

YALIN 4.0: YALIN ÜRETİM VE ENDÜSTRİ 4.0 ENTEGRASYONU

LEAN 4.0: LEAN PRODUCTION and INDUSTRY 4.0 INTEGRATION

Ülge TAŞ*

*Dr. Öğr. Üyesi, Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, ulge.tas@aksaray.edu.tr,
ORCID: 0000-0002-2376-3735

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
Gönderilme Tarihi 28.01.2025 Revizyon Tarihi 12.02.2025 Kabul Tarihi 21.02.2025 Makale Kategorisi Araştırma Makalesi JEL Kodları L23 L62 M11	Yalın üretim ile Endüstri 4.0 arasındaki karşılıklı etkileşim ve bağımlılık giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu iki paradigmanın “Yalın 4.0” olarak adlandırılan entegre bir yaklaşımla birleştirilmesi hem akademik hem de endüstriyel bağlamda güncelliğini korumaktadır. Bu makalenin amacı Yalın üretim ile Endüstri 4.0 entegrasyonunda verimliliği artıran en etkin Yalın 4.0 araçlarının tanımlanmasıdır. İlgili literatürde çok sayıda araştırma, üretken ve nitelikli bir üretim sistemi oluşturmak için her iki kavramın entegrasyonu ele almaktadır. Ancak, bu entegrasyonlar arasındaki etkin araçların incelenmesi ile ilgili literatürde bilimsel bir rapora rastlanmamıştır. Nitel araştırma varsayımı ile toplanan veriler MAXQDA 22 ile yorumlanmıştır. Araştırmada, tematik içerik analizi yöntemiyle çözümlenen veriler esneklik, kalite, maliyet, teslim süreleri ve verimlilik gibi beş hedef boyut altında gruplandırılmış ve her bir boyutun alt boyutları olmak üzere toplamda on üç alt boyut elde edilmiştir. Çalışmanın sonucu beş adet Yalın 4.0 aracının verimliliği artırmak için en etkili araçlar olduğunu, bunlardan ikisinin toplam verimlilikte öne çıktığını göstermektedir. Bu çalışmanın bulgularının verimlilik artışı ve Yalın 4.0 araçları ile ilgili literatüre ve uygulamaya katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, MAXQDA, Tematik İçerik Analizi, Yalın 4.0, Yalın Üretim

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received 28.01.2025 Revized 12.02.2025 Accepted 21.02.2025 Article Classification: Research Article JEL Codes L23 L62 M11	The interaction and interdependence between Lean Production and Industry 4.0 are becoming increasingly significant. The integration of these two paradigms under the framework of “Lean 4.0” retains its relevance in both academic discourse and industrial applications. This article aims to identify the most effective Lean 4.0 tools that enhance efficiency in the integration of LP and I4.0. While numerous studies in the existing literature address the integration of these concepts to develop a productive and high-quality manufacturing system, the investigation of the key tools influencing such integrations remains insufficiently explored. Data for this research were collected within a qualitative research framework and analyzed using MAXQDA 22 software. Through thematic content analysis, the data were categorized into five primary target dimensions: flexibility, quality, cost, delivery times, and overall efficiency. Additionally, a total of thirteen sub-dimensions were identified under each primary dimension, offering a more detailed perspective on their contributions. The study's results show that five Lean 4.0 tools are the most effective for increasing productivity, two of which stand out in overall productivity. Consequently, it is anticipated that the results of this study will provide valuable contributions to both the academic literature and practical applications, particularly in the context of enhancing productivity through Lean 4.0 tools. Keywords: Industry 4.0, MAXQDA, Thematic Content Analysis, Lean 4.0, Lean Production

Atıf (Citation): Taş, Ü. (2025). “Yalın 4.0: Yalın Üretim ve Endüstri 4.0 Entegrasyonu”, *Kapanaltı Dergisi*, (7): 31-44



