

KOBİ'lerde İşbirlikçi Robotların Entegrasyonu: Otomotiv Yan Sanayinde Bir Vaka Çalışması

Integration of Collaborative Robots in SMEs: A Case Study in the Automotive Sub-Industry

Bahar TAŞAR^{1*} 

¹ Dr. Öğretim Üyesi, İzmir Demokrasi Üniversitesi, İzmir, Türkiye

*Sorumlu yazar/
Corresponding author:
bahar.tasar@idu.edu.tr

Başvuru/Submitted: 24.12.2025
Kabul/Accepted: 12.02.2026

Atf/Cite as:
Taşar, B. (2026). KOBİ'lerde işbirlikçi robotların entegrasyonu: otomotiv yan sanayinde bir vaka çalışması. *Çankırı Karatekin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 17(1), 113-124.

Öz

Amaç: Endüstri 4.0'dan Endüstri 5.0'a geçiş süreci, ileri otomasyon teknolojileri ile insan odaklı üretim sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Bu bağlamda işbirlikçi robotlar (cobotlar), insan-robot iş birliği yoluyla hem operasyonel performansı hem de çalışan ergonomisini geliştirme potansiyeline sahip önemli bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu avantajlara rağmen, küçük ve orta ölçekli işletmelerde (KOBİ'ler) cobot benimsenmesi; yüksek yatırım maliyetleri ve yatırımın geri dönüşüne ilişkin belirsizlikler nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmanın amacı, KOBİ'lerin kısıtları ve karar verme ihtiyaçları dikkate alınarak geliştirilen, pratik ve insan odaklı bir cobot entegrasyon çerçevesini ortaya koymak ve ampirik olarak doğrulamaktır.

Yöntem: Çalışmada; süreç yeniden tasarımı, performans değerlendirme ve ekonomik fizibilite analizini bir araya getiren sekiz aşamalı bir cobot entegrasyon çerçevesi önerilmektedir. Önerilen çerçeve, otomotiv yan sanayinde faaliyet gösteren ve jant üretimi yapan bir KOBİ'de gerçekleştirilen simülasyon tabanlı bir vaka çalışması ile test edilmiştir. CNC işleme hücreesindeki yükleme ve boşaltma operasyonları Ayrık Olay Simülasyonu kullanılarak modellenmiştir. Mevcut manuel sistem ve cobot entegre edilmiş sistem olmak üzere iki senaryo analiz edilmiştir. Çevrim süresi, günlük üretim miktarı ve genel ekipman etkinliği (OEE) gibi temel performans göstergeleri değerlendirilmiş; ayrıca yatırımın ekonomik uygulanabilirliğini belirlemek amacıyla geri ödeme süresi analizi yapılmıştır.

Bulgular: Simülasyon sonuçları, cobot entegrasyonunun mevcut sisteme kıyasla çevrim süresini yaklaşık %6 oranında azalttığını göstermektedir. Günlük üretim miktarı 240 parçadan 267 parçaya yükselirken, OEE değeri %70,8'den yaklaşık %82 seviyesine çıkmıştır. Ekonomik analizler, cobot yatırımının yaklaşık 1,55 yıl içerisinde geri kazanılabileceğini ortaya koymakta ve önerilen yaklaşımın KOBİ'ler açısından finansal olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Sonuç: Elde edilen bulgular, simülasyon tabanlı analiz ve süreç yeniden tasarımı ile desteklenen cobot entegrasyonunun KOBİ'ler için ölçülebilir operasyonel ve ekonomik faydalar sağlayabileceğini doğrulamaktadır. Önerilen çerçeve, Endüstri 5.0 ilkeleriyle uyumlu, yapılandırılmış, veri temelli ve sürdürülebilir bir karar verme süreci sunmaktadır.

Özgünlük: Bu çalışma, KOBİ'lere özel olarak tasarlanmış bütüncül ve pratik bir cobot entegrasyon çerçevesi sunarak literatüre katkı sağlamaktadır. Önceki çalışmaların çoğunlukla teknik uygunluk veya güvenlik boyutuna odaklanmasından aksine, bu araştırma; insan odaklı tasarım, simülasyon tabanlı performans değerlendirmesi ve ekonomik analizleri tek bir karar destek yapısı içinde bütünleştirmektedir.

Anahtar Kelimeler: İşbirlikçi robotlar, küçük ve orta ölçekli işletmeler, ayrık olay simülasyonu, operasyonel performans.

Abstract

Purpose: The transition from Industry 4.0 to Industry 5.0 has increased interest in human-centered production systems that focus on advanced automation technologies. In this context, collaborative robots (cobots) stand out as an important technology with the potential to improve both operational performance and worker ergonomics through human-robot collaboration. However, despite these advantages, cobot adoption in small and medium-sized enterprises (SMEs) remains limited due to high investment costs and uncertainties regarding return on investment. The aim of this study is to present and empirically validate a practical and human-centered cobot integration framework developed by considering the constraints and decision-making needs of SMEs.

Methodology: The study proposes an eight-step cobot integration framework that combines process reengineering, performance evaluation, and economic feasibility analysis. The framework is tested through a simulation-based case study conducted in an SME operating in the automotive supply industry, specifically a wheel manufacturing facility. A CNC machining cell's loading and unloading operations were modeled using Discrete Event Simulation. Two scenarios were analyzed: the existing manual system and a cobot-integrated system. Key performance indicators, including cycle time, daily production output, and overall equipment effectiveness (OEE), were evaluated. Additionally, a payback period analysis was conducted to assess economic viability.

Findings: Results indicate that cobot integration leads to a cycle time reduction of approximately 6% compared to the existing system. Daily production output increased from 240 to 267 parts, while the OEE value improved significantly from 70.8% to nearly 82%. The economic analysis reveals that the cobot investment can be recovered within approximately 1.55 years, demonstrating the financial feasibility of the proposed approach for SMEs.

Results: Cobot integration, when supported by simulation-based analysis and process reengineering, can deliver measurable operational and economic benefits for SMEs. The proposed framework enables firms to manage cobot investments through a structured, data-driven, and sustainable decision-making process aligned with Industry 5.0 principles.

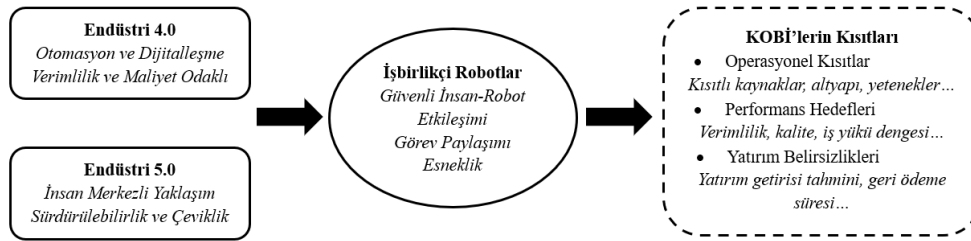
Originality/Value: This study contributes to the literature by offering a holistic and practical cobot integration framework specifically designed for SMEs. Unlike prior studies that focus primarily on technical feasibility or safety aspects, this research integrates human-centered design, simulation-based performance evaluation, and economic analysis within a unified decision-support structure.

Key Words: Collaborative robots (cobots), small and medium-sized enterprises (smes), discrete-event simulation, operational performance.

Giriş

Yirmi birinci yüzyılda hızlı ürün inovasyonları ve değişen müşteri taleplerinin olduğu rekabetçi küresel pazarda üretim sektörü gereken uyum ve verimliliği sağlamakta zorluklar yaşamıştır. Endüstri 4.0, bu zorluklara çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Siber-fiziksel sistemleri ve nesnelerin interneti (IoT) teknolojileriyle birleştirerek akıllı fabrikaları yaratmıştır (Liao vd., 2017, s. 3610; Xu vd., 2018, s. 2941). Bu sayede işletmelerin operasyonel verimlilikleri artmış ve israflar azalmıştır. Birbirine bağlı bu sistemler gerçek zamanlı veri toplama, öngörülse analiz ve kendini optimize etme kabiliyetleriyle üretim operasyonlarını dönüştürmüştür. Ancak geçmişte olduğu gibi her yeni üretim odaklı dönüşümün ardından insan faktörü yeniden gündeme gelmiş ve Endüstri 5.0 ile insan uzmanlığını gelişmiş üretim sistemlerine entegre edilmesi ihtiyacı görülmüştür (Briken vd., 2023, s. 2; Rajkumar vd., 2024, s. 563). Sürdürülebilirlik ve insan merkezli yaklaşımların gerekliliğiyle birlikte Endüstri 5.0 dönüşümü, insanların dijital üretim ortamlarına uyum sağlaması ve teknolojik inovasyon ile çalışan sağlığı arasında dengeyi kurması konularını beraberinde getirmiştir.

