilmiştir. Birleştirilmiş avantajlar Tablo 2’de, birleştirilmiş dezavantajlar da Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 2: Endüstri 5.0 Avantajları

Küme İsmi	Anahtar Kelime(ler)	Yazar(lar)
İnsan-Makine İşbirliği	İnsan-makine işbirliği, Geliştirilmiş insan-makine işbirliği	Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024); Shabur vd. (2025); George ve George (2023)
İnsan Merkezlilik	İnsan odaklı yaklaşım, İnsan merkezli yaklaşım	Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024); Li ve Duan (2025)
Dayanıklılık	Dayanıklılık, Dayanıklılık oluşturma, Kurumsal dayanıklılık, Kesintilere karşı dayanıklılık	Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024); Li ve Duan (2025); Shabur vd. (2025)

Küme İsmi	Anahtar Kelime(ler)	Yazar(lar)
Sürdürülebilirlik ve Çevresel Duyarlılık	Gelişmiş sürdürülebilirlik, Sürdürülebilir üretim, Sürdürülebilirliğin teşvik edilmesi, Sürdürülebilir büyüme, Gelişmiş güvenlik ve sürdürülebilirlik, Çevreye duyarlı, Daha az atık	Li ve Duan (2025); Kovari (2024); Shabur vd. (2025); George ve George (2023); Mukul ve Güler (2024); Wolniak (2023)
Güvenlik	Artırılmış güvenlik, Artan işçi güvenliği, Gelişmiş işçi güvenliği ve refahı, Gelişmiş güvenlik ekipmanları ve araçları	Faraji vd. (2024); Wolniak (2023); Shabur vd. (2025)
Özelleştirme ve Esneklik	Özel üretim, Gelişmiş özelleştirme, Gelişmiş özelleştirme ve esneklik, Daha kişiselleştirilmiş ürünler, Artan esneklik	Kovari (2024); Shabur vd. (2025); George ve George (2023); Wolniak (2023)
Verimlilik ve Operasyonel İyileşme	Geliştirilmiş verimlilik ve üretkenlik, Daha kaliteli ürünler, Daha az kesinti süresi, Daha iyi tedarik zinciri yönetimi, Daha fazla maliyet tasarrufu, Azaltılmış maliyetler ve boyutlar	Wolniak (2023); George ve George (2023); Faraji vd. (2024)
Dijitalleşme ve Teknolojik Gelişim	Teknolojik gelişmeler, Dijital ikizler ve artırılmış gerçeklik, Veri ve dijital evrim, Ekonomik ve endüstriyel dinamikler, Konuşma ve jestlerin otomatik olarak tanınması, Kullanıcı dostu ve sezgisel	Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024); Tallat vd. (2023); Faraji vd. (2024)
Rekabet ve Yenilik	Rekabet avantajı, Yenilik ve girişimcilik, Ortaklıkları güçlendirmek, Toplumsal talepleri karşılamak	Wolniak (2023); Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024)
Sosyal ve Müşteri Değeri	Geliştirilmiş müşteri memnuniyeti, Artan şeffaflık, İyileştirilmiş sosyal etki	Wolniak (2023)
Beceri Gelişimi ve Çalışan Odaklılık	Daha anlamlı işler, Beceri gelişimi ve sürekli öğrenme, Yeni iş profilleri, Gelişmiş yaratıcılık	Wolniak (2023); Li ve Duan (2025); Shabur vd. (2025)
Robotik	İşbirlikçi robotlar	Faraji vd. (2024)

Tablo 3: Endüstri 5.0 Dezavantajları

Küme İsmi	Anahtar Kelime(ler)	Yazar(lar)
Güvenlik, Veri Güvenliği, Siber Güvenlik	Karmaşık kimlik doğrulama ve güvenlik, Veri güvenliği ve birlikte çalışabilirlik, Siber güvenlik riskleri, Güvenlik, Gizlilik	Faraji vd. (2024); Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024); Wolniak (2023); Tallat vd. (2023); Adel (2022); Shabur vd. (2025), Li ve Duan (2025)

Küme İsmi	Anahtar Kelime(ler)	Yazar(lar)
İşgücü ve Eğitim Gereksinimleri	İnsan işçilere yönelik artan talepler, İşgücü uyum ve eğitimi, Eğitim gereksinimi, İşgücü eğitimi ve adaptasyonu, Kalifiye eleman eksikliği, İnsani zorluklar	Faraji vd. (2024); Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024); Shabur vd. (2025); Li ve Duan (2025); Adel (2022)
Direnç, Kültürel ve Örgütsel Engeller	Kültürel ve örgütsel direniş, Değişime direnç, Potansiyel direnç, Sosyal heterojenlik, Toplumsal zorluklar, Küresel çatışmalar, Sosyo-ekonomik zorluklar	Faraji vd. (2024); Li ve Duan (2025); Wolniak (2023); Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024); Tallat vd. (2023); George ve George (2023)
Teknolojik Karmaşıklık ve Teknik Zorluklar	Karmaşık teknolojiler, Karmaşık sistemler, Teknik zorluklar, Teknolojik entegrasyon sorunları, Entegrasyon zorlukları, Hızlı teknolojik değişimler, Teknolojiye bağımlılık	Kovari (2024); Wolniak (2023); George ve George (2023); Shabur vd. (2025), Li ve Duan (2025); Tallat vd. (2023)
Ekonomik ve Finansal Kısıtlar	Yüksek yatırım maliyetleri, Yüksek bütçe gereksinimi, Ekonomik ve finansal kısıtlamalar, Ekonomik zorluklar, Sınırlı ekonomik araştırma	Faraji vd. (2024); Wolniak (2023); Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024); Adel (2022); Shabur vd. (2025), Li ve Duan (2025); Tallat vd. (2023)
Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etki	Çevresel etki, Çevresel ve sosyal zorluklar, Sürdürülebilirlik zorlukları	Wolniak (2023); Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024); Tallat vd. (2023)
Hukuki, Etik ve Politika Kaynaklı Zorluklar	Etik kaygılar, Etik kaygılar ve sosyal çıkarımlar, Etik ve yasal zorluklar, Düzenleyici ve politika engelleri	Wolniak (2023); Shabur vd. (2025), Li ve Duan (2025); George ve George (2023)
Birlikte Çalışabilirlik	Birlikte çalışabilirlik sorunları	Faraji vd. (2024); Li ve Duan (2025)
Üretim ve İş Süreçleri	Geleneksel üretim işlerinin bozulması, Zaman alıcı süreç, Verimlilik zorlukları	Wolniak (2023); Adel (2022); Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024)
Kavramsal Belirsizlik ve Tanımsal Sorunlar	Net tanım eksikliği, Sınırlı benimseme, Endüstri 4.0'ın potansiyel gölgelemesi	Kovari (2024); Mukul ve Güler (2024); Wolniak (2023)