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

Giriş

Dijitalleşme, uzun zamandır üretim sektörünün geleceğini şekillendirmesi öngörülen önemli itici güçlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Abele vd., 2019). Üretim sektöründe artan rekabet, verimliliği artırmaya yönelik güvenilir ve hızlı çözümlerin yanı sıra yenilikçi iş modellerine olan talebi de artırmaktadır. Bu bağlamda, pazar dinamiklerindeki değişimlere hızlı ve esnek bir şekilde yanıt verebilmek için Endüstri 4.0 (I4.0) teknolojilerinin kademeli olarak üretim süreçlerine entegre edilmesi büyük bir önem taşımaktadır (Kagermann vd., 2013). Modern bilgi ve iletişim teknolojilerinin şekillendirdiği I4.0, bileşenlerin ve makinelerin akıllı bir yapıya kavuştuğu ve kanıtlanmış internet standartlarına dayalı bir ağ modeli sunmaktadır. Ayrıca, I4.0 vizyonu daha yakından incelendiğinde, bu yaklaşım ile Yalın Üretim (LP) arasında çeşitli benzerliklerin bulunduğu görülmektedir. Halihazırda birçok üreticinin LP yöntemlerini ve prensiplerini benimsemiş olması nedeniyle I4.0'ın uygulanması kolay olmuştur (Mettermich vd., 2017). LP kapsamında, organizasyon ve süreçler bütüncül bir şekilde ele alınarak her türlü israfın ortadan kaldırılması ve sürekli iyileştirmelerin sağlanması hedeflenmektedir (Öno, 2013). LP prensipleri, 1990'lı yılların başında tanınmaya başlamasından bu yana endüstride yaygın kabul görmüştür. Bu yaklaşımın temel özellikleri arasında, üretim süreçlerine insan faktörünün etkin bir şekilde dâhil edilmesi, sürekli iyileştirme kültürünün benimsenmesi ve israfı önleyerek değer yaratan faaliyetlere odaklanılması yer almaktadır. Basitliği ve verimliliği yüksek oranlarda artırma potansiyeli, LP'nin üretim sistemlerinde standart bir uygulama haline gelmesinin başlıca nedenleri arasında sayılabilmektedir (Gröbner, 2007). Bu bağlamda, LP, üretim sistemlerine yeni teknolojilerin entegrasyonu için sağlam bir başlangıç noktası oluşturmaktadır (Mettermich vd., 2017; Dillinger vd., 2020). Dolayısıyla, bu iki paradigmanın bir organizasyondaki rolünü analiz etmek ve geleceğe yönelik üretim sistemleri tasarlamak amacıyla; zaman, maliyet ve kalite gibi hedefler üzerindeki etkilerinin araştırılması kritik bir öneme sahiptir (Bick, 2014).

Bu doğrultuda, bu çalışma, üretim işletmeleri açısından büyük önem taşıyan hedef boyutlar üzerinde Yalın 4.0 araçlarının etkilerini belirlemeye yönelik sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Sonuç olarak, makale bulguları üretim işletmelerinin Yalın 4.0 dönüşümlerine rehberlik eden bir kaynak işlevi görerek gelecekteki araştırmalar için sağlam bir temel oluşturacaktır. Bu bağlamda, Yalın 4.0 dokusunu karmaşık bir şekilde ören LP ve I4.0 faktörlerini tanımlamak ve anlamak için boyutlar incelenmiştir. LP ve I4.0 paradigmalarının entegrasyonuna yönelik sistematik yaklaşımlar ve bu entegrasyonun etkileri üzerine yapılan araştırmalar halen sınırlı düzeydedir. Bu nedenle çalışmanın özgünlüğü bir işletmenin verimliliğini artıran Yalın 4.0'ın en etkin araçlarının hangileri olduğunun belirlenmesidir. Buna bağlı olarak, bu makalenin amacı, LP ve I4.0 entegrasyonu ile oluşan, verimliliği artıran en etkin Yalın 4.0 araçlarının tanımlanmasıdır.