Endüstri 5.0 dönüşümünün arkasındaki temel güçlerden biri hiç şüphesiz iş birliğine dayalı robotlar (cobot)'dır. Cobotlar çalışanlara fayda sağlamak amacıyla tasarlanmış olup, onların yerini almak için değil üretimde insan faaliyetlerinin yeniden tanımlanmasını hedeflemektedir (Polonara vd., 2024, s. 10). Cobotlar, geleneksel endüstriyel robotlardan farklı olarak gelişmiş güvenlik özellikleri sayesinde insanlarla aynı çalışma alanında çalışabilmektedir. İnsan-robot iş birliğine dayalı bu yapı, operasyonel verimlilik ve esneklik gibi rekabetçi önceliklerin desteklenmesine katkı sağlarken, tekrarlı ve fiziksel olarak zorlayıcı görevlerin robotlar tarafından üstlenilmesi yoluyla çalışan ergonomisini dolaylı olarak iyileştirme potansiyeli taşımaktadır (Vido vd., 2020, s. 8). Bu nedenlerle son dönemde üretim firmaları arasında popüleriteleri hızla artmıştır. Yapılan çalışmalara göre bu artışın 2030 yılına kadar 7,2 milyar dolarlık bir hacme ulaşması beklenmektedir (ABI Research, 2025). Bu artan eğilime rağmen cobotların farklı üretim alanları üzerindeki etkisi ve farklı performans hedefleri altındaki sonuçları hâlâ hem akademide hem de sanayide araştırma konusudur. Sektördeki büyük oyuncular üretim alanlarında cobot teknolojisini çoktan kullanmaya başlamıştır (Bogue, 2022, s. 389). Ancak küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler), cobot teknolojisini benimseme konusunda temkinlidir ve yapısal, ekonomik ve organizasyonel gibi birçok engelle karşı karşıyadır. Bu firmalar için yüksek ilk yatırım maliyetleri, teknik uzmanlık eksikliği, iş gücü direnci ve üretim süreçlerinin otomasyona uygunluğu gibi unsurlar önemli engeller arasında yer almaktadır. Ayrıca, cobot entegrasyonunun sağlayacağı verimlilik artışı ve ergonomik iyileştirmelere ilişkin belirsizlikler, bu işletmelerde yatırım kararlarının ertelenmesine neden olabilmektedir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, işbirlikçi robotlar, özellikle KOBİ'lerin karşılaştığı operasyonel ve finansal kısıtlamalar altında, Endüstri 4.0'ın otomasyon odaklı paradigması ile Endüstri 5.0'in insan odaklı vizyonu arasında bir köprü teknolojisi görevi görmektedir. Bu bağlamda, cobotlar, verimlilik odaklı otomasyonu ergonomi, güvenlik ve sürdürülebilir iş tasarımı gibi insan merkezli hususlarla uzlaştırmanın yanı sıra, KOBİ'lerin karar alma süreçlerinde ön plana çıkan performans ve yatırım getirisi endişelerini de gideren önemli bir etken olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 1. KOBİ Kısıtları Altında Endüstri 4.0'dan Endüstri 5.0'a Geçişte İşbirlikçi Robotların Rolü

Bu çalışma, literatürde işbirlikçi robotların kurulum ve entegrasyon süreçlerini çoğunlukla genel adımlar üzerinden ele alan (Titu vd., 2023, s. 149) ya da yalnızca belirli aşamalarda verimlilik veya ergonomi odaklı değerlendirmeler sunan (Mokhtarzadeh vd., 2020, s. 467; Thongdonnoi vd, 2023, ss. 95-96; Baratta vd., 2024, s. 690; Kimaporn ve Nunkaew, 2024, s. 1843; Polonara vd., 2024, s. 3) yaklaşımlardan farklı olarak cobot yatırımı yapmayı düşünen KOBİ'lere bir çerçeve oluşturmayı amaçlamaktadır. Geliştirilen model otomotiv yan sanayisinde faaliyet gösteren bir jant üreticisi için örneklenmiştir. KOBİ'nin manuel üretim hattında cobot etkileşiminin performansı, simülasyon tabanlı modelleme ile incelenmektedir. Performans değerlendirmesi, çıktı miktarı, çevrim süresi, hata oranı ve değişken iş yükü gibi temel göstergeler kullanılarak yapılmaktadır. Böylece yöneticilere üretim alanında cobot kullanımına dair karar verme sürecinde yardımcı olacak bir çerçeve sunulmaktadır.

Bu makalenin geri kalan kısmı aşağıdaki şekilde yapılandırılmıştır. Literatür taraması bölümünde, insan-robot işbirliği, otomotiv endüstrisinde cobotların yeri ve KOBİ'lerde cobot entegrasyonunun zorlukları ele alınmaktadır. Yöntem bölümü, KOBİ odaklı cobot entegrasyon sürecinin çerçevesini tanıtmaktadır. Vaka çalışmasında, önerilen çerçevenin uygulamasını göstermek için otomotiv endüstrisinden bir örnek olay sunulmakta ve ardından sonuçlar tartışılmaktadır. Son bölüm ise yönetsel çıkarımları özetleyerek ve çalışmanın kısıtlarını belirterek gelecekteki araştırmalar için önerilerde bulunmaktadır.

Literatür Taraması

Cobotlar, özellikle tekrarlayan ve ergonomik açıdan zorlayıcı görevlerde, insan operatörlerle aynı çalışma alanını güvenli bir şekilde paylaşarak yüksek verimlilik sağlayan teknolojik araçlardır. Güvenlik açısından kuvvet sınırlayıcı sistemler, görsel sensörler ve kullanıcı dostu programlama arayüzleri ile donatılmıştır (Villani vd., 2018, s. 250). Cobotlar, parça taşıma, vidalama, kalite kontrol ve uyarlanabilir montaj gibi çok işlevli görevleri yerine getirebilir. Bu görevler genellikle hızlı yeniden yapılandırma gerektiren, küçük partili ve çok çeşitli ürünlerin üretildiği ortamlarda yaygındır (Gualtieri vd., 2020, s. 2). Cobot kullanımı çevrim süresi optimizasyonu, ergonomik iyileşme, üretim ve kaynak verimliliği ile iş gücü dengesi sağlayarak üretim süreçlerinde performansı arttırmaktadır (Faccio vd., 2020, s. 2317).

İşletmelerin cobot teknolojisi yatırımı yapmak için odaklandığı göstergeler olan üretim performansı ve ergonomik değişim literatürde geniş yer tutmaktadır (Weckenborg vd., 2020; Zhang vd., 2021; Stecke ve Mokhtarzadeh, 2022). Örneğin, Mokhtarzadeh ve diğerleri (2020), baskılı devre kartlarının montajında cobot-insan zamanlaması optimizasyonu ile üretim süreçlerinin daha dengeli ve hatasız gerçekleştirilebildiğini göstermiştir. Kinast ve diğerleri (2021), tarafından yürütülen çalışmada ise montaj hattı ortamında cobot atama problemi genetik algoritma temelli bir çözümle ele alınmış ve bu yöntemin hem çevrim süresi hem de üretim maliyetlerinde iyileşme sağladığı belirtilmiştir. Baratta ve diğerleri (2024), geliştirdikleri simülasyon modelinde farklı görev atama senaryolarının cobotlarla birlikte operatörün çalışma süresi, hareketsizlik oranı ve ergonomik riskler üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak analiz etmiştir. Araştırmacılar, robot destekli görev paylaşımı sayesinde operatör verimliliği, işlem hızı ve üretim etkinliğinin arttığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda operatördeki yorgunluğun azaltarak ergonomik yükün düştüğünü ortaya koymuşlardır. Thongdonnoi ve diğerleri (2023), bir mercek üretim tesisinde cobot entegrasyonunun üretim verimliliği üzerindeki etkisini değerlendirmek üzere simülasyon tabanlı bir vaka çalışması gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, iş sürecindeki üretkenlik değerlendirmesi için kullanılan temel performans göstergeleri; işlemdeki yarı mamul seviyesi, bekleme süreleri ve toplam üretim çıktısı olmuştur. Simülasyon sonuçları, cobot kullanımıyla günlük üretim hacminin arttığını, aynı zamanda işlemdeki yarı mamul seviyelerinde ve bekleme sürelerinde anlamlı düşüşler sağlandığını göstermiştir. Tıtu ve diğerleri (2023), otomotiv üretim hattında darboğaz oluşturan görevlerin cobotlar tarafından üstlenilmesi sayesinde çevrim sürelerinin kısaldığını ve cobotların kesintisiz çalışma yeteneklerinin bu başarıda etkili olduğunu kanıtlamıştır. Polonara ve diğerleri (2024) tarafından yürütülen bir diğer çalışmada, otomotiv yan sanayi parçalarının üretiminde cobotların doğrudan uygulanması incelenmiş; montaj hassasiyetinin arttığı, hata oranlarının azaldığı ve çevrim sürelerinin kısaldığı gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, bu kazanımların temelinde insan-robot etkileşim tasarımı, bilgisayarlı görme sistemleri ve yeniden yapılandırılabilirlik yetenekleri olduğunu vurgulamışlardır.