Literatür taraması ile elde edilen avantaj ve dezavantajlardan yalnızca oyun matrisini doğrudan etkileyen insan ve makine odaklı kritik unsurlar dikkate alınmıştır. Ele alınan unsurlar görüşü alınan uzmanların puanlama yaparken referans noktalarını oluşturmaktadır. Kritik olarak belirlenen unsurlar şu şekildedir:

İnsan puanını artıran unsurlar

- **İnsan merkezli yaklaşım:** İnsan ihtiyaçları ve çıkarları üretim sürecinin merkezinde yer almaktadır (Kovari, 2024).
- **Geliştirilmiş insan-makine işbirliği:** İnsanlarla birlikte çalışan işbirlikçi robotlar (cobot'lar), her ikisinin de güçlü yönlerini birleştirerek operasyonel verimliliği artırmaktadır. Robotlar tekrarlayan ve tehlikeli görevleri üstlenirken, insanlar yaratıcı, stratejik ve karar alma rollerine odaklanabilmektedir. Bu sinerji, üretkenliği artırmakta, iş yeri yaralanmalarını azaltmakta ve inovasyonu teşvik etmektedir (Shabur vd., 2025).

- Gelişmiş işçi güvenliği ve refahı: Yüksek riskli görevlerin otomatikleştirilmesi, işyeri kazalarının olasılığını azaltır ve çalışanlar için daha güvenli bir ortam sağlar (Shabur vd., 2025).
- Beceri gelişimi ve sürekli öğrenme: Endüstri 5.0 ile hızla gelişen ortamında yol alabilmek için işletmelerin hem teknolojik akıcılığa hem de uyarlanabilir, öz motivasyonlu iş gücü geliştirmeye öncelik vermeleri gerekmektedir (Li ve Duan, 2025).
- Gelişmiş yaratıcılık: Endüstri 5.0, insan yaratıcılığını ve sezgisini ileri teknolojilerle birleştirerek yeni ve yenilikçi ürün ve çözümlere yol açabilmektedir (Wolniak, 2023).
- Daha anlamlı işler: Endüstri 5.0, yaratıcılık ve problem çözme becerileri gerektiren daha anlamlı işler yaratabilecektir (Wolniak, 2023).

İnsan puanını azaltan unsurlar

- İşgücü uyum ve eğitimi: Endüstri 5.0, çalışanlar ve makineler arasında yakın iş birliği ve çalışanlarda yeni beceriler ve eğitim gerektirmektedir. İş gücünü ileri teknolojileri anlamaya hazırlamak büyük bir zorluk teşkil etmektedir (Faraji vd., 2024).
- Değişime direnç: Geleneksel üretim süreçleri ve teknolojilerindeki değişime karşı direnç, Endüstri 5.0'ın benimsenmesini engelleyebilir (Wolniak, 2023).
- Kültürel ve örgütsel direniş: İşletmeler, yönetim ve çalışanlardan gelen değişime karşı dirençle karşı karşıyadır. İnsan merkezli, teknoloji odaklı bir modele geçiş, önemli kültürel değişiklikler gerektirmektedir ve bu da bazı işletmeler için zorluklar yaratmaktadır (Faraji vd., 2024).

Makine puanını artıran unsurlar

- Geliştirilmiş verimlilik ve üretkenlik: Otomasyon, yapay zeka ve nesnelerin interneti (IoT) gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu, üretim süreçlerinde verimliliği ve üretkenliği artırabilmektedir (George ve George, 2023).
- Daha az kesinti süresi: Öngörücü bakım ve gerçek zamanlı izleme, üretim süreçlerindeki duruş sürelerinin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir (Wolniak, 2023).
- Daha fazla maliyet tasarrufu: Endüstri 5.0, artan verimlilik, azalan kesinti süreleri ve iyileştirilmiş tedarik zinciri yönetimi sayesinde maliyet tasarruflarına yol açabilmektedir (Wolniak, 2023).
- Artan esneklik: Endüstri 5.0, işbirlikçi robotlar, gerçek zamanlı izleme ve geri bildirim gibi teknolojilerin çalışanların değişen koşullara daha hızlı yanıt vermesine yardımcı olmasıyla daha esnek ve uyarlanabilir üretim ortamları yaratmayı hedeflemektedir (Wolniak, 2023).
- Teknolojik gelişmeler: Esnek ve verimli üretim sistemleri oluşturmak için IoT, yapay zeka ve robotik gibi ileri teknolojilerin entegrasyonudur (Kovari, 2024).

Makine puanını azaltan unsurlar

- Karmaşık teknolojiler: Yeni teknolojilerin tanıtımı ve entegrasyonu şirketler için karmaşık zorluklar yaratabilmektedir (Kovari, 2024).
- Entegrasyon zorlukları: Endüstri 5.0 teknolojilerini mevcut sistem ve süreçlerle entegre etmek zorlu olabilmektedir ve önemli miktarda zaman ve kaynak gerektirebilmektedir (Kovari, 2024).
- Siber güvenlik riskleri: Artan bağlantı ve dijital teknolojilere bağımlılık, üretim sistemlerini potansiyel siber tehditlere maruz bırakmaktadır (Shabur vd., 2025).
- Yüksek yatırım maliyetleri: Endüstri 5.0'ın uygulanması, üretimi ve verimliliği artırmak için akıllı makinelere ve yüksek vasıflı personele ihtiyaç duyulması nedeniyle önemli maliyetler doğurmaktadır (Faraji vd., 2024).

Boyutlar incelendiğinde insan-makine etkileşiminin tek boyutlu bir görev paylaşımı problemi olmadığı, çok boyutlu bir fayda/risk analizi içinde stratejik olarak şekillenen bir yapı şeklinde modellenmesi gerektiği görülmektedir. Bu çalışma, bu literatür boşluğunu doldurmak amacıyla, insan-makine etkileşimini yalnızca teknik bir koordinasyon problemi olarak değil, aynı zamanda karşılıklı fayda maksimizasyonu odaklı bir stratejik etkileşim sistemi olarak ele almaktadır. Üç uzmandan alınan değerlendirmelere dayalı senaryo analiziyle desteklenen model, hem ampirik hem de teorik düzeyde yeni bir katkı sunmaktadır. Böylece çalışma, Endüstri 5.0'da insan-makine işbirliğinin karar bilimi, davranışsal ekonomi ve üretim mühendisliği disiplinleriyle kesişiminde konumlanmakta; üretim sistemlerinde insan merkezli stratejik dengeyi ortaya koymayı amaçlamaktadır. Denge noktasını hesaplamak için verilen insan ve makine oyun puanlarına etki eden unsurlar Tablo ve 2 ve 3'teki literatür taramasından yararlanılarak oluşturulmuştur.

