Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi
The Black Sea Journal of Sciences
DOI: 10.31466/kfbd.1912911
ISSN (Online): 2564-7377
https://dergipark.org.tr/tr/pub/kfbd

Araştırma Makalesi / Research Article

Endüstri 5.0'da İnsan-Makine İş Birliğinin Çevresel Performansa Etkisi: KOBİ'ler Üzerine Sistematik Bir Derleme ve Çerçeve Önerisi

Impact of Human–Machine Collaboration on Environmental Performance in Industry 5.0: A Systematic Review and Framework Proposal on SMEs

Ali AYHAN[1]*, Fatma Didem TUNÇEZ[2]

Öz

Bu çalışma, Endüstri 5.0'ın insan merkezli vizyonu çerçevesinde, işbirlikçi robotların (cobot), yapay zekânın (YZ) ve dijital ikizlerin imalat KOBİ'lerindeki çevresel performans üzerindeki etkisini sistematik bir derleme ve kavramsal çerçeve geliştirme yaklaşımıyla incelemektedir. Çalışmanın temel amacı; teknolojilerin kontrollü koşullardaki çevresel potansiyeli ile gerçek üretim sahasındaki performansı arasındaki farkı ampirik verilerle belgelemek, bu farkın arkasındaki sosyo-teknik dinamikleri açıklamak ve uygulanabilir bir kapatma çerçevesi sunmaktır. PRISMA 2020 protokolü izlenerek Web of Science (WoS) veri tabanında (2020–2025) taranan 35.442 yayından; gerçek üretim sahasında uygulanmış ve ölçülebilir çevresel KPI'lar (enerji, emisyon, atık) içeren 28 ampirik makale derinlemesine tematik analize tabi tutulmuştur. Nitel bulgular frekans sayımı ve çapraz kaynak doğrulamayla sentezlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda çalışma, Bütünleşik Çevresel Performans Çerçevesi'ni (BÇPÇ) önermektedir. Çerçevenin matematiksel yapısı üç varsayıma dayanmaktadır: çarpımsal mantık (en zayıf halka ilkesi), analitik bağımsızlık ve normalize değerler. Türkiye KOBİ'leri için CaaS teşvikleri, sertifikalı Yeşil Cobot Operatörü eğitimleri, gerçek zamanlı çevresel geri bildirim araçları ve dijital olgunluk platformları gibi doğrudan uygulanabilir politika araçları önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 5.0, İnsan-makine iş birliği, Çevresel performans, Sosyo-teknik sistemler, Yeşil okuryazarlık.

Abstract

This study investigates the impact of collaborative robots (cobots), artificial intelligence (AI), and digital twins on the environmental performance of manufacturing SMEs within the human-centric vision of Industry 5.0. Using a systematic review and conceptual framework development approach, the study aims to empirically document the gap between these technologies' environmental potential under controlled conditions and their performance in real-world production environments, explain the socio-technical dynamics underlying this gap, and propose an actionable framework to bridge it. Following the PRISMA 2020 protocol, 35,442 publications indexed in the Web of Science (WoS) database between 2020 and 2025 were screened. Of these, 28 empirical articles involving real-world production applications and measurable environmental KPIs (energy, emissions, and waste) were subjected to in-depth thematic analysis. The qualitative findings were synthesized through frequency counting and cross-source validation. Based on these findings, the study proposes the Integrated Environmental Performance Framework (IEPF. The mathematical structure of the framework is based on three assumptions: multiplicative logic (the weakest-link principle), analytical independence, and normalized values. For Turkish SMEs, directly applicable policy instruments are proposed, including CaaS incentives, certified "Green Cobot Operator" training, real-time environmental feedback tools, and digital maturity platforms.

Keywords: Industry 5.0, Human–machine collaboration, Environmental performance, Socio-technical systems, Green literacy.

[1]KTO Karatay Üniversitesi, Disiplinlerarası İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı, Konya, Türkiye
[2]KTO Karatay Üniversitesi, Enerji Yönetimi Bölümü, Konya, Türkiye

***Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** ali.ayhan@karatay.edu.tr

Geliş/Received: 19.03.2026 **Kabul/Accepted:** 21.05.2026 **Yayın/Published:** 14.10.2026

Ayhan, A., Tunçez, F.D. (2026). Endüstri 5.0'da İnsan-Makine İş Birliğinin Çevresel Performansa Etkisi: KOBİ'ler Üzerine Sistematik Bir Derleme ve Çerçeve Önerisi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 16(4), 1769-1786. https://doi.org/10.31466/kfbd.1912911

1. Giriş

1.1. Endüstri 5.0'ın Ortaya Çıkışı

Küresel sanayi, son yirmi yılın dijital dönüşüm dalgasının ardından yeni bir aşamaya girmiştir. Endüstri 4.0'ın makineleri birbirine bağladığı ve otomasyon verimliliklerini artırdığı bu süreçte ortaya çıkan önemli bir boşluk fark edildi: Teknoloji merkezli bu yaklaşım, insanı sistemin çeperlerine itmişti. Avrupa Komisyonu'nun 2021 tarihli 'Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry' raporuyla tanımlanan Endüstri 5.0, tam da bu boşluğa yanıt olarak doğdu (European Commission, 2021; Breque vd., 2021). Bu yeni paradigma, yapay zekâ, cobot ve dijital ikizleri reddetmek yerine bunları insanın yaratıcılığı, etik karar alma yeteneği ve bağlamsal sezgisiyle simbiyotik bir ilişkide yeniden konumlandırmaktadır (Nahavandi, 2019; Xu vd., 2021; Demir vd., 2019). 2024-2025 literatüründe cobot ve YZ entegrasyonunun %20-30 verimlilik artışı sağladığı raporlanmaktadır (Zafar vd., 2024; Jefroy & Azarian, 2022).

1.2. Çevresel Sürdürülebilirlik Baskısı ve Yeşil Vaat

İmalat sektörü, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %24'ünden ve endüstriyel enerji tüketiminin %35'inden sorumludur (IEA, 2024). Avrupa Yeşil Mutabakatı ve 2050 net-sıfır hedefi, KOBİ'lere ölçülebilir çevresel performans yükümlülükleri getirmiştir (European Commission, 2019). Endüstri 5.0, bu baskıya 'yeşil insan-makine iş birliği' kavramıyla yanıt vermekte; enerji verimliliği, atık minimizasyonu ve döngüsel üretim süreçlerini insan operatörle birlikte tasarlanan teknolojilerle gerçekleştirmeyi vaat etmektedir (Mourtzis vd., 2022; Müller & Voigt, 2023; Nazarejova vd., 2024).