Son olarak, Kimaporn ve Nunkaew (2024), cobot yerleşiminin üretkenliğe katkısını optimize etmek amacıyla bulanık mantık ve meta-sezgisel algoritmaları birleştirerek atölye tipi üretim planlaması için bir karar destek sistemi önermiştir. Elde edilen sonuçlara göre, özellikle darboğaz istasyonlara yapılan cobot yerleşimleri, hem üretim süresi hem de üretim maliyeti açısından önemli avantajlar sağlamıştır.

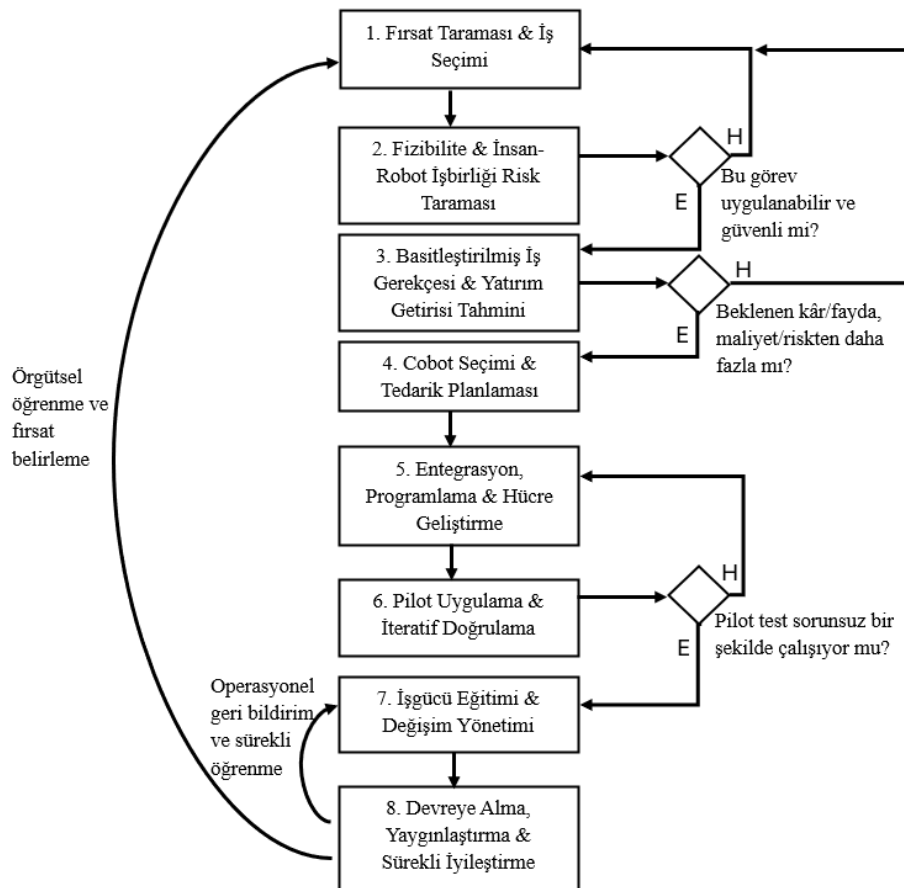
İşbirlikçi robotların işletmelere kazandırdığı üretim performansı ve ergonomik avantajlarından yararlanmak isteyen küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ) için cobot teknolojisi esnek, güvenli ve görece düşük maliyetli otomasyon çözümleri olarak gündeme gelmiştir. Ancak literatürde, KOBİ'lerin cobot teknolojisini benimseme konusunda temkinli davrandıkları ve yaygın kullanım oranlarının halen düşük seviyelerde kaldığı belirtilmektedir (Tran ve Attorney, 2025, s. 1). KOBİ'lerde cobot benimseme eğilimini sınırlandıran başlıca faktörler, ekonomik, teknik, güvenlik odaklı ve örgütsel engeller olarak sınıflandırılabilir. İlk olarak, yatırım maliyetleri ve belirsiz geri dönüş beklentisi en öne çıkan engeller arasındadır. Cobot'ların büyük ölçekli robot sistemlerine kıyasla daha düşük maliyetli olduğu iddia edilse de KOBİ'ler için entegrasyon, bakım ve üretim hattı uyarlamaları ciddi ek maliyetler doğurmaktadır (Porubčinová ve Fidlerová, 2020, s. 18). Bu nedenle, yatırımın geri dönüş süresine ilişkin belirsizlik KOBİ yöneticilerinde çekince yaratmaktadır. İkinci olarak, teknik bilgi ve uzmanlık eksikliği, cobot uygulamalarını yavaşlatan bir diğer önemli etkidir. KOBİ'lerin büyük kısmı, cobot kurulumunu ve programlamasını gerçekleştirecek nitelikli personele sahip değildir. Bu nedenle dış danışmanlara bağımlılık artmakta ve teknolojiye güven azalabilmektedir (Jennes ve Di Minin, 2023, s. 83; Tran ve Attorney, 2025, s. 1). Üçüncü olarak, güvenlik endişeleri ve standartlardaki belirsizlikler, cobot benimsemesinin önündeki kritik bariyerlerden biridir. Güncel regülasyonların ve standartların tam olarak oturmamış olması, işletmelerin risk değerlendirme süreçlerini karmaşık hale getirmektedir (Hanna vd., 2022, s. 2). Son olarak, örgütsel ve kültürel direnç, özellikle çalışanların iş kaybı korkusu ve yeniliğe karşı şüpheciligi üzerinden kendini göstermektedir. Bu bulgular, KOBİ'lerde cobot kullanımının yalnızca teknik değil, aynı zamanda sosyal ve kültürel bir dönüşüm süreci olduğunu ve profesyonel bir yönlendirmeye açık olduğunu göstermektedir.

Cobot teknolojisinin en hızlı geliştiği sektörlerden biri otomotiv endüstrisidir. Sektör, yüksek hassasiyet gereksinimi, ürün çeşitliliği, ergonomik zorluklar ve tekrarlanabilir hassasiyet ihtiyacı nedeniyle cobot entegrasyonu için yüksek potansiyele sahip bir alandır (Shaw, 2024, s. 1). Montaj, kaynak, boyama ve kalite kontrol gibi süreçlerde cobot'lar giderek daha yaygın hale gelmektedir. Otomotiv sektöründe cobot kullanımı, üretim verimliliğini ve iş gücü esnekliğini artırırken; hata oranlarını azaltmakta ve çalışan memnuniyetini iyileştirmektedir (Polonara vd., 2024, s. 1). Bu tür yetenekler, özellikle otomotiv sektöründe sık ürün değişimi ve kişiselleştirilmiş üretim gerektiren senaryolarda üretkenlik ve verimliliği artırmak için büyük potansiyel sunmaktadır. Otomotiv endüstrisinde ise büyük oyuncular cobot teknolojisini üretim tesislerine entegre ederken otomotiv değer zincirindeki KOBİ ölçekli tedarikçiler büyük firmalara kıyasla bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Öncelikle, sektörün sıkı güvenlik ve kalite standartları, KOBİ'lerin cobot uygulamalarında regülasyonlara uyum konusunda çekinceler yaşamasına neden olmaktadır. Hanna ve arkadaşları (2022), otomotiv üretim tesislerinde cobot kullanımına ilişkin saha çalışmalarında, mevcut standartların insan-robot işbirliği senaryolarını yeterince kapsamadığını ve bu durumun benimsemeyi yavaşlattığını belirtmiştir. Ayrıca otomotiv imalatının yüksek hız ve hassasiyet gereksinimleri, cobot'ların güvenlik amacıyla sınırlanan hızları nedeniyle bazı uygulamalarda verimlilik engeli oluşturabilmektedir (Schnell ve Holm, 2022, s.175). Bu nedenle, otomotiv KOBİ'leri genellikle cobot entegrasyonunu pilot projelerle test etmekte ve üretim süreçlerine kademeli olarak dahil etmektedir. Bir diğer önemli faktör, entegrasyon zorluklarıdır. Otomotiv KOBİ'leri, büyük üreticilere parça tedarik ettiklerinden, üretim hatlarında yaşanabilecek aksaklıkların maliyeti oldukça yüksektir. Bu nedenle cobot entegrasyonu sırasında yazılım uyumu, ergonomi ve iş akışı yeniden tasarımı gibi konular kritik rol oynamaktadır (Jennes ve Di Minin, 2023, s. 83).