4 | YÖNTEM VE UYGULAMA

Oyun teorisi, iki veya daha fazla karar vericinin yer aldığı sistemlerde oyuncu olarak da adlandırılan karar vericilerin aldıkları rasyonel kararlar doğrultusunda ortaya çıkan denge durumunun analiz edilmesine olanak tanıyan, etkileşimli ilişkilerin modellenmesine imkan tanıyan bir yöntemdir (Von Neumann & Morgenstern, 1944; Osborne & Rubinstein, 1994). Oyun teorisi insan-makine etkileşiminde tarafların fayda temelli kazanç ve kayıplarının yarattığı çıkar çatışmasının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle literatürde tanımlanmış olunan sıfır toplam, karma stratejili oyun teorisi modelleri insan ve makine oyuncuları arasındaki dengenin olasılıksal doğasını ortaya koyabilmektedirler (Hwang, ve Rey-Bellet, 2020). Bu modellerde her oyuncunun stratejisi, karşı tarafın davranışına bağlı olarak optimize edilirken bir tarafın kazancını maksimize eden, diğer tarafın ise kaybını minimize eden bir denge oluşmaktadır (Wang, vd., 2022). Bu bakış açısı, insan ve makinenin aynı sistem üzerinde rasyonel, özerk ve etkileşimli oyuncular olarak modellenmesine olanak tanımaktadır.

Yöneylem yazınında "oyun" kavramı rakipler arasındaki kazanç kayıp ilişkisini gösteren durumu ifade etmek için kullanılmaktadır. Oyunda "oyuncu" adı verilen sınırlı sayıda rakip bulunmaktadır. Bu oyunun iki veya daha fazla karar birimi tarafından oynandığı anlamına gelmektedir. Her oyuncu için sonlu veya sonsuz sayıda olası eylem planının bir listesi yer almaktadır. Bu olası eylem planlarına "strateji" adı verilmektedir. Bir oyun, her oyuncunun kendi eylem yollarından birini seçmesiyle oynanmaktadır. Oyun, oyundaki oyuncular ve stratejiler aşağıda gösterildiği gibi bir matrisin elemanları ile temsil edilebilmektedir (Murthy, 2005):

$$A \begin{bmatrix} & B \\ & I & II \\ I & & \\ II & & \\ III & & \end{bmatrix} \quad (1)$$

Oyunlarda seçimler oyuncular tarafından eş zamanlı olarak yapılmaktadır, böylece hiçbir oyuncu kendi eylem yoluna karar verene kadar rakibinin seçimini bilememektedir. Oyun teorisine ilişkin bir diğer varsayım her oyuncunun tüm bilgilere sahip olması varsayımdır. Oyunu oluşturmada olan stratejilerin olası sonuçları ödeme olarak adlandırılmakta olan, genellikle para veya tatmin için başka bir nicel ölçüt ile temsil edilen kazanç kümesini belirlemektedir. Stratejilerin oyuncular açısından sonuçlarının gösterildiği bu ödemeler matrisi bir kazanç matrisidir ve kazanç matrislerinde kayıplar, negatif kazanç olarak gösterilmektedirler. Dolayısıyla, her rövanştan sonra, bir oyuncu diğerine seçilen eylem dizilerine göre belirlenen bir miktar ödemektedir. 1 numaralı denklemde eğer alan matriste iki oyuncu bulunmaktadır. Bunlardan sol tarafta adı geçen oyuncu kazanan olarak bilinmektedir, yani burada A kazanan, verilen matris ise kazananın matrisidir. Yukarıda adı geçen oyuncu ise kaybeden olarak bilinmektedir. Kaybedenin matrisi, verilen matrisin negatif versiyonu ile temsil edilmektedir. Bu tip bir matriste A bir birim kaybederse ve bunu B'ye vermek zorundadır, bu da B'nin bir birim kazandığı anlamına gelmektedir. Benzer şekilde eğer B bir birim kaybederse ve bunu A'ya vermek zorundadır, bu da A'nın bir birim kazandığı anlamına gelmektedir (Murthy, 2005).

Oyun Teorisinde oyunda tüm oyuncuların rasyonel ve akıllıca hareket ettikleri varsayılmaktadır. Oyunda her oyuncu kazancını en üst düzeye çıkarmak veya kaybını en aza indirmekle ilgilenmektedirler. Kazanan, yani matrisin sol tarafındaki oyuncu her zaman kazancını en üst düzeye çıkarmaya çalışmaktadır ve "Maksimin Oyuncu" olarak bilinmektedir. Benzer şekilde, matrisin en üstündeki B oyuncusu da her zaman kaybını en aza indirmeye çalışan bir kaybedendir ve "Minimaks Oyuncu" olarak bilinmektedir, yani maksimum kaybını en aza

indirmeye çalışmaktadır. Oyun teorisi modelleri, aşağıdaki faktörlere bağlı olarak çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir (Murthy, 2005):

- Oyuncu sayısı,
- Kazanç ve kayıpların cebirsel toplamı,
- Her oyuncunun strateji sayısı

Oyuncu Sayısına Göre Oyunlar: Oyun kuramına göre oyunda yer almakta olan oyuncu sayısı iki ise bu tip oyunlara “İki Kişilik Oyun” adı verilmektedir. Oyuncu sayısı “ n ” ise ($n \geq 3$), bu tip oyunlar n kişilik oyun olarak adlandırılmaktadır.

Kazanç ve Kayıpların Cebirsel Toplamına Göre Oyunlar: Bir oyuncunun kazancının diğer oyuncunun kaybı olduğu veya her iki oyuncunun kazançlarının cebirsel toplamının sıfıra eşit olduğu bir oyunlara Sıfır Toplamlı Oyun (ZSG) adı verilmektedir. Sıfır toplam bir oyunda, tüm oyuncuların oyundan sonraki kazançlarının cebirsel toplamı sıfır olacaktır. Yani, n kişilik bir oyunda bir oyuncuya ödenen miktar g_i ise, tüm g_i 'lerin toplamı sıfıra eşitse oyun sıfır toplam bir oyun olmaktadır (Murthy, 2005).