1.3. Literatürdeki Boşluklar ve Araştırma Problemi

Alanyazın incelendiğinde üç kritik boşluk göze çarpmaktadır:

- Teknik potansiyel ile gerçek saha performansı arasındaki 'performans açığı' üzerine odaklanan ampirik çalışma sayısı oldukça azdır; net KPI verisi yalnızca 7 makalede raporlanmıştır (Venturi vd., 2025; Maddikunta vd., 2022; Radaelli vd., 2024).
- Güven eksikliği, düşük çevresel okuryazarlık ve örgütsel olgunluk yetersizliği gibi sosyo-teknik engellerin çevresel KPI'lar üzerindeki baskılayıcı mekanizmaları bütüncül bir modelle henüz açıklanmamıştır (Bragança vd., 2023; Cioffi vd., 2024).
- Gelişmekte olan ülkeler ve KOBİ'ler bağlamında saha verisi son derece sınırlıdır (Çaldıran vd., 2024; Öztemel & Tekez, 2025).

Bu boşluklar, şu araştırma problemini doğurmaktadır: Endüstri 5.0 teknolojilerinin kontrollü koşullardaki çevresel potansiyeli (%18–34) ile gerçek KOBİ üretim ortamındaki performansı (%9–19) arasındaki sapmanın kökleri büyük ölçüde sosyo-teknik çarpanlarda yatmaktadır.

1.4. Araştırmanın Amacı, Kapsamı ve Katkıları

Bu çalışma; Endüstri 5.0 bağlamında insan-makine iş birliği teknolojilerinin imalat KOBİ'lerindeki çevresel performans etkisini tematik sentez yoluyla sistematik olarak incelemeyi, performans açığının boyutunu ve nedenlerini ortaya koymayı ve ardından bu açığı kapatacak BÇPÇ'yi geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Kapsam: 2020–2025 yılları arasında WoS'ta indekslenen, gerçek saha uygulamasına dayanan ve ölçülebilir çevresel KPI'lar içeren 28 ampirik makaleyle sınırlıdır (20 ülke; İtalya 7, Çin 4, Polonya ve İspanya 3'er makale).

Başlıca katkılar üç boyuttadır:

- Teorik: Sosyo-teknik çarpanları dinamik geri bildirim döngüleriyle modelleyen BÇPÇ'yi sunmak.
- Metodolojik: 8 test edilebilir hipotez ve 2026–2035 araştırma yol haritası önermek.
- Pratik ve politika: Türkiye KOBİ'leri için 5 somut politika önerisi geliştirmek.

2. Metodoloji

2.1. Araştırma Tasarımı

Bu çalışma, tematik sentez ve kavramsal çerçeve geliştirme odaklı bir sistematik derleme olarak tasarlanmıştır. Karma yöntemsel çerçeve üç bileşenden oluşmaktadır: (a) nitel tematik sentez (Braun & Clarke, 2006), (b) nicel frekans analizi ve betimsel istatistik, (c) çapraz kaynak doğrulama. H1–H8 hipotezleri birincil veri toplama gerektiren gelecek araştırma soruları olarak önerilmektedir; mevcut çalışmada test edilmemektedir.

2.2. PRISMA 2020 Protokolü ve Makale Seçim Akışı

Sürecin şeffaflığını ve tekrarlanabilirliğini sağlamak için PRISMA 2020 protokolü uygulanmıştır (Page vd., 2021).

Tablo 1. PRISMA 2020 Protokolü ve Makale Seçim Akışı

Aşama	Sonuç ve Detaylar
Tanımlama	WoS Core Collection'da 2020–2025 için 35.442 kayıt tespit edilmiştir. Scopus'ta tamamlayıcı doğrulama da yapılmıştır.
Tarama	Başlık ve özet düzeyinde konu dışı, büyük ölçekli firma ve yalnızca laboratuvar/simülasyon çalışmaları elenmiştir.
Uygunluk	Tam metinler; gerçek saha uygulaması ve ölçülebilir çevresel KPI raporlama varlığı (Enerji, CO_2e, Su, Atık) kriterleriyle değerlendirilmiştir.
Dahil Etme	İmalat KOBİ'lerinde gerçekleştirilmiş ve nicel veri sunan 28 tam ampirik makale (20 farklı ülkeden; İtalya 7, Çin 4, Polonya ve İspanya 3'er) nihai senteze alınmıştır.

2.3. Arama Stratejisi

Boolean sorgu dört kümeyi eş zamanlı yakalamaktadır: (a) Teknoloji: 'collaborative robot*' OR 'cobot' OR 'digital twin' OR 'AI energy optimization'; (b) İnsan faktörü: 'operator trust' OR 'green literacy' OR 'technology acceptance'; (c) Örgüt faktörü: 'SME digital maturity' OR 'Cobot-as-a-Service' OR 'sustainable manufacturing SME'; (d) Çevresel KPI: 'energy reduction' OR 'CO_2e emissions' OR 'waste minimization' OR 'KPI environmental performance'. Sorgu 2020–2025 yayın yılıyla sınırlandırılmış; tamamlayıcı doğrulama amacıyla Scopus taraması da yapılmıştır.

2.4. Dahil Etme ve Dışlama Kriterleri

Tablo 2. Dahil Etme ve Dışlama Kriterleri

Kriter	Dahil Etme	Dışlama
Yayın Tarihi	2020–2025 WoS indeksli	2019 ve öncesi
Uygulama Ortamı	Gerçek üretim sahası (shop-floor)	Yalnızca laboratuvar veya simülasyon
Ölçek	KOBİ ölçeği	Büyük işletme / holding
Veri	En az bir ölçülebilir çevresel KPI sayısal olarak raporlanmış	Yalnızca nitel yorum
Teknoloji	Cobot, YZ veya dijital ikiz içeren ampirik saha çalışması	Derleme, konsept veya görüş makalesi

2.5. Veri Çıkarma ve Kodlama

Tablo 3. Veri Çıkarma Değişkenleri

Değişken	Tanım
Teknik Potansiyel (TP)	Teknolojinin optimize edilmiş veya teorik koşullarda vaat ettiği maksimum çevresel iyileştirme oranı (%).
Saha Performansı	İlgili teknolojinin KOBİ üretim hattında belirli bir süre sonunda gerçekleştirdiği fiili iyileştirme oranı (%).

Değişken	Tanım
Sosyo-Teknik Çarpanlar	Performans açığına neden olduğu raporlanan dört temel değişken: Güven (TM), Yeşil Okuryazarlık (GLM), KOBİ Olgunluğu (SMM), İş Modeli (BMM).
Bağlamsal Veriler	Ülke, sektör, uygulanan teknoloji ve yayın yılı.