1. Kavramsal Çerçeve ve Literatür Tarama

I4.0 ve LP, modern üretim sistemlerinin geleceğini şekillendiren iki önemli paradigma olarak dikkat çekmektedir. Literatürde, LP prensiplerinin etkin bir şekilde uygulanmasının, israfı azaltma ve değer yaratan faaliyetlere odaklanma açısından sağladığı faydalar geniş bir şekilde ele alınmıştır (Womack ve Jones, 2016). Bunun yanı sıra, I4.0'ın getirdiği dijitalleşme ve akıllı üretim sistemleri, üretim süreçlerinde esneklik, hız ve verimlilik sağlamada öncü bir rol oynamaktadır (Kagermann, 2013).

Yalın 4.0, LP felsefesini dikkate alarak bir üretim işletmesinin teknolojik ilerlemeye uyum sağlama yeteneğini tanımlamaktadır. Buna bağlı olarak, Yalın 4.0 iyileştirmelerinin işletmenin hedefleriyle uyumlu olması, insan-teknoloji-organizasyon bağlamında bütünsel bir etkiye sahip olması ve bunların etkileşimlerini dikkate alması gerekmektedir (Rittberger ve Schneider, 2018). Yalın 4.0 iyileştirmelerinin yalnızca teknolojik altyapıyla sınırlı kalmaması gerektiğini, aynı zamanda insan, teknoloji ve organizasyon unsurları arasındaki etkileşimlere odaklanarak bütünsel bir yaklaşım benimsenmesi gerektiğini belirtmektedir. Teknolojik dönüşüm sürecinde

çalışanların eğitimi, liderlik yaklaşımlarının uyumlu hale getirilmesi ve organizasyonel kültürün yeniliklere açık olması gibi unsurlar kritik öneme sahiptir (Kolberg ve Zühlke, 2015). Bir diğer önemli nokta, Yalın 4.0'ın üretim süreçlerinde değer yaratan faaliyetlere odaklanarak, israfın daha etkin bir şekilde ortadan kaldırılmasını sağlamasıdır. Bu akıllı sensörler, büyük veri analitiği ve gerçek zamanlı izleme sistemleri gibi I4.0 teknolojilerinin LP prensipleri ile entegre edilmesiyle mümkün hale gelmektedir. Wagner vd. (2017), çalışmalarında, bu entegrasyonun üretim süreçlerinde çeviklik ve esneklik sağladığını, aynı zamanda süreçlerin daha şeffaf hale gelmesine olanak tanıdığını ifade etmektedir. Bu sayede, üretim işletmeleri, pazardaki değişimlere hızlı bir şekilde uyum sağlayarak rekabet avantajı elde edebilmektedir. Bununla birlikte, Yalın 4.0 uygulamalarının başarıya ulaşması, işletmelerin stratejik hedeflerine uygun bir planlama yapmasını gerektirmektedir. Özellikle, teknolojik yatırımların doğru bir şekilde önceliklendirilmesi, kaynakların etkin kullanımı ve uygulamaların organizasyonel hedeflerle uyumlu hale getirilmesi önem arz etmektedir (Liker, 2021). Ek olarak, bu süreçte çalışanların sürece dâhil edilmesi ve yeni teknolojilere adapte olmaları için uygun bir eğitim programının oluşturulması gerekmektedir. Çünkü insan faktörü, Yalın 4.0'ın işletme genelinde sürdürülebilir bir başarı sağlamasında kilit bir rol oynamaktadır. Yalın 4.0 ilk olarak 2017 yılında Metternich ve arkadaşları tarafından Almanca yazılan “Yalın 4.0 – Çelişki ve Vizyon Arasında” isimli makalede literatüre kazandırılmıştır. Yazarlar, LP ile teknolojiler arasındaki uyumluluğu I4.0 şemsiyesi altında yansıtarak, yalının dijitalleşme için bir ön koşul gibi görüldüğü sonucuna varmışlardır. Buna bağlı olarak Yalın 4.0, LP prensipleri ve araçlarının I4.0 teknolojileriyle birleşimidir.