Her Oyuncunun Strateji Sayısı Açısından Oyunlar: Bazı oyunlarda her iki oyuncunun da mutabık oldukları bir denge noktası bulunmaktadır. Von Neumann'ın minimaks teoremine göre kazancını kaybeden oyuncunun minimum kayıpları üzerinden maksimize etmeye çalışan kazanan oyuncunun maksimin stratejisi ile, kaybını kazanan oyuncunun maksimum kazançları üzerinden minimize eden kaybeden oyuncunun her ikisi de kendi stratejilerini oynadıklarında aynı ödemede anlaşılmaktadır. Bu tip oyunlar pür/arı strateji bulunmaktadır. Buna göre her iki oyuncu da Pür stratejili oyunlarda stratejiler arasından birini kesin olarak seçmektedirler. Bu durumda oyunun bir eyer noktası bulunmaktadır. Böylelikle oyun pür/arı stratejiler altında oluşmaktadır her iki oyuncunun da oynadıkları stratejiyi değiştirerek daha iyi bir kazanç elde etme ya da kayba razı olma ihtimalleri yoktur ve bunun bir sonucu olarak her iki oyuncunun da oynadıkları stratejiyi değiştirmeleri için herhangi bir motivasyonu bulunmamaktadır. (Murthy, 2005).

Her oyun, her iki oyuncunun da mutabık olduğu bir denge noktasına sahip değildir. Bu durumda pür stratejiden bahsetmek mümkün değildir. Bu durumda oyuncuların mevcut stratejilerini belirli olasılıklarla oynayacakları ve bu olasılıklara bağlı olarak da oyunun maksimin oyuncusu için en kazançlı, minimaks oyuncusu için en az kayıplı bir oyun değerinde dengeleneceği karma stratejileri uygulayacakları varsayılmaktadır. Böyle oyunlara karma stratejili oyunlar adı verilmektedir (Murthy, 2005).

Von Neumann'ın minimaks teoremi karma stratejili oyunların optimizasyonunda da kullanılmaktadır. Buna göre karma stratejili oyunlar V oyun değerinde dengeye gelmektedirler. Bu oyun değeri maksimin oyuncusunun seçtiği karma strateji için en küçük olası kayıpların en büyüğünü ifade etmekte iken, minimaks oyuncusu için maksimin oyuncusunun beklenen kazancının oyun değeri V 'yi aşmasının önüne geçmektedir. Yine benzer şekilde oyun değeri minimaks oyuncusunun seçtiği karma strateji için en büyük olası kazançların en küçüğünü ifade etmekte iken, maksimin oyuncusu için minimaks oyuncusunun beklenen kayıpların oyun değeri V 'den daha düşük olmasını kısıtlanmaktadır. Bu kısıt seti hem minimaks, hem de maksimin oyuncusu açısından geçerli olan bir denge değerinin oluşmasına neden olmakta ve oyunun karma stratejiler altında dengelenmesine olanak sağlamaktadır. Karma stratejili oyunlar, oyunda pür stratejilerin bulunmadığı durumda oyuncuların rasyonel davranışını modelleyerek oyunun dengelendiği bir değer oluşmasına ve oyunun çözüme kavuşmasına imkân sağlamaktadır (Murthy, 2005).

Doğrusal programlama yöntemi yazınında sıklıkla kullanılmakta olan, ilk ortaya atılışı 1950'li yıllara dayanan bir optimizasyon tekniğidir. Teknik diğer pek çok yöntem tekniği gibi ilk olarak askeri amaçlarla kullanılmıştır (Matousek ve Gartner, 2007). Tekniğin kullanım amacı belirli bir amaç fonksiyonu doğrultusunda (maksimizasyon ya da minimizasyon), belirli kısıtlar altında en iyi sonuca ulaşmaktır. Yöntemde kullanılan amaç fonksiyonu ve kısıtları oluşturmakta olan karar değişkenleri arasındaki ilişkiler doğrusal yapıdadır (Krajewski vd, 2014).

Doğrusal programlama tekniği pür/arı stratejiler altında oynanmayan iki kişilik sıfır toplamlı oyunların çözümünde araç olarak kullanılabilir. Eyer noktasının mevcut olmadığı oyunlarda dengenin ancak karma stratejiler aracılığı ile saptanabilmesi mümkün olmaktadır. Bu durumda oyuncuların olası stratejilerini

belirli olasılıklarla seçmesi gerekmektedir ve bu olasılıkların toplamının bire eşit olması durumu ve negatif olmaması koşulu, oyuncuların minimaks ya da maksimin stratejileri doğrusal kısıtlarla ifade edilebilmektedir (Krajewski vd, 2014).

Kazanan oyuncu olarak ödemeler matrisinde temsil edilen maksimin oyuncu için amaç, kaybeden oyuncunun olası minimum kayıpları arasından kazancını maksimize etmek olacağından bu oyuncu için kurulacak olan doğrusal programlama modeli maksimizasyon amaç fonksiyonu ile modellenmektedir. Buna karşılık, kaybeden oyuncu olarak ödemeler matrisinde temsil edilen minimaks oyuncu için amaç, kazanan oyuncunun olası maksimum kazançları arasından kaybını minimize etmek olacağından bu oyuncu için kurulacak olan doğrusal programlama modeli minimizasyon amaç fonksiyonu ile modellenmektedir. Her iki doğrusal programlama modeli birbirleri ile düale ilişkisi içinde bulunmaktadır. Kurulan doğrusal programlama modelinin çözümü sonucunda elde edilen V oyun değerini vermektedir. Bu düale ilişkisine bağlı olarak hem maksimin oyuncusunun kazancını maksimize eden V hem de minimaks oyuncusunun kaybını minimize eden V aynı doğrusal programlama modeli çiftinin çözümünden elde edilebilmektedir. Böylece doğrusal programlama tekniği ile karma strateji dengesini hesaplamak mümkün olmakta ve oyun kuramı ile optimizasyon arasında bağ kurulmaktadır. Aşağıda denklem 1’de gösterilen ödemeler matrisindeki maksimin oyuncu A’nın oyunu için kurulan doğrusal programlama modeli gösterilmektedir

$$\max V \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m p_i a_{ij} \geq v \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m p_i = 1 \quad (4)$$

$$p_i \geq 0 \quad \forall i \quad (5)$$

Burada a_{ij} , A’nın i . Stratejisini oynaması durumunda B’nin j . stratejisinin oynaması halinde elde ettiği ödemeyi göstermektedir. Maksimin oyuncu A, stratejilerini oynama olasılıklarını maksimize etmeye çalıştığı oyun değeri V iken, minimaks oyuncu B hangi stratejisini oynarsa oynasın A’nın beklenen kazancı V ’nin altına düşmeyecek şekilde seçmektedir. Ayrıca modele A oyuncusunun stratejileri oynama olasılıklarının toplamının 1 olduğu kısıtı ve A oyuncusunun stratejilerini oynama olasılıklarının pozitiflik koşulu eklenmektedir. Aşağıda denklem 1’de gösterilen ödemeler matrisindeki minimaks oyuncu B’nin oyunu için kurulan doğrusal programlama modeli gösterilmektedir.

$$\min V \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n q_j a_{ij} \leq v \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n q_j = 1 \quad (8)$$

$$q_j \geq 0 \quad \forall j \quad (9)$$

Burada a_{ij} , A’nın i . Stratejisini oynaması durumunda B’nin j . stratejisinin oynaması halinde elde ettiği ödemeyi göstermektedir. Minimaks oyuncu B, stratejilerini oynama olasılıklarını minimize etmeye çalıştığı oyun değeri V iken, maksimin oyuncu A hangi stratejisini oynarsa oynasın B’nin beklenen kazancı V ’nin üzerine çıkmayacak şekilde seçmektedir. Ayrıca modele B oyuncusunun stratejilerini oynama olasılıklarının pozitiflik koşulu eklenmektedir.