Yapılan çalışmalar KOBİ'lerin bu teknolojiyi üretimlerinde uygulamaları durumunda elde edebilecekleri avantajları göstermektedir. Ancak işletmelerin uygulaması için genel süreç adımları literatürde tartışılrsa da (Titu vd., 2023, s. 149) kobilere özgü detaylı bir süreç tasarım rehberine rastlanmamıştır. Büyük işletmeler ve KOBİ'ler için cobot entegrasyon sürecinde çekirdek adımlar aynı kalsa da (iş seçimi, güvenlik, simülasyon, devreye alma, eğitim/iyileştirme gibi), bir KOBİ için derinlik, yönetim, bütçe, veri olgunluğu, tedarik ve ölçekleme beklentileri belirgin biçimde ayrılmaktadır. Örneğin büyük üreticiler tarafında derin entegrasyon ve resmî süreç var iken KOBİ tarafında hızlı, düşük riskli, nakit-duyarlı yaklaşım esastır. Büyük sanayi işletmeleri tarafı çok istasyonlu ve karmaşık hatları, sıkı yönetimi, kapsamlı Bilgi Teknolojileri entegrasyonunu (ERP/PLM, dijital ikiz), tam güvenlik uyumunu (örn. ISO/TS 15066) ve Toplam Sahip Olma Maliyeti (TCO) ile Arızalar Arası Ortalama Süre (MTBF) gibi ayrıntılı ekonomik metrikleri gerektirir. KOBİ'lerde ise odak genellikle tek hücre/istasyon ve sınırlı varyanttır; kararlar hızlı alınır, belgeler yalındır. Veri tarafında zaman etüdü gibi basit ölçümler yeterli olur. İnsan kaynağı çok rollüdür; hızlı eğitim ve ustabaşı sahipliği esastır. Bu gibi ayrışmalar cobot teknolojisini üretimde kullanmak isteyen KOBİ'lere özel bir kılavuz gereksinimini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, literatürde cobot kurulumunda izlenmesi gereken adımları sınırlı şekilde ele alan (Titu vd., 2023) veya sürecin sadece belli aşamalarına verimlilik/ergonomi açısından odaklanan (Mokhtarzadeh vd., 2020; Thongdonnoi vd, 2023; Baratta vd., 2024; Kimaporn ve Nunkaew, 2024; Polonara vd., 2024) çalışmalardan farklı olarak KOBİ'lerin üretim sistemlerinde cobot teknolojisinin entegrasyonu için bir kılavuz geliştirmektedir.

Yöntem

İşbirlikçi robotların üretim sistemine entegrasyonuna dair örnekler olsa da (Weckenborg vd., 2020; Zhang vd., 2021; Stecke ve Mokhtarzadeh, 2022; Polonara vd., 2024) nasıl entegre edileceğine dair literatürdeki bilgi kısıtlıdır. Örneğin, Titu vd. (2023), entegrasyon sürecinde uygunluk/ fizibilite, tedarik, programlama, doğrulama ve devreye alma basamaklarının izlenmesi gerektiğini belirtmiştir. Ancak bu adımlar performans takibi ve yatırımın geri dönüşüm değeri gibi göstergeleri içermemekte, çalışan eğitimi ve sürekli iyileştirme gibi uygulamalı süreçleri göz ardı etmektedir. Bu çalışma KOBİ odaklı eklemeler ve iteratif geri bildirim döngüleri ile bu yapıyı sekiz ana aşamada Şekil 2’deki haliyle ele almaktadır. Özellikle geri bildirim döngülerini içeren akışta kısıtlı kaynaklara sahip KOBİ’ler için süreç pratikleşmekte ve hızlı fizibilite kontrolleri, basitleştirilmiş ROI (yatırımın geri dönüşü) tahminleri, pilot denemeler ve sürdürülebilir insan-robot işbirliği için işgücü eğitimini kapsamaktadır.



Şekil 2. Cobot Entegrasyon Süreci

Aşama 1: Fırsat Taraması & İş Seçimi

Entegrasyonun ilk adımında amaç uygun görevleri veya hücreleri belirlemek ve önceliklendirmektir. KOBİ’ler, tekrarlı, ergonomik açıdan zorlayıcı veya kalite açısından kritik süreçleri (klasik “sıkıcı, kirli veya tehlikeli” işleri) tarayarak cobot’ların daha verimli ya da güvenli yapabileceği alanları saptamalıdır. Bu görevlerde genellikle makine yükleme-boşaltma, paketlenme, muayene, kaynak, montaj gibi tekrarlı işlerde cobot’ların başarıyla uygulandığı gösterilmiştir (Horst vd., 2021, s. 3). İş seçimi için sorulabilecek sorular: İş çok mu tekrarlı/yorucu? Hacim orta düzeyde ve adımlar istikrarlı mı? İş güvenliği/ergonomi açısından sorunlu mu? Kriterleri karşılayan işler aday olarak belirlenir. En az bir fırsat iş belirlenirse, en uygulanabilir görünen iş Aşama 2’de fizibiliteye geçer.

Aşama 2: Fizibilite & İnsan-Robot İşbirliği (HRC) Risk Taraması

Hedef iş seçildikten sonra teknik ve güvenlik boyutlarını içeren bir fizibilite çalışması yapılır: Bu işi cobot gerçekçi olarak yapabilir mi? Güvenli biçimde yapmak için ne gerekir? Başlıca adımlar:

- İş gereksinimlerinin gözden geçirilmesi: çevrim süresi, hassasiyet, taşıma yükü, parça geometrisi, özel proses ihtiyaçları.

• Cobot kabiliyetlerinin eşleştirilmesi: yük/erişim/hız/doğruluk sınırları yeterli mi? Gerekli EOAT (uç efektör) ve sensörler mevcut mu?

• Ön tehlike tanımlama ve risk değerlendirmesi: HRC bağlamında kırmızı bayrak riskler var mı?

Erken aşamada işin cobot kapasite ve güvenlik alanı içinde kaldığı doğrulanmalıdır. İlk risk taraması kritiktir: muhtemel insan-robot etkileşimleri haritalanır ve öngörülen temas/yakınlıkların teknik güvenlik standartlarındaki (ISO/TS 15066) güvenli limitleri içinde kalacağı teyit edilir (Aaltonen ve Salmi, 2019, s. 1153; Gualtieri vd., 2020, s. 5). Risk çok yüksekse (ör. keskin aletlerin işçi yakınında korumasız kullanımı gerekiyorsa), uygulama şimdilik uygun değildir; ekip Aşama 1'e dönerek başka bir iş seçebilir veya işi yeniden tasarlayabilir. Teknik olarak yapılabilir ve makul önlemlerle güvenli görünüyorsa 3. Aşamaya ilerlenir.

Aşama 3: Basitleştirilmiş İş Gereçesi (Business Case) & Yatırım Getirisi (ROI) Tahmini

Uygulamaya geçmeden önce KOBİ, cobot entegrasyonu için bir iş gereçesi hazırlamalıdır: beklenen maliyetler (robot, EOAT, aksesuar, entegrasyon süresi, eğitim vb.) ile beklenen faydalar (işçilik saat tasarrufu, daha yüksek çıktı, kalite iyileşmesi, yaralanma/duruş azalması) tahmin edilir. Bu aşamada simülasyon tabanlı modellemeler ile değişim etkileri analiz edilebilir. Verimlilik, kalite, ergonomi ve ekonomik göstergeler incelenir. Ekonomi açısından ana ölçütler ROI ve geri ödeme süresidir (Horst vd., 2021, s. 2; Messina, 2024, s. 13). KOBİ'lerde sınırlı sermaye nedeniyle hedef genellikle hızlı geri ödemedir. Gereçeye duyarlılık kontrolü eklemek (ör. çalışma süresi, işçilik, hurda varsayımlarını az-çok değiştirerek) yüksek riskli senaryoları ortaya çıkarır. Beklenen faydalar maliyet/riski aşıyorsa 4. Aşamaya devam edilir, aksi hâlde yeniden 1. Aşamaya dönülür.