Geleneksel LP, israfı azaltmaya, sürekli iyileştirmeye (kaizen) ve değer akışı optimizasyonuna odaklanırken, Yalın 4.0 bu hedefleri Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT), siber-fiziksel sistemler (Cyber-Physical Systems - CPS), büyük veri analitiği (big data), yapay zeka (Artificial Intelligence - AI) ve bulut bilişim (cloud) gibi dijital teknolojilerin benimsenmesi yoluyla genişletmiştir (Soba ve Akar, 2021). Yalın 4.0, yalnızca yalın uygulamaların teknolojik bir güncellemesi değildir; bunun yerine, dijital teknolojilerin geleneksel yalın sınırlamalarının üstesinden gelmek için kolaylaştırıcı olarak hizmet ettiği bir paradigma değişimini temsil eder. Örneğin, LP, manuel gözlem ve değer akışı haritalama yoluyla israfı belirleyip azaltırken, I4.0 teknolojileri, verimsizlikleri proaktif olarak belirlemek için gerçek zamanlı veri toplama ve öngörücü analitiği mümkün kılmaktadır. Geleneksel yalın, geçmiş verilere ve temel neden analizine odaklanarak reaktif sorun çözmeye çalışırken Yalın 4.0 öngörücü ve tanımlayıcı analizler kullanır ve kuruluşların kesintileri öngörmesine, öngörücü bakım yoluyla bakım programlarını optimize etmesine ve üretim planlarını dinamik olarak ayarlamasına olanak tanımaktadır (Cachada vd., 2018). Yalın 4.0, odak noktasını yalnızca israfı ortadan kaldırmaktan, kişiselleştirme, toplu özelleştirme ve çeviklik yoluyla müşteri değerini en üst düzeye çıkarmaya kaydırır. Bu, üretim sistemlerinin değişen pazar taleplerine duyarlı olmasını da sağlamaktadır. Otomasyon ve dijitalleşme I4.0'ın merkezinde yer alırken, Yalın 4.0 insan faktörünü vurgular.

Değer akış haritalama, kaizen, kanban gibi yalın araçlar IoT, dijital ikizler, sensör gibi akıllı sistemlerle bütünleştirildiğinde kuruluşların süreç verimliliği, karar alma zekası ve organizasyon kültürü gibi boyutlarda sinerji yaratarak verimliliği artırmaktadır (Metternich vd. (2017).

İsrafı ve karmaşıklığı azaltmasıyla LP ile I4.0'ın sinerji yaratmaktadır. Proseslerde mükemmellik seviyesine ulaşabilmek ve akıllı süreçlerde başarının önünü açmak için bu iki paradigmanın entegrasyonu işletmelere birçok avantaj sunmaktadır. Bu avantajlar; verimlilik artışı, gerçek zamanlı veri analizi, esneklik, israfın azaltılması, maliyetlerin düşürülmesi, müşteri memnuniyeti, verimliliğin artırılmasıdır (Gürsoy, 2022). Bu avantajlarının yanı sıra Yalın 4.0'ın, yüksek yatırım maliyeti, teknik karmaşıklık, teknolojiye güvenme riski ve çalışan direnci gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Büyükoğuzkan vd., 2020).

Literatür incelendiğinde; son yıllarda yapılan çalışmalar, LP ile I4.0'ın birbirini tamamlayıcı yapıda olduğunu vurgulamaktadır. Literatüre göre öne çıkan çalışmalar şunlardır:

LP'nin israfın ortadan kaldırılması ve sürekli iyileştirme prensipleri, I4.0 teknolojilerinin sunduğu veri odaklı karar alma mekanizmalarıyla desteklenmektedir (Kolberg ve Zühlke, 2015).

Birçok araştırma halihazırda LP'nin uygulandığı yerde I4.0 uygulanmasının verimliliği artırdığını doğrulamaktadır (Rüttimann ve Stöckli, 2016; Huber, 2016; Dombrowski vd., 2017; Tortorella ve Fettermann, 2018; Prinz vd., 2018).

Dombrowski vd. (2017) Alman endüstrisinde gerçekleştirdikleri çalışmada, I4.0 uygulamalarının ve ilgili süreçlerin (örneğin, üretim, lojistik, kalite, bakım vb.) hedeflerine yönelik kullanım örneklerinin kapsamlı bir analizini yapmışlardır. Bu analiz, Yalın 4.0 tabanlı olası iyileştirme alanlarını değerlendirmede literatüre katkı sağlamaktadır.