4.1 İnsan-Makine İşbirliği Paylaşım Oyunu (İMİPO)

Bu çalışmanın amacı, insan makine işbirliğinin iki oyunculu, sıfır toplamlı, karma stratejili oyunun oyun teorisi çerçevesinde doğrusal programlama tekniği ile modellenmesidir. Oluşturulacak olan bu model Endüstri 4.0’dan Endüstri 5.0’a geçti önem kazanan insan-makine işbirliğinin meydana getirdiği stratejik etkileşimi oyuncular açısından fayda temelli olarak açıklamayı amaçlamaktadır. Modelde her iki oyuncu için de %25, %50 ve %75 iş paylaşımı olmak üzere üç farklı oyun stratejisi tanımlanmıştır. Bu oranlar, görevlerin insan ya da makine tarafından üstlenilme yüzdesini temsil etmektedirler. Çalışmada kavramsal açıklığı arttırmak amacıyla bu stratejiler katılım yüzdeslerine göre insan açısından sırayla “Düşük İnsan Katılımı, Dengeli İşbirliği ve Yüksek İnsan Katılımı” olarak adlandırılmışlardır. Benzer şekilde makine açısından stratejiler sırasıyla “Destekleyici Cobot, Eşit-Ortak Cobot, Baskın Cobot” olarak adlandırılmaktadır.

İMİPO için oluşturulan ödemeler matrisi insan oyuncusu maksimin oyuncu, makine oyuncusu minimaks oyuncu olacak şekilde modellenmiştir. Matriste yer alan ödemeler (a_{ij}) fayda temelli olarak ele alınmaktadır. Ödemeler belirlenirken Tablo 2 ve Tablo 3'te yer alan literatür taramasından yararlanılmıştır. Her bir insan-makine strateji kesişimi için fayda skorlarının belirlenmesinde üç uzman görev almıştır. Bu uzman grubunun biri akademisyen (endüstri 5.0, endüstri 4.0 ve insan-makine işbirliği konularında akademik çalışmaları bulunan), ikisi ise üretim sektöründe cobot uygulamaları konusunda deneyimli yöneticilerden oluşmaktadır. Görüşüne başvurulmuş 3 uzmanın her birinden her bir a_{ij} 'yi Tablo 2 ve Tablo 3'ten elde edilen "Ergonomik Uyum ve Fiziksel İş Yükü, Bilişsel Yük ve Teknolojik Karmaşıklık, İş Güvenliği Algısı ve Güvenlik Riski Farkındalığı, İnsan-Makine İşbirliği ve Etkileşim Kalitesi, Rol/Beceri Gelişimi ve İş Tatmini, İş Güvencesi Algısı ve Teknoloji Kaynaklı Kaygılar, Dayanıklılık Uyum ve Örgütsel Destek Algısı, Sürdürülebilirlik ve Etik/Sosyal Duyarlılık Algısı, Ekonomik Fizibilite ve Maliyet Algısı" olmak üzere bu 9 boyutun her birine maksimin oyuncusu olan insan açısından kazanç temelli fayda sağlaması durumundan 0 ile 10 arasında bir puan vermesi, maksimin oyuncusu açısından kayıp temelli bir fayda sağlaması (yani dezavantajlı olması) durumunda ise -10 ile 0 arasında bir puan vererek değerlendirmesi istenmiştir. Bunun sonucunda $k=1,2,...,5$ olmak üzere her bir uzman için, her bir a_{ij} 'nin boyutlara göre değerlendirme ortalaması ile, uzmanlara göre $IMIPO_k$ matrisi elde edilmiştir. Elde edilen üç adet $IMIPO_k$ matrisinin ortalamasının alınmasıyla da doğrusal olarak modellenecek nihai $IMIPO_t$ ödemeler matrisine ulaşılmıştır. Oluşturulmuş olan $IMIPO_k$ ve $IMIPO_t$ matrisleri şu şekildedir;

$$A_{imipo_1} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 6 & 0 & 6 \\ 2 & 5 & 0 \end{bmatrix} \quad (8),$$

$$A_{imipo_2} = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 4 \\ 3 & 3 & 6 \\ 4 & 3 & 2 \end{bmatrix} \quad (9),$$

$$A_{imipo_3} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 5 \\ 4 & 1 & 3 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (10),$$

$$A_{imipo_t} = \begin{bmatrix} 2.00 & 4.00 & 5.33 \\ 4.33 & 1.33 & 5.00 \\ 3.00 & 4.33 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Karar değişkenler, makinenin stratejilerini oynama olasılıkları olmak üzere x_1, x_2, x_3

v , oyunun denge değeri olmak üzere, makine oyuncusu için $IMIPO$ doğrusal programlama modeli aşağıdaki gibi modellenmektedir;

$$\max v$$

$$2.00x_1 + 4.33x_2 + 3.00x_3 \geq v$$

$$4.00x_1 + 1.33x_2 + 4.33x_3 \geq v$$

$$5.33x_1 + 5.00x_2 + 1.00x_3 \geq v$$

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1$$

$$x_i \geq 0$$

Oluşturulmuş olunan doğrusal programlama modeli Excel Solver'da çözdürülmek üzere kısıtlar oyun değerine bölünerek normalize edilmiş ve standart forma getirilmiştir. Elde edilen çözüm sonuçlarına göre elde edilen denge oyun değeri 3.245 olarak bulunmuştur. Makine ve insan oyuncularının stratejileri ve oyunları oynama olasılıkları tablo 4'te gösterilmektedir;

Tablo 4: Makine ve İnsan Oyuncularının Stratejileri ve Oynama Olasılıkları

Oyuncu	Strateji	Olasılık
Makine	Destekleyici Cobot (%25 M)	0.2054
Makine	Eşit-Ortak Cobot (%50 M)	0.3389
Makine	Baskın Cobot (%75 M)	0.4556
İnsan	Yüksek İnsan Katılımı (%75 H)	0.4692
İnsan	Dengeli İşbirliği (%50 H)	0.3924
İnsan	Düşük İnsan Katılımı (%25 H)	0.1382