Aşama 4: Cobot Seçimi & Tedarik Planlaması

Yönetim onayının ardından uygun cobot sistemi ve tedarik planı netleştirilir. İş gereksinimleri ve bütçeye göre cobot modeli ve EOAT/ sensör/ güvenlik tarayıcıları gibi çevre donanımları belirlenir. Yük kapasitesi, erişim, hız, hassasiyet ve yerleşik güvenlik özellikleri işin gereklerini karşılamalıdır (Horst vd., 2021, s. 6). Hücre yerleşimi (montaj noktası, malzeme akışı, insan geçişleri) taslağı çıkarılır; bu, güvenlik planlamasına (çit, lazer tarayıcı, işbirliği hız sınırları vb.) girdi sağlar. Çoğu KOBİ, sınırlı iç kaynaklarını dengelemek için entegratör ya da tedarikçi desteğinden yararlanmaktadır. Aaltonen ve Salmi (2019), cobot uygulamalarında en büyük engellerden birinin referans vakaların ve teknik bilgi birikiminin eksikliği olduğunu belirtmektedir; bu nedenle entegratör desteği kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca bazı işletmeler, kiralama ya da kısa süreli deneme uygulamalarını kullanarak yatırım riskini azaltmakta ve teknolojiye aşamalı geçiş sağlamaktadır. Harcama ve sözleşmeler onaylandığında 5. Aşama olan entegrasyon sürecine geçilir.

Aşama 5: Entegrasyon, Programlama & Hücre Geliştirme

Bu aşama sahadaki mühendislik çalışmasıdır: cobot'un kurulumu, çevre ekipman (gripper, kamera, konveyör vb.) entegrasyonu, fiktür tasarımı ve programlamayı içerir. HRC'de iş akışı, insan ve cobot'un paralel ve güvenli çalışmasına göre düzenlenir (ör. yaklaşım bölgeleri, yavaşlatma, güvenli bekleme pozları, elden-ele devretme sinyalleri). Çoğunlukla birden çok deneme-iyileştirme döngüsü gerekir; yol optimizasyonu, algılama güvenilirliği ve çevrim süresi adım adım iyileştirilir. Aşama 2'de tanımlanan güvenlik önlemleri (hız/kuvvet limitleri, yumuşak kaplamalar, E-stop, ışık perdeleri vb.) uygulanır ve doğrulanır. Operatörlerin bu aşamaya erken katılımı, örtük bilgi ve kabul için kritiktir (MTC, 2024). Test ortamında tutarlı çalışma sağlandığında 6. Aşama olan pilot uygulama şartlarına geçilir.

Aşama 6: Pilot Uygulama & İteratif Doğrulama (Plan-Do-Check-Act- PDCA)

Tam yayılımdan önce pilot uygulama ile gerçek üretim koşullarında performans ve güvenlik doğrulanır. Pilot uygulama ve iteratif doğrulama PDCA döngüsüyle yürütülür. Küçük sorunlar program/yerleşim ayarıyla giderilir; büyük sorunlarda Aşama 5 tekrar edilir. Pilot sonunda kriterler karşılanıyorsa devreye alma planlanır ve kriterler sağlandığında Aşama 7'ye geçilir.

Aşama 7: İşgücü Eğitimi & Değişim Yönetimi

Sistemin başarısı insan boyutuna da bağlıdır. Operatör ve teknisyenler; güvenli kullanım, temel program başlatma/durdurma, arıza kurtarma, istisna senaryoları gibi konularda uygulamalı eğitim alır. Çalışan endişeleri (iş güvencesi, güvenlik, rol değişimi) açık iletişim ve erken katılım ile ele alınır; cobot yardımcıdır, ikame değildir mesajı net verilir. Literatürde, çalışanların erken aşamada sürece dahil edilmesi ve uygun eğitimlerle desteklenmesinin, teknolojinin kabulünü artırmada kritik olduğu vurgulanmaktadır (Schnell ve Holm, 2022, s. 181).

Aşama 8: Devreye Alma, Yaygınlaştırma & Sürekli İyileştirme

Pilot başarıyla doğrulandıysa hücre tam üretime alınır; başlangıçta yakın izleme yapılır. Ardından ölçekleme ve sürekli iyileştirme odaklı çalışılır: vardiya genişletme, benzer istasyonlara kopyalama, ikinci/üçüncü cobot ile kapasite artırma, günlük/haftalık KPI takibi (döngü süresi, ilk geçiş verimi, duruş nedenleri) yapılır. Başarıdan sonra süreç Aşama 1'e geri döner: yeni fırsatları tarayarak kurumsal öğrenmeyi büyütür.

Vaka Çalışması

Bir otomotiv yan sanayi olan KOBİ jant üreticisinde gerçekleştirilen bu vaka çalışması, üretim hattındaki işbirlikçi robot entegrasyonunu ele almaktadır. Önerilen entegrasyon adımlarının sırasıyla örnek işletme için nasıl uygulanabileceği gösterilmiştir. Mevcut sistemin verileri, cobot entegrasyonu için ihtiyaçlar, piyasa araştırması ve entegrasyonun getirisi iş adımlarında verilmiştir. Üçüncü adım olan iş gerekçesinde mevcut ve cobot entegrasyonundaki senaryo Rockwell Arena System Simulation V.16.11.20 yazılımı kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Simülasyon modeli, ilgili iş istasyonunun üretim akışını (parça giriş/çıkışı, işlem süresi, bekleme durumları vb.) gerçekçi biçimde temsil edecek şekilde kurgulanmış ve tüm çalıştırmalar Intel® Core™ Ultra 5 125U (1,80 GHz) ve 16,00 GB RAM ile bir PC üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modelin örnek işletme üzerinden uygulama aşamaları aşağıda verilmiştir.

Aşama 1: Fırsat Taraması & İş Seçimi

Üretim hattındaki tüm operasyonlar incelenmiş; jant CNC işleme hücresinde yükleme/boşaltma operasyonu cobot entegrasyonu için uygun bulunmuştur. Bu iş tekrarlayıcıdır, operatörler için ergonomik zorluk taşır ve makine boş bekleme sürelerini artırmaktadır. Ön analizde, operatörlerin iş başında yaklaşık %25 oranında bekleme yaptığı (makine işlem süresi boyunca aktif katkısı olmadığı) belirlenmiştir. Bu nedenle CNC besleme operasyonu, ilk entegrasyon için seçilmiştir.

Aşama 2: Fizibilite & HRC Risk Taraması

- Parça ağırlığı: Ortalama 8,1 kg.
- Makine yükseklik ve erişim mesafesi: 120 cm tabla yüksekliği, 90 cm erişim derinliği.
- Cobot kapasitesi: ≥ 10 kg taşıma kapasitesi gerekmektedir.
- HRC riskleri: İnsan-robot yakın çalışması için ISO/TS 15066 kuvvet/sürat limitleri dikkate alınmıştır.
- Kritik risk: Operatörün parçaları mengeneyle yerleştirme sırasında ellerini sıkıştırma ihtimali vardır. Bu nedenle kuvvet sınırlandırma (150 N altında) ve bölgesel hız azaltma modları uygulanmıştır.

Risk analizi sonucunda uygun mühendislik kontrolleriyle görev HRC kapsamında güvenli olarak değerlendirilmiştir.

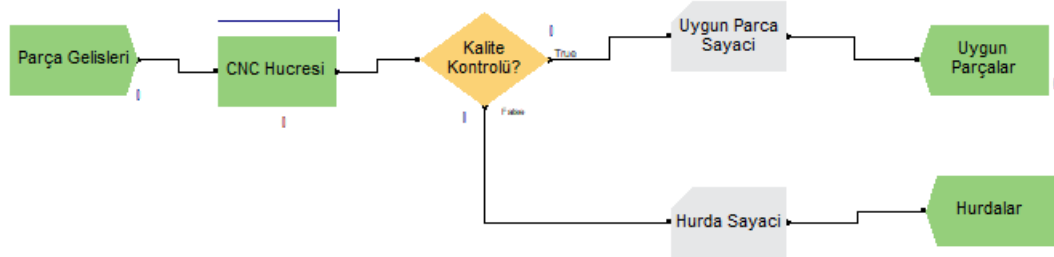
Aşama 3: Basitleştirilmiş İş Gerekçesi (Business Case) & ROI Tahmini

Tezgâhta parça yükleme/boşaltma operasyonu öncelikle mevcut durum (cobot öncesi) senaryosu modellenmiş, ardından aynı sisteme bir cobot eklendiği entegrasyon sonrası senaryo oluşturulmuştur. Simülasyon modelleri üzerinden farklılaştırılan tek önemli değişken, yükleme/boşaltma faaliyetinin insan operatör yerine cobot tarafından gerçekleştirilmesidir. Diğer tüm üretim parametreleri iki senaryoda da sabit tutulmuştur. Böylece gözlemlenen performans farklarının doğrudan cobot entegrasyonundan kaynaklanması hedeflenmiştir. Varsayılan üretim parametreleri ve simülasyon girdileri aşağıda özetlenmiş ve sistemin simülasyon görseli Şekil 3'te verilmiştir:

3.1 Mevcut Durum Verileri (Operatörlü Sistem)

- İşlem ve hareket süreleri (Arena girdileri)
 - Parça gelişleri: EXPO (146 saniye (s))
 - CNC işleme süresi (kesici başında): $\mathcal{T}_p \sim \mathcal{N}(\mu = 105s, \sigma = 6s)$
 - Yükleme/boşaltma süresi (operatör): $\mathcal{T}_{L/UL} \sim \mathcal{N}(\mu = 20s, \sigma = 5s)$
 - Operatör mikro-duruşları:
 - Sayısı \sim Poisson($\lambda = 0.2$), Bekleme Süreleri \sim Expo($\beta = 8s$)
 - Planlı molalar (vardiya başına): 2×15 dk.
- Hatalı parça/kalite
 - FPY (First Pass Yield): $p_{FPY} = 0.955$
 - PPM (Parts Per Million): $\approx 4,5$
- Kullanılabilirlik ve arızalar

- Makine kullanılabilirliği (availability): $A=0.90$
- Simülasyon ayarları
- Çalışma düzeni: 1 makine, 1 operatör (tek hücre).
- Vardiya: 8 saat; gün: 3 vardiya (24 saat).
- Isınma (warm-up): 2 saat.
- Çalıştırma (run): 30 tekrar (different seeds).
- Güven aralığı: %95.
- Elde edilen temel çıktılar (mevcut durum)
- Ortalama çevrim zamanı: $\bar{C}_{manual} = 125.1 \mp 1.4s$ (mikro duruşlarla)
- Günlük üretim (3 vardiya): $Q_{manual} = 240 \mp 7$ parça/gün
- Performans oranı: $P_{manual} \approx 0.833$
- (teorik ideal hız = $105+20=125$ s referansına göre).
- Kalite oranı: $Q_{manual} \approx 0.955$
- OEE: $OEE_{manual} = A * P * Q \approx 0.90 * 0.833 * 0.955 = 0.708 = 70.8\%$



Şekil 3. CNC İşlemine Ait Simülasyon Modeli

3.2. Cobotlu Durum

- İşlem ve hareket süreleri
 - Parça gelişleri: EXPO (146s)
 - CNC işleme süresi: $T_p \sim \mathcal{N}(\mu = 105s, \sigma = 6s)$.
 - Yükleme/boşaltma (cobot): $T_L \sim \mathcal{N}(\mu = 5s, \sigma = 1,5s)$ Çift kavrama (dual-grip) ve optimize edilmiş yaklaşım/çıkış yolları ile paralelleşme: biten parçanın çıkarılması ile yeni parçanın yerleştirilmesi eşzamanlı kurgulanmıştır; efektif net katkı ≈ 5 s.
 - Cobot mikro-duruşları:
 - $Count \sim Poisson(\lambda = 0.05), T_{stop} \sim Exponential(\beta = 5s)$
 - Operatör bağımlılığı: yalnızca istisnai durumlarda (malzeme besleme/LOTO); modelde etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.
- Elde edilen temel çıktılar (cobotlu durum)
 - Çevrim süresi: Ortalama 118 s, $\sigma = 5$ s (Normal dağılım).
 - Bekleme süresi: $\approx \%2$ (operatör bağımsız, sadece cobot programlama duraklamaları).
 - Günlük üretim kapasitesi: ≈ 267 parça.
 - Hatalı parça oranı: %1,8.
 - OEE: %82,0.

Simülasyon sonuçları Tablo 1’de sunulmakta olup, bir CNC hücresine işbirlikçi robot entegrasyonunun ortalama çevrim süresinde ve süreç değişkenliğinde belirgin bir azalma sağladığını göstermektedir. Bu iyileşmenin doğal bir sonucu olarak, günlük üretim kapasitesi yaklaşık %11 oranında artmış; kalite kaynaklı kayıplar ise önemli ölçüde azalmıştır. Bu kazanımlar sayesinde, manuel sistemde %70,8 olarak hesaplanan Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) değeri, cobot destekli yapılandırmada %82,0 seviyesine yükselmiştir. Bulgular, insan-robot işbirliğinin KOBİ ölçekli üretim ortamlarında operasyonel performansı anlamlı biçimde iyileştirdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Metodolojik açıdan değerlendirildiğinde, cobotlu senaryoda çevrim süresi standart sapmasında sınırlı bir artışın ($\sigma = 5$ s), manuel duruma kıyasla gözlemlenmesi; modele cobot programlama duraklamalarının ve mikro düzeyli müdahalelerin dâhil edilmesinden kaynaklanan doğal ve gerekçelendirilebilir bir sonuçtur. Ayrıca, her iki senaryoda da makine kullanılabilirliğinin sabit tutulması ($A = 0,90$), performans ve kalite göstergelerinde gözlenen iyileşmelerin yalnızca cobot entegrasyonunun etkilerini yansıtmasını sağlamış; böylece karşılaştırmalı analizde nedensel etkinin daha net bir şekilde izole edilmesine olanak tanımıştır.

Tablo 1: Simülasyon Çıktılarının Karşılaştırılması: Manuel ve Cobot Destekli CNC Hücresi

Performans Göstergesi	Manuel Operasyon (Mevcut Durum)	Cobot Destekli Operasyon	Değişim / Etki
Ortalama Çevrim Süresi (s)	125,1 ± 1,4 s	118 ± 5 s	↓ ~%5,7
Bekleme Süresi Oranı	Çevrim süresine dahil (operatör kaynaklı mikro-duruşlar)	≈ %2 (cobot programlama duraklamaları)	↓
Günlük Üretim (3 vardiya)	240 ± 7 parça/gün	≈ 267 parça/gün	↑ ~%11,3
Performans Oranı (P)	≈ 0,833	≈ 0,93*	↑
Kalite Oranı (Q)	0,955	0,982 (hata oranı %1,8)	↑
Kullanılabilirlik (A)	0,90	0,90	-
Toplam Ekipman Etkinliği (OEE)	0,708 (%70,8)	0,820 (%82,0)	↑ +11,2

Ekonomik Değerlendirme

- Yatırım maliyeti (cobot, EOAT, entegrasyon): 45.000 para birimi.
- Yıllık tasarruf: 29.000 para birimi (işçilik + kalite maliyet düşüşü).
- ROI: ~1,55 yıl (45000/29000).

Bu hesaplamalar, projenin ekonomik olarak mantıklı olduğunu göstermiştir. Simülasyon sonuçları işletme ile paylaşılmış ve cobot yatırım projesi devreye alınmıştır.

Aşama 4: Cobot Seçimi & Tedarik Planlaması

Seçilen model: UR10ee (12,5 kg kapasite, 1300 mm erişim).

EOAT: Çift parmaklı pnömatik gripper (8-12 kg parçalar için).

Destek ekipmanı: Parça buffer istasyonu, güvenlik lazer tarayıcıları. Tedarik planı: Kiralama opsiyonu incelenmiş, ancak uzun vadeli fayda için satın alma tercih edilmiştir.

Aşama 5: Entegrasyon, Programlama & Hücre Geliştirme

Hücre tasarımında:

- Cobot CNC'nin yanına yerleştirilmiş, buffer ile besleme sağlanmıştır.
- Programlama: Hand-guiding yöntemi ile operatörün katkısıyla çevrim adımları öğretilmiştir.
- Çift gripper kullanımı ile boşaltma + yükleme eşzamanlı yapılmış, çevrim süresi 7 sn kısalmıştır.

Aşama 6: Pilot Uygulama & İteratif Doğrulama (PDCA)

Pilot çalışmada 1 hafta boyunca Cobotlu hücre denenmiştir:

- Gerçekleştirilen ortalama çevrim süresi: 119 sn.
- Günlük üretim: 265 parça.
- Kalite oranı: %98. PDCA döngüsüyle gripper basınç ayarı optimize edilmiştir.

Aşama 7: İşgücü Eğitimi & Değişim Yönetimi

- Operatörlere 2 günlük uygulamalı eğitim verilmiştir.
- İş tanımları güncellenmiş, operatörler kalite kontrol ve ikinci bir CNC tezgâhına yönlendirilmiştir.
- Çalışanların motivasyonu artmış, iş yükü ergonomik olarak hafiflemiştir.

Aşama 8: Devreye Alma, Yaygınlaştırma & Sürekli İyileştirme

Cobotlu hücre tam entegrasyonla seri üretime alınmış, performans aylık olarak izlenmektedir.