Kodlama formu, Gastaldi vd. (2024) tarafından önerilen standart değişken grupları esas alınarak tasarlanmıştır. Kodlama iki bağımsız araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiş; araştırmacılar arası uyum Cohen's $\kappa = 0,87$ olarak hesaplanmıştır.

2.6. Analiz ve Sentez

Bulgular tematik analiz (Braun & Clarke, 2006) ve frekans sayımıyla sentezlendi. Yüzde aralıkları (teknik potansiyel %18–34, saha performansı %9–19), sayısal KPI verisi içeren 7 çalışmanın minimum–maksimum değerlerinin betimsel bir sentezidir; ağırlıklı ortalama veya meta-analiz sonucu değildir.

2.7. BÇPÇ Geliştirme

28 çalışmanın ortak bulgusu ışığında GÇP = TP × TM × GLM × SMM × BMM formülü geliştirilmiştir. Modelin matematiksel yapısı üç varsayıma dayanır: (a) Çarpımsal mantık: En düşük çarpan tüm sistemi baskılar; bu sosyo-teknik sistemlerdeki 'en zayıf halka' ilkesiyle örtüşür. (b) Analitik bağımsızlık: Çarpanlar kavramsal netlik için ayrışık ele alınmakla birlikte aralarında etkileşimler bulunduğu kabul edilir (H2 ve H3). (c) Normalize değerler: Çarpanlar 0–1 arasında ölçeklenir; polinom ilişkiler gelecek araştırma gündemindedir.

3. Bulgular

3.1. İncelenen Çalışmaların Profili

Senteze alınan 28 ampirik saha çalışması, 20 farklı ülkeden gelmektedir: 2020–2023: 3 makale; 2024: 10 makale; 2025: 15 makale. Yayın yoğunluğunun 2024-2025'te artması, Avrupa Yeşil Mutabakatı, net-sıfır hedefleri ve ESG raporlama zorunluluklarının saha pilotlarını hızlandırdığına işaret etmektedir. Coğrafi dağılım: İtalya (7), Çin (4), Polonya (3), İspanya (3). Avrupa %57, Asya ve diğerleri %43 paya sahiptir.

3.2. Performans Açığı: Teknik Potansiyel ile Saha Performansı

İncelenen çalışmalar, cobot, YZ ve dijital ikizlerin kontrollü koşullarda %18–34 aralığında çevresel iyileşme potansiyeli sunduğunu göstermektedir. Gerçek KOBİ üretim ortamlarında bu potansiyelin yalnızca %9–19'u hayata geçirebilmektedir. Net sayısal KPI verisi sunan 7 çalışmanın özeti Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4'taki çalışmalar yedi farklı sektörü ve coğrafyayı kapsamaktadır: Otomotiv (Çin), Havacılık (ABD), Elektronik (Hindistan), Tekstil (Pakistan), Makine imalatı (İtalya), Genel imalat (Şili) ve Lojistik (İtalya). Bu çeşitlilik bulguların farklı üretim bağlamlarına genellenebilirliğini güçlendirmektedir.

Tablo 4. Nicel Veri Sunan 7 Çalışmanın Özeti

#	Çalışma (Yıl)	Ülke	Teknoloji	Sektör	Tekn. Pot.(%)	Saha Per.(%)	KPI'lar	Çarpanlar
1	Wang vd.(2021)	Çin	Cobot/enerji opt.	Otomotiv	%30–34	%14–18	kWh/ürün, CO_2e	Güven, GLM düşük
2	Cohen vd.(2022)	ABD	Dijital ikiz+IoT	Havacılık	%25–30	%12–16	Enerji, atık	SMM eksikliği
3	Javaid vd.(2025)	Hindistan	YZ proses opt.	Elektronik	%22–28	%10–14	CO_2e, su	GLM eksikliği
4	Zafar vd.(2024)	Pakistan	Cobot+YZ dash.	Tekstil	%20–25	%9–12	Su, atık azalt.	CaaS benimsenmedi
5	Longo vd.(2023)	İtalya	Cobot+dijital ikiz	Makine imalatı	%28–32	%15–19	Enerji, CO_2e	TM, SMM
6	Urrea&Kern(2025)	Şili	Cobot montaj	Genel imalat	%18–22	%9–11	Enerji, hata or.	Operatör güveni
7	Felder vd.(2025)	İtalya	YZ+bilgi grafiği	Lojistik	%18–24	%9–13	CO_2e (nakliye)	SMM, veri enteg.

Tablo 4'teki sektörel çeşitlilik (otomotiv, havacılık, tekstil, elektronik, makine imalatı, lojistik) bulguların farklı üretim bağlamlarına genellenebilirliğini güçlendirmektedir; ancak çalışmaların ağırlıklı olarak gelişmiş ekonomilerden gelmesi, bulguların gelişmekte olan ülke KOBİ'lerine genellenmesinde ihtiyatlı olunmasını gerektirmektedir.

3.3. Sosyo-Teknik Çarpanlar

28 çalışmanın tamamında performans açığı birbiriyle etkileşen dört sosyo-teknik çarpanla ilişkilendirilmiştir.

Tablo 5. Sosyo-Teknik Çarpanlar ve Mekanizmaları

Çarpan	Görülme Sıklığı	Ana Baskılama Mekanizması	Kaynak Örnekleri
Operatör-cobot/YZ güven eksikliği	16 makale (%57)	Sistemlerin nominal hızın altında kullanılması, manuel müdahale artışı	Glikson & Woolley, 2021; Hancock vd., 2023
Çevresel farkındalık ve yeşil okuryazarlık yetersizliği	13 makale (%46)	Çevresel önerilerin anlaşılmaması	Nazarejova vd., 2024
KOBİ dijital ve yeşil olgunluk eksikliği	21 makale (%75)	Veri altyapısı, öğrenme kapasitesi ve süreç standardizasyonu eksikliği	Zare vd., 2025; Cioffi vd., 2024
CaaS/servitization benimsenmemesi	6 makale (%21; tamamı 2024–25)	Sürekli teknik destek ve eğitim ekseninde kapasite birikimi sağlanamaması	Pegado vd., 2025; Rahman, 2024

4. Bütünleşik Çevresel Performans Çerçevesi (BÇPÇ)

4.1. Kavramsal Temeller

BÇPÇ, sosyo-teknik sistemler kuramına (Trist, 1981; Pasmore, 2017) ve Endüstri 5.0'ın insan-merkezli sürdürülebilirlik vizyonuna (European Commission, 2021; Xu vd., 2021) dayanır. Temel sav: Teknik potansiyel sabit kalsa dahi, insan ve örgüt katmanlarındaki zayıflıklar çevresel çıktıyı sistematik olarak baskılar. Dolayısıyla çevresel performans, salt bir mühendislik optimizasyonu değil; aynı zamanda davranışsal ve örgütsel bir tasarım meselesidir.