Makinenin maksimin oyuncu olduğu ödemeler matrisinin doğrusal programlama yöntemi ile modellenip Excel solver ile çözümünden elde edilen primal model sonuçlar incelendiğinde makine oyuncusunun oyunda en yüksek olasılıkla (0.4556), “Baskın Cobot” oyun stratejisi ile %75 oranında oyuna katılma stratejisini tercih ettiği, bunu sırasıyla “Eşit- Ortak Cobot” oyun stratejisi 0.3389 olasılıkla takip ederek %50’lik katılımlı stratejisini tercih ettiği, son olarak da 0.2054’lük olasılıkla da yalnızca işlerin %25’ini üstleneceği “Destekleyici Cobot” stratejisini oynamak istediğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, uzman görüşleri dikkate alındığında “Baskın Cobot” stratejisinin insan açısından daha yüksek kayıplara yol açması bakımından, makine açısından daha fazla kazanç getirmesi ile uyumlu olmaktadır.

Makinenin maksimin oyuncu olduğu ödemeler matrisinin doğrusal programlama yöntemi ile modellenip Excel solver ile çözümünden elde edilen dual model sonuçları, minimaks oyuncu insanın oyun stratejilerinin oynama olasılıklarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Primal modelin duyarlılık analizi çıktısı sonuçlarına göre insan oyuncusu en yüksek olasılıkla (0.4692) “Yüksek İnsan Katılımı” stratejisini oynayarak %75’lik katılımla insanın iş süreçlerindeki varlığını korumak istediğini göstermektedir. Bu tercihinin 0.3924 olasılıkla %50’lik insan katılımıyla “Dengeli İşbirliği” ve 0.1382’lik olasılıkla %25’lik katılımı ile “Düşük İnsan Katılımı” stratejileri izlemektedir.

5 | SONUÇLAR

Çalışmada Endüstri 5.0’ın vurgulamakta olduğu insan-makine işbirliğine dayalı yaklaşım iki oyunculu sıfır toplam ve karma stratejili bir oyun teorisi modeli geliştirilmiştir. Literatür incelendiğinde Endüstri 5.0’ın çizelgeleme, montaj hattı dengeleme gibi insan faktörünün üretim süreçlerinde yer aldığı durumlardaki optimizasyonunun değerlendirildiği görülmekte, fakat insan-makine oyuncularının aynı anda sistemde var olmasının sistem üzerinde yaratmakta olduğu avantaj ve dezavantajlar bakımından, yaklaşık hangi yüzdelerle var olmayı tercih ettikleri ele alınmamaktadır. Bu karşılıklı rasyonel ve stratejik işbirliğinin oyun kuramı ile modellenmesi bu çalışmasının konusunu oluşturmaktadır. Bu çalışmada insan ve makine oyuncularının birlikte yer aldıkları İnsan-Makine İşbirliği Paylaşım Oyunu (İMİPO) için doğrusal programlama tekniği ile oyun teorisi çerçevesinde bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Çalışmada oyunun modellenmesinde kullanılacak ödemelerin tespitinde, bir akademisyen (endüstri 5.0, endüstri 4.0 ve insan-makine işbirliği konularında akademik çalışmaları bulunan), ikisi üretim sektöründe cobot uygulamaları konusunda deneyimli yöneticinin uzman görüşlerine başvurulmuştur.

Oluşturulan modelde oyuncuların stratejileri ele alış biçimlerinde rasyonel düşünce süreçlerinde dikkate aldıkları varsayılan Endüstri 5.0’ın avantaj ve dezavantajları “Ergonomik Uyum ve Fiziksel İş Yüğü, Bilişsel Yük ve Teknolojik Karmaşıklık, İş Güvenliği Algısı ve Güvenlik Riski Farkındalığı, İnsan-Makine İşbirliği ve Etkileşim Kalitesi, Rol/Beceri Gelişimi ve İş Tatmini, İş Güvencesi Algısı ve Teknoloji Kaynaklı Kaygılar, Dayanıklılık Uyum ve Örgütsel Destek Algısı, Sürdürülebilirlik ve Etik/Sosyal Duyarlılık Algısı, Ekonomik Fizibilite ve Maliyet Algısı” olmak üzere 9 adet boyuttan meydana gelmektedir. Bu boyutlar görüşlerine başvuru uzmanların her bir insan-makine stratejisinin kesişiminde stratejinin her iki oyuncu açısından etkisinin değerlendirilmesinde kullanılarak bu çok boyutluluk modele yansıtılmıştır. Buna bağlı olarak oluşturulmuş olan oyun modeli, yalnızca teknik iş bölümü açısından değil, ergonomik uyum, bilişsel yük, güvenlik, öğrenme,

esneklik, sürdürülebilirlik ve maliyet gibi Endüstri 5.0'ın kritik unsurlarını da kapsayan zengin bir karar yapısını içermektedir.

Model yalnızca maksimin oyuncu makine için doğrusal programlama ile modellenmiş, insan ve makine oyuncular arasındaki düale ilişkisi gereği duyarlılık analizleri sonuçlarına göre insan oyuncusunun da oyunlarını oynama olasılıkları hesaplanmıştır. Excel solver ile çözülen oyunun denge noktasının 3.245 olduğu görülmektedir. Bu değer makine oyuncusu açısından insan oyuncusu hangi stratejisini oynarsa oynasın elde edeceği beklenen getiriyi göstermektedir. Aynı şekilde insan oyuncusu açısından da makine oyuncusu hangi stratejisini oynarsa oynasın beklenen kaybı 3.245 düzeyinde fayda puanını verecektir. Oyun değerinin pozitif olması makinenin kazanç, insan oyuncusunun ise bu oyundan kayıp ile ayrılacağını göstermektedir. Makine bu durumda stratejik üstünlüğe sahiptir. Fakat fayda düzeyinin 3.245 gibi düşük bir değer olması insan oyuncusunun Endüstri 5.0 ile birlikte gelen insan-makine işbirliği oyununda tamamen baskılanmayıp, az bir kayıp yaşayacağını da ifade etmektedir. Buna göre, insan oyuncusu da makine oyuncusuna karşı Endüstri 5.0'ın insana bağlı avantajlarından kaynaklanan stratejik avantajları hala bulunmaktadır. Buna göre, makine ortalama koşullarda insan karşısında stratejik bir avantaja sahip olsa da burada mutlak üstünlük söz konusu değildir. İnsan oyuncusu oyunun dengesinde kritik bir rol oynamaya devam etmektedir. Bu da tam otomasyon yerine karşılıklı bağımlılığa dayanan insan-makine işbirliğine vurgu yapmaktadır.