- İlk 3 ay sonuçları: Ortalama OEE %81,5; üretim hacmi hedeflerin %103'ü.
- Şirket, ikinci bir CNC hattına cobot yatırımı planlayabilir.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışma, Endüstri 5.0 çerçevesinde işbirlikçi robotların KOBİ ölçekli üretim sistemlerine entegrasyonunu ele alarak, hem metodolojik hem de uygulamalı açıdan katkılar sunmaktadır. Literatürde cobot entegrasyonuna ilişkin çalışmaların büyük bölümü teknik uygunluk veya güvenlik boyutuna odaklanırken, bu araştırma; fizibilite, yatırımın geri dönüşü, simülasyon tabanlı performans analizi, işgücü eğitimi ve sürekli iyileştirme döngülerini bütüncül bir yapı içinde ele almıştır. Bu yönüyle çalışma, KOBİ'lerin sınırlı kaynakları ve yüksek belirsizlik altında yatırım kararı verme ihtiyaçlarına doğrudan yanıt veren pratik bir karar destek çerçevesi ortaya koymaktadır.

Önerilen sekiz aşamalı entegrasyon yaklaşımı, otomotiv yan sanayisinde faaliyet gösteren bir jant üreticisi KOBİ için gerçekleştirilen simülasyon tabanlı vaka çalışması ile örneklendirilmiştir. İlk aşamada gerçekleştirilen fırsat taraması, CNC işleme hücresinde yükleme/boşaltma operasyonunun hem ergonomik riskler taşıması hem de operatörlerin makine işlem süresi boyunca yaklaşık %25 oranında atıl kalması nedeniyle cobot entegrasyonu için uygun bir aday olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, KOBİ'lerde cobot entegrasyonu için yüksek otomasyon seviyesine sahip olmayan, ancak tekrarlı ve zaman baskısı oluşturan operasyonların öncelikli hedefler olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Fizibilite ve insan-robot işbirliği (HRC) risk analizinde, parça ağırlığı, erişim mesafesi ve makine geometrisi dikkate alınarak uygun taşıma kapasitesine sahip bir cobot seçilmiş; ISO/TS 15066 kapsamında kuvvet ve hız sınırlandırmalarıyla güvenli bir çalışma ortamı sağlanmıştır. Özellikle mengeneye parça yerleştirme sırasında ortaya çıkabilecek sıkışma risklerinin mühendislik kontrolleri ile yönetilebileceği gösterilmiştir. Bu sonuç, cobot entegrasyonunun KOBİ'lerde güvenlik açısından uygulanabilir olduğunu desteklemektedir. Rockwell Arena System Simulation yazılımı kullanılarak oluşturulan modellerde, yalnızca yükleme/boşaltma operasyonunun insan operatörden cobot'a devredilmesi değişkeni izole edilmiş, diğer tüm üretim parametreleri sabit tutulmuştur. Bu yaklaşım, performans farklılıklarının doğrudan cobot entegrasyonundan kaynaklandığını açık biçimde ortaya koymuştur. Mevcut durumda ortalama çevrim süresinin 125,1 saniye olduğu sistemde, cobot entegrasyonu ile çevrim süresi yaklaşık 118 saniyeye düşmüş; günlük üretim miktarı 240 parçadan yaklaşık 267 parçaya yükselmiştir. Aynı zamanda hatalı parça oranı %4,5 seviyelerinden %1,8'e gerilemiş ve OEE değeri %70,8'den yaklaşık %82 seviyesine çıkmıştır. Ekonomik değerlendirme sonuçları, cobot yatırımının KOBİ ölçeğinde finansal açıdan da uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Toplam yatırım maliyetine karşılık, işçilik ve kalite maliyeti tasarrufu elde edilmesi, yatırımın geri dönüş süresini yaklaşık 1,55 yıl seviyesine indirmiştir. Bu bulgu, KOBİ'lerde sıkça dile getirilen "yüksek yatırım maliyeti" algısının, doğru operasyon seçimi ve ön analizlerle önemli ölçüde aşılabileceğini göstermektedir.

Pilot uygulama ve PDCA döngüsü kapsamında elde edilen sonuçlar, simülasyon çıktılarının sahaya yüksek oranda yansıdığını ortaya koymuştur. Pilot uygulama sürecinde ölçülen çevrim süreleri, üretim miktarı ve kalite oranları, simülasyon sonuçlarıyla büyük ölçüde örtüşmüş; küçük sapmalar ise iteratif iyileştirme adımlarıyla giderilmiştir. Bu durum, simülasyon tabanlı yaklaşımların KOBİ'ler için düşük riskli ve öğrenme odaklı bir geçiş mekanizması sunduğunu göstermektedir. İşgücü eğitimi ve değişim yönetimi aşaması, çalışmanın insan merkezli Endüstri 5.0 perspektifini güçlendiren önemli bir bileşen olmuştur. Operatörlerin üretim dışı bırakılmak yerine daha nitelikli görevlere yönlendirilmesi, çalışan direncinin azalmasına, ergonomik yükün hafiflemesine ve motivasyonun artmasına katkı sağlamıştır. Bu sonuç, cobot entegrasyonunun yalnızca teknik değil, aynı zamanda sosyo-teknik bir dönüşüm olduğunu vurgulamaktadır. Son aşamada, sistemin seri üretime alınması ve performansın düzenli olarak izlenmesi, önerilen entegrasyon çerçevesinin sürdürülebilirliğini göstermektedir. İlk üç aylık dönemde OEE değerinin %81,5 seviyesinde istikrarlı biçimde korunması ve üretim hedeflerinin aşılması, modelin yaygınlaştırılabilirliğine işaret etmektedir. Bu bağlamda çalışma, KOBİ'ler için cobot entegrasyonunun tek seferlik bir otomasyon yatırımı değil sürekli iyileştirme ve ölçeklenebilir büyüme süreci olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada gözlemlenen iyileşmelerin önemli bir kısmı süreç yeniden düzenlemesiyle ilişkilidir. Yükleme/boşaltma faaliyetinin insan yerine cobot tarafından gerçekleştirilmesi, yalnızca işlem süresini değil, aynı zamanda bekleme, mikro-duruş ve iş senkronizasyonu gibi ikincil performans kayıplarını da etkilemiştir. Bu bulgu, Mokhtarzadeh vd. (2020) tarafından vurgulanan insan-robot görev paylaşımının çizelgeleme ve akış dengesi üzerindeki rolüyle tutarlıdır ve cobot entegrasyonunun yalnızca mekanik bir ikame olarak değerlendirilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır. İnsan-robot işbirliği güvenliği açısından bakıldığında, çalışmada uygulanan kuvvet ve hız sınırlandırmalarına dayalı yaklaşım, regülasyonların KOBİ ortamlarında uygulanabilirliğine ilişkin önemli bir tartışma alanı açmaktadır. Literatürde güvenlik standartları çoğunlukla büyük ölçekli, yüksek otomasyonlu tesisler üzerinden ele alınırken, bu çalışma sınırlı alan ve kaynak koşullarında da standartlara uyumun mümkün olduğunu göstermektedir (Hanna vd., 2022) Simülasyon tabanlı değerlendirmelerin rolü, bu çalışmada yalnızca performans tahminiyle sınırlı kalmamış, aynı zamanda karar verme sürecinin bir öğrenme aracı olarak işlev görmüştür. Simülasyon çıktıları ile pilot uygulama sonuçları arasındaki yakınlık, KOBİ'ler için simülasyonun soyut bir analiz tekniğinden

ziyade risk azaltıcı bir geçiş mekanizması olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Bu durum, simülasyonun KOBİ'lerde benimsenmesini zorlaştıran karmaşık ve pahalı algısının yeniden düşünülmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, KOBİ yöneticileri için cobot entegrasyonuna yönelik somut yönetsel çıkarımlar sunmaktadır. İlk olarak, cobot yatırımlarının başarısının teknoloji seçiminden ziyade doğru operasyon seçimine bağlı olduğu görülmektedir. İnsan katkısının sınırlı kaldığı, tekrarlayıcı ve zaman baskısı oluşturan görevler, erken aşama entegrasyon için önceliklendirilmelidir. Bu yaklaşım, yatırım riskini azaltırken erken kazanımların görünür olmasını sağlar. İkinci olarak, simülasyon tabanlı değerlendirmelerin yatırım öncesi karar süreçlerine entegre edilmesi, yöneticilere düşük maliyetli bir deneme alanı sunmaktadır. Farklı senaryoların sanal ortamda test edilmesi, hem performans beklentilerinin netleşmesini hem de organizasyon içinde ortak bir anlayışın oluşmasını kolaylaştırır. Bu durum, teknik belirsizliklerin yanı sıra çalışan direncinin yönetilmesine de katkı sağlar. Üçüncü olarak, cobot entegrasyonu bir otomasyon projesi olarak değil, işgücü dönüşümünü içeren sosyo-teknik bir değişim olarak ele alınmalıdır. Operatörlerin erken aşamada sürece dahil edilmesi, eğitim ve rol tanımlarının netleştirilmesi, entegrasyonun kabulünü hızlandırmaktadır. Son olarak, yöneticiler için cobot yatırımları tek seferlik bir karar değil; performans izleme, geri bildirim ve kademeli yaygınlaştırma adımlarını içeren sürekli iyileştirme odaklı bir yol haritası olarak planlanmalıdır.