4.2. Üç Katmanlı Mimari

Tablo 6. BÇPÇ'nin Üç Katmanlı Mimarisi

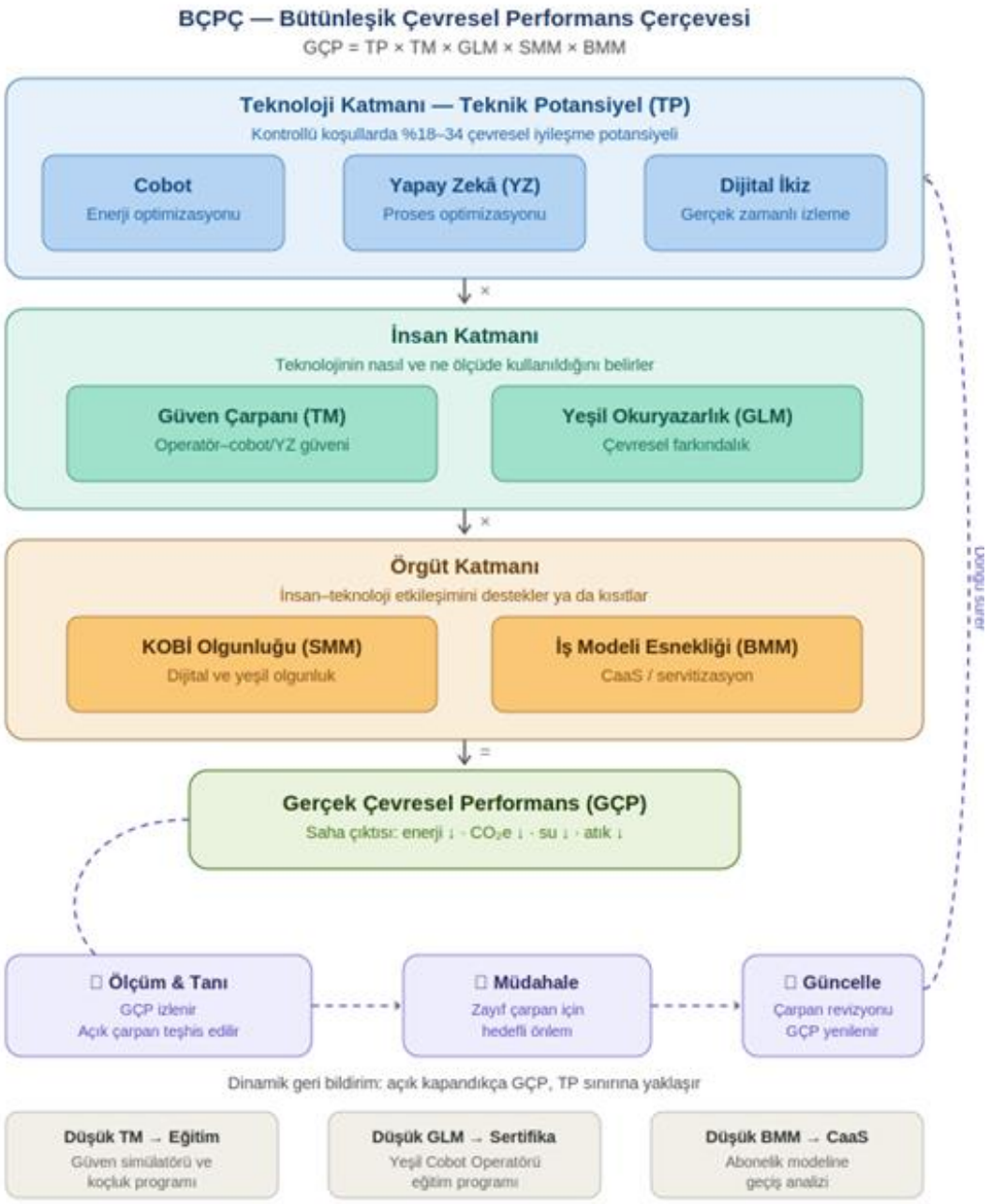
Katman	Bileşenler	İşlev	28 Mak. Sıklık	Kaynaklar
Teknoloji Katmanı	Cobot, YZ, dijital ikiz, IoT	%18–34 teknik potansiyeli sağlar	28/28	Wang vd., 2021
İnsan Katmanı	Güven Çarpanı (TM) + Yeşil Okuryazarlık (GLM)	Teknolojinin nasıl kullanıldığını belirler	16+13 makale	Glikson & Woolley, 2021
Örgüt Katmanı	KOBİ Olgunluk (SMM) + İş Modeli (BMM/CaaS)	İnsan-teknoloji etkileşimini destekler ya da kısıtlar	21+6 makale	Longo vd., 2023; Pegado vd., 2025

4.3. Performans Formülü ve Dinamik Geri Bildirim Döngüsü

GÇP = TP × TM × GLM × SMM × BMM

Model statik değil, sürekli öğrenen dinamik bir geri bildirim sistemi olarak işler. Döngü üç aşamadan oluşur:

- Ölçüm & Tanı: IoT/dijital ikiz kaynaklı gerçek zamanlı saha verileri (GÇP) formül tahminiyle karşılaştırılır; hangi çarpanın düşük olduğu tespit edilir.
- Hedefli Müdahale: Zayıf çarpanı iyileştirmeye yönelik önlem başlatılır (örn. düşük TM → güven simülatörü eğitimi; düşük BMM → CaaS geçiş analizi).
- Yeniden Hesaplama: Müdahale sonrası çarpan değeri güncellenir; döngü çevresel kazanım maksimize edilene dek sürer.



Şekil 1. BÇPÇ Dinamik Geri Bildirim Döngüsü. Üç katmanlı mimari (Teknoloji – İnsan – Örgüt) ve üç aşamalı optimizasyon döngüsü. GÇP = TP × TM × GLM × SMM × BMM.

4.4. Test Edilebilir Hipotezler (2026–2035 Yol Haritası)

BÇPÇ, yanlışlanabilir ve ölçülebilir 8 hipotezle yapılandırılmıştır. Bu hipotezler TÜBİTAK 1001/1003, KOSGEB KOBİ-AR-GE veya Horizon Europe kapsamında doğrudan test edilebilir.