Bazı araştırmalar I4.0 teknolojilerinin LP içindeki sürekli iyileştirme süreçleri üzerindeki etkilerini araştırmış ve I4.0'ın olumlu bir etki yarattığı yargısına varmışlardır (Hambach vd., 2017; Meudt vd., 2017).

Metternich vd. (2017), LP ile I4.0 arasında, Yalın 4.0 olarak adlandırılan pozitif bir korelasyon olduğunu, bununda sinerji yarattığını iddia etmişlerdir.

Birçok bilimsel makale, I4.0 teknolojilerinin LP'nin bütünsel yaklaşımı üzerine inşa edildiğini ve LP'nin I4.0'ın temeli olduğunu belirtmektedir (Dombrowski vd., 2017; Mrugalska ve Wyrwicka, 2017; Bertagnoli, 2018).

Sony (2018), LP'nin I4.0'ın uygulanmasına katkıda bulunabileceğini ve bunun araştırmalarla desteklendiğini ancak I4.0'ın LP ile bütünleşmesini destekleyen çalışmaların yetersiz olduğunu belirtmiştir.

Vita (2018), organizasyonel performans üzerindeki etkisi hakkında yaptığı bir çalışmada, LP ve I4.0'ın uygulama düzeyini ölçen 212 işletmeden topladığı çevrimiçi anketi kullanmıştır. İlginç bir sonuç olarak, Vita, I4.0 ile LP arasında pozitif ve yüksek bir korelasyon olmasına rağmen, I4.0'a eklenen LP yaklaşımının etkisinin istatistiksel olarak önemsiz olduğunu bulmuştur.

Rittberger ve Schneider (2018), yaptıkları çalışmada LP ve I4.0'ı karşılaştırmak ve birleştirmek için İnsan-Teknoloji-Organizasyon modelini (HTO) ortaya çıkarmıştır. Bu model teknolojinin hem insanlarla hem de organizasyonla arasında olumlu sinerjiler olduğunu varsaymaktadır.

Rosin vd. (2020), yaptıkları araştırmanın sonucunda I4.0'ın temelini LP'nin oluşturduğunu, LP'nin ise I4.0 ile ilerleyebileceğini iddia etmişlerdir.

Agostinho ve Baldo (2021) araştırmaları sonucunda LP'nin I4.0 için bir temel oluşturduğunu ve I4.0'ın LP'nin etkinliğini artırdığı yargısına varmışlardır.

Perico ve Mattioli (2020), Yalın 4.0'ın temel konularında (üretim kontrolü, sürekli çekme akışının sürdürülmesi ve makine arızasının erken tahmini) insan kararlarını desteklemek için yapay zekânın nasıl dâhil edileceğine dair yeni bakış açıları önermişlerdir.

Ejsmont vd. (2020), Yalın 4.0 ile operasyonel mükemmellikte yeni bir seviyeye ulaşmak için israfı daha fazla azaltmada araçları tanımlamışlardır.

Arey vd. (2021), dijital unsurları geleneksel ürün değer akışlarına dahil etmek için her yerde bulunan Değer Akış Haritası (DAH) sürecine formüsel bir yaklaşım sunarak LP ve I4.0'ı entegre etmişlerdir.

İlgili literatür incelendiğinde hala LP ve I4.0 paradigmalarının entegrasyonuna yönelik sistematik yaklaşımlar ve bu entegrasyonun etkileri üzerine yapılan araştırmaların sınırlı

düzeyde olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, mevcut literatürdeki bu boşluk doldurularak bir işletmenin verimliliğini artıran Yalın 4.0'ın en etkin araçları tanımlanmıştır.

2. Yöntem

Bu çalışmada, LP ve I4.0 entegrasyonunun üretim sistemleri üzerindeki etkilerini incelemek için nitel varsayım kullanılmıştır. Öncelikle, literatür taraması yoluyla LP ve I4.0'ın temel özellikleri, avantajları ve sınırlılıkları analiz edilmiştir. Bu nitel çalışmada, Aksaray'da faaliyet gösteren çok uluslu bir üretim şirketinden belgelerden doküman analizi yoluyla veriler toplanmıştır. Veri toplama sonrası, bu LP ve I4.0'ın entegrasyonunu benimseyen üretim işletmesi üzerinde bir tematik içerik analizi gerçekleştirilip MAXQDA 22 ile sonuç analizleri raporlanmıştır.