Bu çalışma otomotiv yan sanayinde yer alan bir KOBİ'nin mevcut durumunda cobot yatırımı için hangi adımları izlemesi gerektiğini, hangi analizleri yapması gerektiğini ve bir döngü olarak sürekli iyileşmeyi nasıl sağlaması gerektiğini bir model üzerinden göstermektedir. Ancak vaka çalışmasında yalnızca tek bir cobotun entegre edildiği bir üretim hücresi ele alınmıştır. Çoklu cobotlu hücreler, hücreler arası etkileşimler ve sistem genelinde oluşabilecek yeni darboğazlar bu kapsamda değerlendirilmemiştir. Çalışmadaki bir diğer kısıt da operatörlerin öğrenme eğrisi, alışma süresi ve uzun vadeli davranışsal adaptasyonu modele açıkça dahil edilmemiştir. İnsan faktörüne ilişkin bu dinamikler, zaman içinde performans sonuçlarını etkileyebilir. Gelecek çalışmalar simülasyon modeline sadece operatör kaynaklı gecikmeler değil de benzetimin daha gerçekçi sonuçlar vermesini sağlayabilecek üretimden kaynaklı duraksamaları da dahil edebilir. Ayrıca önerilen çerçevenin farklı sektörlerde test edilebilir, ergonomik risk skorları, çalışan memnuniyeti ve bilişsel yük gibi nitel göstergeler modele entegre edilerek çoklu cobotlu hücrelerin sistem genelindeki etkileri analiz edilebilir. Bu yönleriyle çalışma, KOBİ'lerde sürdürülebilir, insan merkezli ve veri temelli üretim sistemlerinin geliştirilmesine yönelik bir referans noktası sunmaktadır.

Kaynakça

- Aaltonen, I. & Salmi, T. (2019). Experiences and expectations of collaborative robots in industry and academia: Barriers and development needs. *Procedia Manufacturing*, 38, 1151-1158. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.204>
- ABI Research. (2025). *Collaborative robots pioneer automation revolution, market to reach US\$7.2 billion by 2030* [Press release]. Erişim adresi: <https://www.abiresearch.com/press/collaborative-robots-pioneer-automation-revolution-market-to-reach-us7.2-billion-by-2030/>
- Bag, S., Wood, L. C., Xu, L. & Dhamija, P. (2021). Industry 4.0 and human-robot collaboration: A systematic literature review and future research directions. *Technological Forecasting and Social Change*, 169, 120786. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120786>
- Baratta, A., Cimino, A., Longo, F. & Mirabelli, G. (2024). Task allocation in human-robot collaboration: A simulation-based approach to optimize operator's productivity and ergonomics. *Procedia Computer Science*, 232(12), 688-697. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.068>
- Briken, K., Moore, J., Scholarios, D., Rose, E. & Sherlock, A. (2023). Industry 5.0 and the human in human-centric manufacturing. *Sensors*, 23(14), 6416. <https://doi.org/10.3390/s23146416>
- Bogue, R. (2022). The changing face of the automotive robotics industry. *Industrial Robot*, 49(3), 386-390. <https://doi.org/10.1108/IR-01-2022-0022>
- Faccio, M., Minto, R., Rosati, G. & Bottin, M. (2020). The influence of the product characteristics on human-robot collaboration: A model for the performance of collaborative robotic assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(5-6), 2317-2331.
- Gualtieri, L., Palomba, I., Merati, F. A., Rauch, E. & Vidoni, R. (2020). Design of human-centered collaborative assembly workstations for improving ergonomics and production efficiency: A case study. *Sustainability*, 12(9), 3606. <https://doi.org/10.3390/su12093606>
- Hanna, A., Larsson, S., Götvall, P.-L. & Bengtsson, K. (2022). Deliberative safety for industrial intelligent human-robot collaboration: Regulatory challenges and solutions for taking the next step towards Industry 4.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78, 102386. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102386>
- Horst, J., Marvel, J. & Messina, E. (2021). *Best practices for the integration of collaborative robots into workcells within small and medium-sized manufacturing operations* (NIST AMS 100-41). <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-41>

- Jennes, P. & Di Minin, A. (2023). Cobots in SMEs: Implementation processes, challenges, and success factors. In *2023 IEEE International Conference on Technology and Entrepreneurship (ICTE)*. <https://doi.org/10.1109/ICTE58739.2023.10488658>
- Kimaporn, P. & Nunkaew, W. (2024). Combining metaheuristics and process mining: Improving cobot placement in a combined cobot assignment and job-shop scheduling problem. *Operations Research Perspectives*, 1836-1845. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.384>
- Kinast, A., Dörner, K. & Rinderle-Ma, S. (2020, November). *Biased random-key genetic algorithm for cobot assignment in an assembly/disassembly job shop scheduling problem*. In *International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*. Universität Wien. <http://eprints.cs.univie.ac.at/6568/>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. D. F. R. & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0-A systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609-3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Messina, E. R. (2024). *Research opportunities for advancing measurement science for manufacturing robotics* (NIST Grant/Contractor Report GCR 24-054). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.24-054>
- Mokhtarzadeh, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Vahedi-Nouri, B. & Farsi, A. (2020). Scheduling of human-robot collaboration in assembly of printed circuit boards: A constraint programming approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(5), 460-473. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1736713>
- Manufacturing Technology Centre. (2024). *A guide to human-robot collaboration in manufacturing*. <https://mtcprod.s3.eu-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2024-07/A%20Guide%20to%20Human-Robot%20Collaboration%20in%20Manufacturing.pdf>
- Polonara, M., Romagnoli, A., Biancini, G. & Carbonari, L. (2024). Introduction of collaborative robotics in the production of automotive parts: A case study. *Machines*, 12(3), 196. <https://doi.org/10.3390/machines12030196>
- Porubčinová, M. & Fidlerová, H. (2020). Determinants of Industry 4.0 technology adaption and human-robot collaboration. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology in Trnava, Slovak University of Technology in Bratislava*, 28(46), 10-21. <https://doi.org/10.2478/rput-2020-0002>
- Rajkumar, N., Yachipappan, B., Mathews, A., Radha, V. & Judeson Antony Kojippillai, C. (2025). Industry 5.0: The human-centric future of manufacturing. In V. Sharma et al. (Eds.), *Challenges in information, communication and computing technology* (pp. 562-567). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781003590859-57>
- Shaw, J. (2024). *Robots, cobots and their impact on automotive assembly*. USC Consulting Group. Erişim adresi: <https://usccg.com/blog/robots-cobots-and-their-impact-on-automotive-assembly/>
- Schnell, M. & Holm, M. (2022). Challenges for manufacturing SMEs in the introduction of collaborative robots. In *Proceedings of the 10th Swedish Production Symposium (SPS2022)* (pp. 3549-3557). IOS Press.
- Stecke, K. E. & Mokhtarzadeh, M. (2022). Balancing collaborative human-robot assembly lines to optimise cycle time and ergonomic risk. *International Journal of Production Research*, 60(1), 25-47. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1989077>
- Thongdonnoi, C., Chutima, P. & Jiamsanguanwong, A. (2023). Application of collaborative robots for increasing productivity in an eyeglasses lenses manufacturer. *Engineering Journal*, 27(10), 93-112. <https://doi.org/10.4186/ej.2023.27.10.93>
- Țițu, A.-M., Gușan, V. & Dragomir, M. (2023). Integration of collaborative robots in the automotive industry during post-pandemic recovery. *Acta Technica Napocensis - Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, 66(1S). <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/2224>
- Tran, B. & Attorney, P. (2025). *SMEs & robotics: Are small manufacturers adopting?* PatentPC. Erişim adresi: <https://patentpc.com/blog/smes-robotics-are-small-manufacturers-adopting>
- Xu, L. D., Xu, E. L. & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Vido, M., Scur, G., Massote, A. A. & Lima, F. (2020). The impact of the collaborative robot on competitive priorities: Case study of an automotive supplier. *Gestão & Produção*, 27(4). <https://doi.org/10.1590/0104-530x5358-20>
- Villani, V., Pini, F., Leali, F. & Secchi, C. (2018). Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55(2), 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
- Weckenborg, C., Kieckhäfer, K., Müller, C., Grunewald, M. & Spengler, T. S. (2020). Balancing of assembly lines with collaborative robots. *Business Research*, 13(1), 93-132.
- Zhang, Y.-J., Liu, L., Huang, N., Radwin, R. & Li, J. (2021). From manual operation to collaborative robot assembly: An integrated model of productivity and ergonomic performance. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 895-902.