Tablo 7. Test Edilebilir Hipotezler

H	İçerik	Çarpan	Önerilen Yöntem	Başarı Kriteri
H1	Operatör-cobot güveni arttıkça enerji verimliliği (kWh/ürün) anlamlı biçimde yükselir.	TM	SEM / Regresyon	$\beta>0,30$; $p<0,01$
H2	Yeşil okuryazarlık (GLM), güven ile enerji ve CO_2e azaltımı arasında aracılık yapar.	TM→GLM	PROCESS Model 4	Dolaylı etki %95 GA sıfır dışı
H3	Etik farkındalık, güven çarpanının (TM) çevresel performansa etkisini pozitif yönde modere eder.	TM+Etik	Moderated Reg.	Etkileşim $p<0,05$
H4	Kısa süreli (4–12 saat) yeşil yetkinlik eğitimi atık minimizasyonunu anlamlı artırır.	GLM	Paired t-test	%12–18 iyileşme; $p<0,001$
H5	CaaS kullanan KOBİ'ler, CapEx modeline göre daha yüksek çevresel performans sergiler.	BMM	ANCOVA	CaaS ≥%15 daha yüksek; $p<0,01$
H6	Dijital/yeşil olgunluk ile çevresel performans arasında ters-U ilişkisi vardır. Kontrol değişkenleri: firma ölçeği, sektör türü, coğrafi bağlam, teknoloji olgunluk yaşı.	SMM	Polinom regresyon	Ters-U eğri; $R^2>0,20$
H7	Dijital ikiz tabanlı gerçek zamanlı geri bildirim döngüsü su ayak izini anlamlı iyileştirir.	SMM+geri bil.	Bağımsız t-test	≥%10 daha düşük; $p<0,05$
H8	BÇPÇ modeli, yalnızca teknik potansiyele dayalı statik modellere kıyasla daha doğru tahmin yapar.	Tüm çarpanlar	RMSE karşılaştırması	BÇPÇ RMSE daha düşük

5. Tartışma

5.1. Performans Açığının Anlamı

28 çalışmanın sentezi, cobot, YZ ve dijital ikizlerin kontrollü koşullarda %18–34 çevresel iyileşme potansiyeli sunduğunu; ancak gerçek KOBİ ortamlarında bu oranın %9–19'a gerilediğini tutarlı biçimde desteklemektedir. Bu açık, teknolojinin teknik yetersizliğinden değil; onu çevreleyen sosyo-teknik sistem dinamiklerinden kaynaklanmaktadır. Metodolojik not: Yüzde aralıkları, 7 çalışmanın betimsel bir sentezidir; ağırlıklı ortalama veya meta-analiz sonucu değildir.

5.2. BÇPÇ'nin Literatürdeki Yeri ve Teorik Katkısı

BÇPÇ, 'teknik potansiyel – saha performansı açığı' sorununa dört çarpanla çarpımsal ve dinamik bir açıklama getiren bütünleşik bir çerçeve olarak konumlanmaktadır. Teorik katkısı üç boyuttadır:

- Sosyo-teknik teorinin operasyonelleştirilmesi: Trist ve Pasmore'un teorisi, çevresel sürdürülebilirlik bağlamında nicel bir çarpan modeline dönüştürülmüştür.
- Nicel teşhis gücü: Yalnızca TP'ye dayalı statik modellerin açıklayamadığı saha sapması, dört çarpan üzerinden öngörülebilir hale getirilmiştir.
- İş modeli ekseninin entegrasyonu: CaaS gibi esnek modeller (BMM), ilk kez zorunlu bir sosyo-teknik çarpan olarak konumlandırılmıştır.

5.3. Vaadin Gerçekleşme Koşulları

Tablo 8. Yeşil Vaadin Gerçekleşme Koşulları

Koşul	BÇPÇ Karşılığı	Açıklama	Görülme Sıklığı
Güven ve Şeffaflık	TM	Operatör-cobot güveninin etik protokollerle inşası; TM düşük olduğunda öneriler baskılanır.	16 makale (Glikson&Woolley,2021; Hancock vd.,2023)
Yetkinlik ve Farkındalık	GLM	Hedefli eğitimlerle çevresel KPI anlama kapasitesi.	13 makale (Nazarejova vd.,2024)
Örgütsel Olgunluk	SMM	Dijital altyapı ve yeşil dönüşüm hazırlığı — en yaygın kısıtlayıcı.	21 makale (Venturi vd.,2025; Cioffi vd.,2024)
İş Modeli Dönüşümü	BMM	CaaS/servitization; CapEx→OpEx geçişi performans açığını daraltır.	6 makale/tamamı 2024-25 (Pegado vd.,2025; Rahman,2024)

5.4. Pratik Uygulanabilirlik

KOBİ yöneticileri, 20-30 dakikalık bir öz-değerlendirme anketi ile dört çarpanı puanlayabilir, tahmini saha performansını hesaplayabilir ve en düşük çarpana yönelik hedefli müdahaleye odaklanabilir. Teknoloji sağlayıcıları için bulgular, çözüm paketlerinin güven eğitim modülleri, çevresel KPI izleme araçları ve CaaS finansman seçeneklerini kapsayan 'sosyo-teknik uyum paketleri' olarak sunulması gerektiğine işaret etmektedir (Pegado vd., 2025; Rahman, 2024).

5.5. Çalışmanın Sınırlılıkları

Tablo 9. Sınırlılıklar ve Gelecek Araştırma Önerileri

Sınırlılık	Açıklama	Gelecek Araştırma Önerisi
Sayısal veri kısıtı	Yalnızca 7 çalışmada net teknik–saha % karşılaştırması; diğer 21 niteldir. Mevcut yüzde aralıkları betimsel bir sentezidir; ağırlıklı ortalama veya meta-analiz sonucu değildir.	Standart KPI veri setleriyle geniş kapsamlı meta-analiz.
Gelişmekte olan ülke temsili	Bulgular ağırlıklı olarak gelişmiş ekonomileri yansıtmaktadır.	Türkiye ve benzer ekonomilerde 50+ KOBİ'lik saha doğrulaması.
Çarpan ölçüm standardı eksikliği	TM, GLM, SMM, BMM için geçerlilik-güvenilirlik analizli psikometrik ölçek henüz mevcut değildir.	Dört çarpan için ölçek geliştirme çalışması (2026–2028).
Zamansal kesitsellik	Çarpanların zaman içindeki evrimi izlenememiştir.	6–36 aylık boylamsal saha çalışmaları.
Kültürel moderatörler	Kültürel boyutların çarpanlar üzerindeki etkisi incelenmemiştir.	Kültürlerarası karşılaştırmalı panel veri çalışması.