Nitel yaklaşım, metin biçimindeki yapılandırılmamış verilerin analiz edilmesini içermektedir (Schuelke-Leech ve Barry, 2017). Bu çalışma toplanan nitel verilerin kodlama yoluyla analiz edilmesini içermektedir. Nitel veri analizinde oldukça gelişmiş ve etkili bir program olduğu için MAXQDA 22 programı kullanılarak kodlar belirlenmiştir. Kodlardan oluşturulan boyutlar ve alt boyutlar için bulgular yorumlanarak, verimliliği artırmadaki en etkili Yalın 4.0 araçları belirlenmiştir. Araştırmanın güvenilirliğini sağlamak için şu formül kullanılmıştır (Miles ve Huberman, 1994):

$$\text{Kod güvenilirliği} = \frac{\text{Anlaşma}}{\text{Anlaşma} + \text{Anlaşmazlık}} \times 100$$

Bu çalışma için güvenilirlik yüzdesi %85 olarak hesaplandı

$$\text{Kod güvenilirliği} = \frac{329}{329 + 56} \times 100$$

Nitel çalışmalarda, arzu edilen kod güvenilirliği için Miles ve Huberman (1994) %70 ve üzerinde olmasının araştırmanın güvenilirliği için yeterli olduğunu belirtmiştir. Bu çalışma için güvenilirlik %85 bulunmuş ve araştırma güvenilir kabul edilmiştir.

Bu çalışmada, verimliliği artırmak için en etkin Yalın 4.0 aracı LP ve I4.0'ye göre tanımlandı. Tanımlama yapmadan önce LP ve I4.0 yaklaşım, ana ilkeler, araçlar, hedef boyutlar, iyileştirme ve veri gibi faktörleri bakımından kıyaslanmıştır.

Tablo 1: *LM ve I4.0'ın kıyaslanması*

	LP	I4.0
Yaklaşım	İnsan+Teknoloji+Organizasyon	Teknoloji
Ana İlkeler	-Katma değer yaratmak -Sürekli iyileştirme	-Dijital dönüşüm -Değer zinciri entegrasyonu
Araçlar	Kanban, Kaizen, JIS (Just-in-Sequence), DAH, 5S, Tekli Zamanlarda Kalıp Değişimi (SMED), Poka-Yoke, Heijunka (Dengeleme), Andon (Gösterge), Toplam Verimli Bakım (TPM)	IoT, Otomatik Yönlendirmeli Araçlar (AGV), Dijital İkizler, Yapay Zekâ (AI), Büyük Veri Analitiği (Big Data), Sensörler.

Hedef Boyutlar	-Esneklik artışı -Kalite artırma -Maliyet düşürme -Teslim süresinin azaltılması -Verimlilik artışı	-Esneklik artışı -Kalite artırma -Maliyet düşürme -Teslim süresinin azaltılması -Verimlilik artışı
İyileştirme	Sürekli iyileştirme	Öngörücü iyileştirme
Veri	Fiziksel gözlem (git ve gör)	Gerçek zamanlı veri analizi, öngörücü tahmin

Kaynak: Agostinho ve Baldo (2021)

Tablo 1'e göre LP ve I4.0 arasındaki tek ortak nokta hedef boyutlardır. Buna bağlı olarak LP ve I4.0'ye göre beş seviyeye ayrılmış bir hedef boyutlar oluşturuldu.