Modelde her iki oyuncu için de %25, %50 ve %75 iş paylaşımı olmak üzere üç farklı oyun stratejisi tanımlanmıştır. Bu oranlar, görevlerin insan ya da makine tarafından üstlenilme yüzdesini temsil etmektedirler. Bu yüzdeler insan oyuncusu açısından sırasıyla, "Düşük İnsan Katılımı, Dengeli İşbirliği ve Yüksek İnsan Katılımı" olarak adlandırılmışlardır. Makine oyuncusu açısından ise sırasıyla, "Destekleyici Cobot, Eşit-Ortak Cobot, Baskın Cobot" olarak adlandırılmaktadır. Modelden elde edilen primal çözüm sonuçlarına göre makine oyuncusu en yüksek olasılıkla (0.4556) "Baskın Cobot" oyun stratejini oynamak istemektedir. Modelin dual çözümünden elde edilen insan oyuncusu açısından çözümlere göre ise, insan oyuncusu en yüksek olasılıkla (0.4692) "Yüksek İnsan Katılımı" stratejini oynamak istemektedir. Bu sonuçlar otomasyon seviyesinin artmakta olduğu günümüzde insan oyuncusunun iş süreçlerinde aktif olarak katılmasının ona daha fazla fayda sağlayacağı yönündeki rasyonel düşüncesini göstermektedir. İnsan oyuncusunun bilişsel, yaratıcı ve karar verici rolleri onu iş süreçlerindeki stratejik avantajını korumasına neden olmaktadır.

Literatür taramasından elde edilen ve uzman görüşleri alınırken insan-makine strateji ikililerinin fayda açısından kazanç/kayıp şeklinde değerlendirilmesinde kullanılan dokuz boyutun insan ve makine oyuncularının strateji seçimlerinde etkileri oyun sonuçlarından görülebilmektedir. Buna göre; ergonomi, güvenlik, etkileşim kalitesi, esneklik ve beceri gelişimi gibi insanın avantajlı olduğu boyutlar nedeniyle insanın yüksek katılım stratejisine yöneldiği görülmektedir. Maliyet, verimlilik, esneklik ve kesinti sürelerinin azaltılması gibi makinesinin oyunda öne çıkmasına neden olan boyutlar ise makinenin baskın stratejisini öne çıkarmak istemesine neden olmaktadır. Kültürel-örgütsel direnç, bilişsel yük ve teknolojik karmaşıklık gibi boyutlar insan ve makine oyuncularının her ikisi açısından da daha nötr etkilere sahiptir.

İnsan-makine etkileşimi tek boyutlu bir görev paylaşımı problemi değildir. Elde edilmiş sonuçlar da Endüstri 5.0 bağlamında insan-makine işbirliğinin yalnızca teknolojik uyum perspektifinden ele alınmaması gerektiğini ortaya koymaktadır. Endüstri 5.0 insan ve makine oyuncularını açısından karşılıklı etkileşim içinde oldukları stratejik bir denge sürecidir. Her iki oyuncu da sistem üzerindeki davranışlarını faydalarını eniyecek tercihler şekilde ortaya koymaya çalışmaktadırlar. Bu yönüyle insan-makine işbirliğinin salt üretim yönlü değerlendirilmemesi, karar teorisi, davranışsal ekonomi açısından da değerlendirilecek disiplinler arası bir alan olduğu görülmektedir. Oluşturulmuş olunan modelin çözümünden elde edilen oyunun denge noktası, insan ve makine oyuncularının birbirleri ile olan stratejik etkileşimlerinin Endüstri 5.0'ın temel ilkeleri ile uyumlu olarak optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

- Adel, A. (2022). Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas. *Journal of Cloud Computing*, 11(1), 40.
- Ang, K. C., Sankaran, S., & Liu, D. (2025). Advancing sociotechnical systems theory: New principles for human-robot team design and development. *Applied Ergonomics*, 129, 104604.
- Bouaziz, N., Bettayeb, B., Sahnoun, M. H., & Yassine, A. (2024). Incorporating uncertain human behavior in production scheduling for enhanced productivity in industry 5.0 context. *International Journal of Production Economics*, 274, 109311.
- Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry* (No. KI-BD-20-021-EN-N). Directorate General for Research and Innovation (DG RTD) of the European Commission.
- Carayannis, E. G., & Morawska-Jancelewicz, J. (2022). The Futures of Europe: Industry 5.0 as an enabler of human-centric, sustainable and resilient European industry. *Journal of the Knowledge Economy*, 13(2), 926–943.
- Carayannis, E. G., & Morawska-Jancelewicz, J. (2022). The futures of Europe: Industry 5.0 as a renewal opportunity. *Journal of the Knowledge Economy*, 13(6), 3567–3584.
- Ciccarelli, M., Forlini, M., Papetti, A., Palmieri, G., & Germani, M. (2024). Advancing human–robot collaboration in handcrafted manufacturing: cobot-assisted polishing design boosted by virtual reality and human-in-the-loop. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(9), 4489–4504.
- Destouet, C., Tlahig, H., Bettayeb, B., & Mazari, B. (2023). Flexible job shop scheduling problem under Industry 5.0: A survey on human reintegration, environmental consideration and resilience improvement. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 155–173.
- Destouet, C., Tlahig, H., Bettayeb, B., & Mazari, B. (2024). Multi-objective sustainable flexible job shop scheduling problem: Balancing economic, ecological, and social criteria. *Computers & Industrial Engineering*, 195, 110419.
- Dwivedi, A., Agrawal, D., Jha, A., & Mathiyazhagan, K. (2023). Studying the interactions among Industry 5.0 and circular supply chain: Towards attaining sustainable development. *Computers & Industrial Engineering*, 176, 108927.
- Falerni, M. M., Pomponi, V., Karimi, H. R., Nicora, M. L., Dao, L. A., Malosio, M., & Roveda, L. (2024). A framework for human–robot collaboration enhanced by preference learning and ergonomics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89, 102781.
- Faraji, A., Ghasemi, E., Arya, S. H., & Mahabadi, H. A. (2024). Prediction of Effects of Industry 5.0 Concepts on Construction 5.0. In *3rd International Conference on recent advances in Engineering, Innovation & Technology*. [online] https://www.researchgate.net/publication/385848718_Prediction_of_Effects_of_Industry_50_Concepts_on_Construction_50 [08.12.2024].
- Gao, Q., Liu, J., Liu, S., & Zhuang, C. (2025). From human-related to human-centric: A review of shop floor scheduling problem under Industry 5.0. *Journal of Manufacturing Systems*, 82, 531–546.
- George, A. S., & George, A. H. (2023). Revolutionizing Manufacturing: Exploring the Promises and Challenges of Industry 5.0. *Partners Universal International Innovation Journal*, 1(2), 22–38.
- Hwang, S. H., & Rey-Bellet, L. (2020). Strategic decompositions of normal form games: Zero-sum games and potential games. *Games and Economic Behavior*, 122, 370–390.
- Kadir, B. A., Broberg, O., & Souza da Conceição, C. (2019). Current research and future perspectives on human–robot collaboration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 3899–3914.

- Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., & Pirayesh, A. (2024). Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(5), 2065-2118.
- Kovari, A. (2024). Industry 5.0: Generalized definition key applications opportunities and threats. *Acta Polytechnica Hungarica*, 21(3), 267-284.
- Krajewski, L.J., Ritzman, L.P., & Malhotra, M.K. (2014). *Operation Management Processes And Supply Chains*, Pearson, İstanbul.
- Lawless, W., & Moskowitz, I. S. (2025). An Entropy Approach to Interdependent Human-Machine Teams. *Entropy*, 27(2), 176.
- Li, L., & Duan, L. (2025). Human centric innovation at the heart of industry 5.0—exploring research challenges and opportunities. *International Journal of Production Research*, 1-33.
- Longo, F., Padovano, A., & Umbrello, S. (2020). Human-robot collaboration and the future of work: Towards a human-centered Industry 5.0. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106845.
- Lou, S., Zhang, Y., Tan, R., & Lv, C. (2024). A human-cyber-physical system enabled sequential disassembly planning approach for a human-robot collaboration cell in Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 87, 102706.
- Mao, Z., Sun, Y., Fang, K., Huang, D., & Zhang, J. (2024). Model and metaheuristic for human-robot collaboration assembly line worker assignment and balancing problem. *Computers & Operations Research*, 165, 106605.
- Matoušek, J., & Gärtner, B. (2007). *Understanding and using linear programming* (Vol. 1). Berlin: Springer.
- Mukul, E., & Güler, M. (2024, December). An Integrated Hesitant Fuzzy-based SWOT Analysis for Industry 5.0 Technology Evaluation. In *2024 8th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Murthy, P. R. (2005). *Operations research (linear programming)*. bohem press.
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A human-centric solution. *Sustainability*, 11(16), 4371.
- Nourmohammadi, A., Fathi, M., & Ng, A. H. (2022). Balancing and scheduling assembly lines with human-robot collaboration tasks. *Computers & Operations Research*, 140, 105674.
- Ojstersek, R., Javernik, A., & Buchmeister, B. (2021). The impact of the collaborative workplace on the production system capacity: Simulation modelling vs. real-world application approach. *Advances in Production Engineering & Management*, 16(4), 431-442.
- Orso, V., Ziviani, R., Bacchiega, G., Bondani, G., Spagnolli, A., & Gamberini, L. (2022). Employee-centric innovation: Integrating participatory design and video-analysis to foster the transition to Industry 5.0. *Computers & Industrial Engineering*, 173, 108661.
- Osborne, M. J., & Rubinstein, A. (1994). *A course in game theory*. MIT press.
- Proia, S., Carli, R., Cavone, G., & Dotoli, M. (2021). Control techniques for safe, ergonomic, and efficient human-robot collaboration in the digital industry: A survey. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19(3), 1798-1819.
- Rega, A., Di Marino, C., Pasquariello, A., Vitolo, F., Patalano, S., Zanella, A., & Lanzotti, A. (2021). Collaborative workplace design: A knowledge-based approach to promote human-robot collaboration and multi-objective layout optimization. *Applied Sciences*, 11(24), 12147.
- Romero, D., Stahre, J., & Taisch, M. (2020). The Operator 4.0: Towards socially sustainable factories of the future. *Computers & industrial engineering*, 139, 106128.
- Sanogo, K., Benhafssa, A. M., & Sahnoun, M. H. (2025). A game theory approach for optimizing job shop scheduling problems with transportation in common shared human-robot environments. *Computers & Industrial Engineering*, 111366.
- Shabur, M. A., Shahriar, A., & Ara, M. A. (2025). From automation to collaboration: exploring the impact of industry 5.0 on sustainable manufacturing. *Discover sustainability*, 6(1), 341.

- Tallat, R., Hawbani, A., Wang, X., Al-Dubai, A., Zhao, L., Liu, Z., ... & Alsamhi, S. H. (2023). Navigating industry 5.0: A survey of key enabling technologies, trends, challenges, and opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 26(2), 1080-1126.
- Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1953). *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press.
- Wang, J., Hong, Y., Wang, J., Xu, J., Tang, Y., Han, Q. L., & Kurths, J. (2022). Cooperative and competitive multi-agent systems: From optimization to games. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(5), 763-783.
- Wang, S., & Jiao, R. J. (2025). Cognitive intelligent task allocation for human-automation symbiosis in Industry 5.0 manufacturing systems via non-cooperative game theory: a bi-level optimization approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 136(3), 1717-1739.
- Wolniak, R. (2023). Industry 5.0-characteristic, main principles, advantages and disadvantages. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska*, (170), 663-678.
- Yang, Y., & Zhang, Y. (2024). Design of Human-Machine Integration System to Meet Diverse Interactive Tasks. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1-14.
- Zhang, X., Fathollahi-Fard, A. M., Tian, G., Truong Pham, D., Zhao, Q., & Aljuaid, M. (2025b). A multi-objective bi-population evolutionary algorithm for human-robot collaborative disassembly sequence planning with interval type-2 fuzzy modelling. *Journal of Engineering Design*, 1-57.
- Zhang, X., Fathollahi-Fard, A. M., Tian, G., Yaseen, Z. M., Pham, D. T., Zhao, Q., & Wu, J. (2024). Human-robot collaboration in mixed-flow assembly line balancing under uncertainty: an efficient discrete bees algorithm. *Journal of Industrial Information Integration*, 41, 100676.
- Zhang, X., Zhao, Q., Tian, G., Fathollahi-Fard, A. M., Yaseen, Z. M., & Pham, D. T. (2025a). Multi-objective heterogeneous interactive human-robot collaborative disassembly line balancing with partial destructive mode in type-2 fuzzy environment. *Journal of Industrial Information Integration*, 100963.
- Zou, R., Liu, S., Luo, Y., Liu, Y., Feng, J., Wei, M., & Sun, J. (2024, March). Balancing humans and machines: A study on integration scale and its impact on collaborative performance. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 38, No. 16, pp. 17628-17636).