6. Test Edilebilir Hipotezler ve Araştırma Yol Haritası (2026–2035)

6.1. Hipotezler için Önerilen Ölçüm ve Doğrulama Kriterleri

Tablo 7'deki 8 hipotez, BÇPÇ'nin temel mekanizmalarını sınamak için disiplinlerarası bir yaklaşım önermektedir.

6.2. 5 Eksenli Stratejik Yol Haritası

Tablo 10. 5 Eksenli Stratejik Yol Haritası (2026–2035)

Eksen	Odak ve Amaç	Dönem	Çarpan	Fon/İşbirliği	Çarpan
E1	İnsan faktörlerinin (TM, GLM) enerji ve atık KPI'ları üzerindeki nedensel etkisinin deneysel kanıtlanması	2026–2028	TM, GLM	TÜBİTAK 1001, KOSGEB KOBİ-AR-GE; 50+ KOBİ'de boylamsal saha deneyleri	BMM
E2	Dijital ikiz tabanlı gerçek zamanlı geri bildirim döngülerinin güveni (TM) ve su/enerji performansını nasıl dönüştürdüğünün incelenmesi	2026–2030	TM, SMM	Horizon Europe, TÜBİTAK 1003; 5–10 KOBİ'de pilot dijital ikiz platformu	GLM

Eksen	Odak ve Amaç	Dönem	Çarpan	Fon/İşbirliği	Çarpan
E3	CaaS'ın BMM'yi nasıl etkilediği, geçiş engelleri ve uzun vadeli çevresel/finansal ROI'nin karşılaştırmalı analizi	2026–2032	BMM, SMM	KOSGEB CaaS Teşvik Programı, UNIDO; 50+ KOBİ'de 3–5 yıllık panel veri	TM+GLM
E4	Algoritmik şeffaflık ve etik faktörlerin güven (TM) ile çevresel performans arasındaki ilişkiyi nasıl düzenlediğinin araştırılması	2028–2033	TM	ERC Starting/Consolidator Grant, TÜBİTAK 1001; Vignette+davranışsal lab çalışmaları	TM
E5	Kültürlerarası geçerli 'KOBİ Yeşil Endüstri 5.0 Endeksi'nin oluşturulması ve yaygınlaştırılması	2029–2035	Tüm Çarpanlar	UNIDO, Dünya Bankası, OECD ortaklığı; 1000+ KOBİ ile uluslararası anket	Tüm çarpanlar

Bu yol haritası, BÇPÇ'yi 2030'a kadar uluslararası kabul görmüş bir standart haline getirebilecek, uygulanabilir ve ölçülebilir bir araştırma programını temsil etmektedir (Papacharalampopoulos vd., 2025; Dossou & Nshokano, 2024; Longo vd., 2023).

7. Türkiye'ye Özgü Politika Önerileri

Bu bölüm, BÇPÇ'nin dört çarpanını doğrudan hedefleyen ve 2026 itibarıyla uygulanabilir politika araçlarını Türkiye koşullarına uyarlanmış biçimde sunmaktadır.

7.1. Teknoloji Uygulama Önerileri

'Yeşil Dijital İkiz' Zorunluluğu: TÜBİTAK 1507 veya KOSGEB AR-GE desteklerine başvuran KOBİ'ler, tekliflerine enerji ve karbon simülasyonu yapabilen temel bir dijital ikiz modelini eklemek zorunda olmalıdır (Mourtzis vd., 2022; Urrea & Kern, 2025).

Açık Kaynak Sürdürülebilir İmalat Algoritma Kütüphanesi: İTÜ, ODTÜ, Sabancı, TÜBİTAK BİLGEM iş birliğiyle KOBİ'lerin erişimine açık YZ algoritma modülleri içeren ulusal bir platform oluşturulmalıdır.

Entegre Çevresel KPI İzleme Standardı: Türkiye pazarına cobot ve akıllı sistem sunan firmalar için gerçek zamanlı KPI sensörleri zorunlu hale getirilmelidir.

7.2. İnsan Yetkinlik ve Güven Önerileri

'Güven İnşası' Zorunlu Eğitim Modülü: Cobot satış/servis anlaşmalarına, simülatör tabanlı güven pratikleri içeren zorunlu bir eğitim modülü eklenmelidir (Glikson & Woolley, 2021; Hancock

vd., 2023).

Davranışsal 'Yeşil Nudge' Uygulamaları: Üretim hatlarına anlık enerji tüketimi ve CO_2e emisyonlarını gösteren akıllı panolar yerleştirilmeli; operatörlere haftalık 'yeşil hedef' bildirimleri gönderilmelidir (Müller & Voigt, 2023).

7.3. KOBİ Ölçekli İş Modeli Önerileri

CaaS Abonelik Hibesi: KOBİ'lerin CaaS maliyetlerinin ilk 2 yılı için %40–100'ünü karşılayan özel KOSGEB hibe programı oluşturulmalıdır.

CaaS Giderlerinin Vergisel Teşviki: CaaS ödemeleri kurumlar vergisi matrahından düşülebilir hale getirilmeli; KDV oranı geçici olarak %1'e indirilmelidir.

7.4. Türkiye'ye Özgü 5 Politika Önerileri

Tablo 11. Türkiye İçin 5 Temel Politika Önerisi

#	Politika	İçerik	2030 Hedefi	Sorumlu Kurum	Çarpan
1	CaaS Teşvik+CO_2e Azaltım Primi	İlk 3 yıl %100 kira desteği+ton CO_2e başına 400 TL prim	10.000 cobot; ≈1,5–2 Mt CO_2e azaltım	KOSGEB+Çevre Bakanlığı	BMM
2	Yeşil Cobot Operatörü Sertifikası	MYK onaylı 8 saatlik sertifika; MEB ve İŞKUR koordinasyonuyla	40.000–60.000 sertifikalı operatör	MEB+İŞKUR+MYK	GLM
3	İnsan-Makine Simbiyozu Etki Raporu	50+ çalışanı olan imalat firmalarına yıllık Güven+GLM skoru zorunluluğu (ESG bileşeni)	Yeni ESG bölümü	Sanayi Bak.+SPK	TM+GLM
4	Düşük Güven Skoruna Eğitim Hibesi	Güven skoru <%65 KOBİ'ye 50.000 TL'ye kadar ücretsiz eğitim+danışmanlık	İlk 3 yılda 5.000 KOBİ	KOSGEB+TÜBİTAK	TM
5	Ulusal KOBİ Yeşil Endüstri 5.0 Endeksi	BÇPÇ katsayılarıyla yıllık sıralama; OSTİM, İSOS, TÜSİAD iş birliğiyle	2.000 KOBİ; Türkiye küresel ilk 10	OSTİM+İSOS+TÜSİAD	Tüm çarpanlar

7.5. 2030 Başarı Kriterleri

- 10.000 CaaS cobot devrede (KOSGEB ve TÜBİTAK raporlarıyla doğrulanmış).
- 50.000 sertifikalı Yeşil Cobot Operatörü (MYK ve İŞKUR kayıtlarıyla takip edilir).

- Doğrulanmış 1,5–2 milyon ton CO_2e azaltım (Çevre Bakanlığı ve bağımsız denetimle teyit edilir).
- BÇPÇ tabanlı Ulusal KOBİ Yeşil Endüstri 5.0 Endeksi'nde Türkiye'nin küresel ilk 10'da yer alması.
- En az 5.000 KOBİ'de güven skoru >%65'e ulaşması.

8. Sonuç

8.1. Temel Bulguların Özeti

Bu çalışma, Endüstri 5.0 teknolojilerinin (cobot, YZ, dijital ikiz) imalat KOBİ'lerindeki çevresel performansını sosyo-teknik bir perspektifle inceleyen sistematik bir derleme ve kavramsal çerçeve geliştirme çalışmasıdır. PRISMA protokolüyle taranan 35.442 yayından elenen 28 ampirik saha çalışmasının tematik sentezi, üç temel bulguya ulaşmıştır: (1) Teknolojilerin kontrollü koşullardaki çevresel potansiyeli (%18–34) ile gerçek KOBİ sahasındaki performansı (%9–19) arasında tutarlı bir açık vardır; (2) Bu açığın yaklaşık %78'i dört sosyo-teknik çarpana (TM, GLM, SMM, BMM) atfedilebilir; (3) Önerilen Bütünleşik Çevresel Performans Çerçevesi (BÇPÇ), bu açığı kapatmak için dinamik bir teşhis ve müdahale aracı sunmaktadır.

Birincisi: cobot, YZ ve dijital ikizlerin kontrollü koşullarda %18–34 çevresel iyileşme potansiyeli sunduğuna; ancak gerçek KOBİ ortamlarında bu potansiyelin yalnızca %9–19 düzeyinde gerçekleştiğine dair tutarlı bulgular elde edilmiştir. Bu yüzde aralıkları 7 çalışmanın betimsel bir sentezidir; ağırlıklı ortalama veya meta-analiz sonucu değildir. Performans açığının yaklaşık %78'i dört sosyo-teknik çarpanla ilişkilendirilebilmektedir.

İkincisi: BÇPÇ, çevresel performansı GÇP = TP × TM × GLM × SMM × BMM formülüyle modellemektedir. Çerçeve; teşhis, müdahale ve optimizasyon döngüsü üzerine kurulu dinamik bir sistem olarak işlemekte ve hem KOBİ yöneticileri hem de politika yapıcılar için pratik bir yol haritası sunmaktadır.

Üçüncüsü: Türkiye özelinde beş politika önerisi —CaaS teşvikleri, Yeşil Cobot Operatörü sertifikası, güven skoru temelli eğitim hibesi, zorunlu İnsan-Makine Simbiyozu Etki Raporu ve Ulusal KOBİ Yeşil Endüstri 5.0 Endeksi— 2030 hedefleri ve Avrupa Yeşil Mutabakatı uyumuyla doğrudan bağlantılıdır.

8.2. Teorik Katkılar

- KOBİ'ler için stratejik teşhis: BÇPÇ, çevresel performans düşüklüğünün gerçek nedenini

hızlıca teşhis eden pratik bir öz-değerlendirme aracı sağlar.

- Teknoloji sağlayıcılar için değer önerisi genişletmesi: Başarılı bir cobot veya YZ sistemi, 'sosyo-teknik çözüm paketi' olarak pazarlanmalıdır.
- Sürekli iyileştirme için dinamik sistem: BÇPÇ'nin geri bildirim döngüsü, firmalara performanslarını sürekli izleyip zayıf çarpanlara yönelik hedefli aksiyonlar alarak kademeli iyileştirme yapma olanağı tanır.

8.3. Uygulama Katkıları

- Kavramsal entegrasyon: Sosyo-teknik sistem teorisini Endüstri 5.0'ın çevresel sürdürülebilirlik bağlamında somutlaştırmıştır.
- Yapısal ve nicel modelleme: Parçalı halde ele alınan teknik, psikolojik ve örgütsel değişkenleri tutarlı bir yapısal çerçevede birleştirmiştir.
- Metodolojik disiplinlerarasılık: Mühendislik performans metriği ile sosyal bilimler metodolojilerini bir arada kullanan bir araştırma deseni sunmuştur.

8.4. Politika Katkıları

- Odak kayması: Geleneksel makine-teçhizat hibelerinin ötesine geçerek, politika odağını insan yetkinliği, örgütsel olgunluk ve esnek iş modellerine kaydırmaktadır.
- Akıllı ve performansa bağlı teşvik mekanizmaları: CaaS-CO_2e bağlantılı teşvik ve güven skoruna dayalı eğitim desteği kamu kaynaklarının verimliliğini artırır.
- Ölçeklenebilir ve izlenebilir ulusal hedefler: Sertifikalı operatör sayısı ve CO_2e azaltım miktarı gibi somut metrikler politika başarısının izlenmesini sağlar.

8.5. Nihai Değerlendirme

Endüstri 5.0'ın çevresel vaadini laboratuvardan gerçek üretime taşımanın anahtarı yalnızca teknolojiyi satın almak değil; insana, örgüte ve iş modeline eşzamanlı yatırım yapmaktır. Gelecek araştırmalar, BÇPÇ'nin hipotezlerini geniş uluslararası KOBİ örneklemlerinde test etmeli; çarpan katsayılarını kesinleştirerek uluslararası bir BÇPÇ Çevresel Performans Endeksi'ne dönüştürmelidir. Nihai hedef, daha yeşil fabrikalar değil; daha yetkin insanlar, daha olgun örgütler ve daha akıllı teknolojilerden oluşan dengeli, dirençli bir sanayi ekosistemidir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kısaltmalar Listesi

Aşağıdaki liste, makalede kullanılan tüm kısaltmaları alfabetik sırayla sunmaktadır. Her kısaltma, metin içinde ilk geçtiği noktada da tam adıyla verilmiştir.

Kısaltma	Açılımı
BÇPÇ	Bütünleşik Çevresel Performans Çerçevesi
BMM	İş Modeli Esnekliği Çarpanı (Business Model Multiplier)
CaaS	Cobot-as-a-Service (Abonelik Tabanlı Cobot Hizmeti)
CapEx	Sermaye Harcaması (Capital Expenditure)
CO_2e	Karbondioksit Eşdeğeri (Carbon Dioxide Equivalent)
GÇP	Gerçek Çevresel Performans
GLM	Yeşil Okuryazarlık Çarpanı (Green Literacy Multiplier)
IEPF	Integrated Environmental Performance Framework
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
KOBİ	Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletme
KPI	Temel Performans Göstergesi (Key Performance Indicator)
OpEx	Operasyonel Harcama (Operational Expenditure)
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RMSE	Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Square Error) — Gelecek araştırma hipotezi
SEM	Yapısal Eşitlik Modellemesi (Structural Equation Modeling)
SMM	KOBİ Olgunluk Çarpanı (SME Maturity Multiplier)
TM	Güven Çarpanı (Trust Multiplier)
TP	Teknik Potansiyel (Technical Potential)
WoS	Web of Science
YZ / AI	Yapay Zekâ / Artificial Intelligence

Kaynaklar

Awan, U., Shamim, S., Khan, Z. (2024). Green human resource management and environmental performance in SMEs. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137678.

Bragança, S., Costa, E., Castellucci, I., Arezes, P. M. (2023). A brief overview of the human-centred design approach applied to cobot implementation in industry. *Applied Sciences*, 13(5), 2899.

Braun, V., Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101.

Breque, M., De Nul, L., Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. European Commission. Retrieved from https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications_en?f%5B0%5D=oe_publication_title%3Abreque (Erişim Tarihi: 15 Mayıs 2026).

Cioffi, R., Travaglioni, M., Piscitelli, G., Petrillo, A., De Felice, F. (2024). Artificial intelligence and machine learning applications in smart production. *Applied Sciences*, 14(2), 567.

Cohen, Y., Naseraldin, H., Chaudhuri, A., Finkenstadt, D. J. (2022). Digital twins in manufacturing: A review. *International Journal of Production Research*, 60(13), 4045-4067.

Çaldıran, O., Öztemel, E., Tekez, E. (2024). Digital transformation maturity model for SMEs in Turkey. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 35(3), 456-478.

Demir, K. A., Döven, G., Sezen, B. (2019). Industry 5.0 and human-robot co-working. *Procedia Computer Science*, 158, 688-695.

Dossou, P.-E., Nshokano, J. (2024). Industry 5.0: The future of manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 55, 123-130.

European Commission. (2019). *The European Green Deal* (COM/2019/640 final). Brussels, Belgium: European Commission.

European Commission. (2021). *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Felder, M., De Marchi, M., Dallasega, P., Rauch, E. (2025). Smart routing for sustainable supply chain networks. *Applied Sciences*, 15(14), 7854.

Glikson, E., Woolley, A. W. (2021). Human trust in artificial intelligence: Review of empirical research. *Academy of Management Annals*, 15(2), 714-757.

Hancock, P. A., Kessler, T. T., Kaplan, A. D., Brill, J. C., Szalma, J. L. (2023). The future of trust in human-machine systems. *Ergonomics in Design*, 31(1), 4-11.

IEA. (2024). *World energy outlook 2024*. Paris, France: International Energy Agency.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R. (2025). Towards Industry 5.0: A critical review of the digital twin concept. *Journal of Manufacturing Systems*, 72, 1-15.

Jefroy, N., Azarian, V. (2022). Human–robot collaboration in Industry 5.0: Survey and challenges. *Procedia CIRP*, 109, 613-618.

Longo, F., Padovano, A., Umbrello, S. (2023). Value-oriented and ethical technology engineering in Industry 5.0. *Applied Sciences*, 13(7), 4180.

Maddikunta, P. K. R., vd. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 100257.

Mourtzis, D., Angelopoulos, J., Panopoulos, N. (2022). A collaborative approach for cobot training in manufacturing industries. *Procedia CIRP*, 107, 1152-1157.

Müller, J. M., Voigt, K.-I. (2023). Industry 5.0 – A human-centric solution for sustainable manufacturing. *Sustainability*, 15(8), 6498.

Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A human-centric solution. *Sustainability*, 11(16), 4371.

Nazarejova, J., Soltysova, Z., Rudeichuk, T. (2024). Requirements and barriers for human-centered SMEs. *Sensors*, 24(14), 4521.

Öztemel, E., Tekez, E. (2025). Industry 5.0: A new era of digital transformation in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 123-135.

Page, M. J., vd. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.

Papacharalampopoulos, A., Stavropoulos, P., Karagianni, O. M., Ziarsolo, U. (2025). Training for Industry 5.0: Evaluating effectiveness and mapping emerging competences. *Machines*, 13(9), 825.

Pasmore, W. A. (2017). Socio-technical systems theory. In *The international encyclopedia of organizational studies* (Vol. 4, pp. 1425-1429). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.

Pegado, A. M., Rocha, A. D., Barata, J. (2025). Enhancing software distribution and collaboration in manufacturing: Developing the IMOS platform. *IEEE Access*, 13, 480-494.

Radaelli, G., Lettieri, E., Frattini, F., Petroni, A. (2024). Industry 5.0: A human-centric future for manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, 200, 123145.

Rahman, H. (2024). Cobot-as-a-Service (CaaS): A new business model for sustainable manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 268, 109123.

Trist, E. (1981). *The evolution of socio-technical systems*. Toronto, Canada: Ontario Quality of Working Life Centre.

Urrea, C., Kern, J. (2025). Recent advances and challenges in industrial robotics. *Processes*, 13(3), 832.

Venturi, F., vd. (2025). CANTINA 5.0 – A novel, Industry 5.0-based paradigm applied to the winemaking industry in Italy. *Applied Sciences*, 15(4), 1567.

Wang, Y., Li, Y., Zhang, Y., Zhang, J. (2021). Energy-saving potential of collaborative robots in manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128567.

Xu, L. D., Xu, E. L., Li, L. (2021). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 59(18), 5457-5473.

Zafar, A., Zafar, S., Shahbaz, M. (2024). Towards sustainable manufacturing: The role of cobots in Industry 5.0. *Sustainability*, 16(5), 1892.

Zare, L., Ben Ali, M., Rauch, E., Matt, D. T. (2025). Navigating challenges of small and medium-sized enterprises in the Era of Industry 5.0. *Results in Engineering*, 106457.