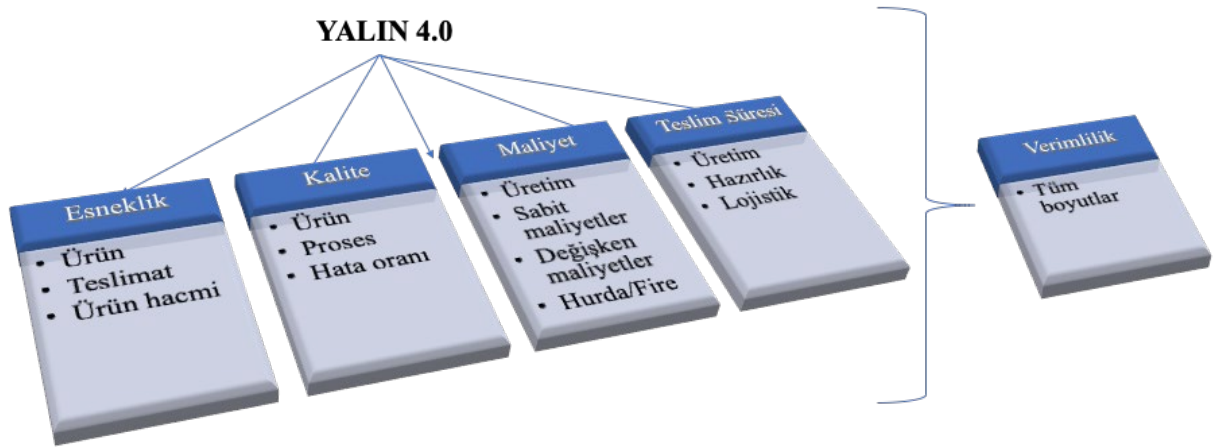
- **Esneklik Artışı:** Üretim proseslerinin esnek ve ekonomik olarak değişen koşullara uyarlanması.
- **Kalite Artırma:** Minimum hata ile ürün/proses kalitesinin artırılması.
- **Maliyet Düşürme:** Rekabet gücünü koruyarak üretim maliyetlerinin azaltılması.
- **Teslim Süresinin Azaltılması:** Gecikmelerin önlenerek üretim çevrim sürelerinin azaltılması, bunların toplamında teslim sürelerinin azaltılması.
- **Verimlilik Artışı:** Üretim süreçlerinin daha etkin hale getirilmesiyle daha az kaynak kullanarak daha fazla ürün üretilmesi.

Veriler incelendiğinde işletmede on adet Yalın 4.0 aracının kullanıldığı görülmüştür. Bunlar;

- Kanban + IoT:** Kanban, üretimde malzeme akışını ve stok yönetimini düzenlerken, IoT Kanban sistemini dijitalleştirerek stok seviyelerini gerçek zamanlı izleyip otomatik yenileme emirleri oluşturarak malzeme akışını optimize etmektedir.
- Kaizen + AGV:** Kaizen, sürekli iyileştirme felsefesidir. AGV'ler, üretim hattında malzeme taşıma süreçlerini otomatikleştirerek Kaizen uygulamalarında süreç iyileştirmelerine katkı sağlamaktadır.
- JIS + AGV:** JIS, ihtiyaç duyulan zamanda doğru miktarda malzeme ve ürün teslimini hedeflemektedir. AGV'ler, malzeme taşıma ve lojistik süreçlerinde zamanında teslimatı sağlayarak JIS uygulamasını destekler.
- DAH + Dijital İkizler:** DAH, üretim süreçlerindeki değer ve israfı analiz ederken, Dijital İkizler, üretim süreçlerinin sanal simülasyonlarını oluşturarak DAH için veri sağlayarak süreç iyileştirmeleri için senaryolar oluşturmaktadır.
- 5S + IoT:** 5S, iş yerinin düzenini ve verimliliğini artırmaktadır. IoT sensörleri, ekipman yerleşimlerini izleyerek ve düzenleme önerileri sunarak 5S uygulamalarını dijitalleştirmektedir.
- SMED + AI:** SMED, ayar sürelerini azaltmayı hedeflerken, yapay zekâ, üretim hattında ayar süreçlerini optimize ederek, en hızlı yöntemleri önerip SMED uygulamasına destek sağlamaktadır.
- Poka-Yoke + IoT:** Poka-Yoke, hataları önleme araçlarını ifade etmektedir. IoT sensörleri, hataları gerçek zamanlı olarak algılar ve düzeltici eylemleri otomatikleştirerek Poka-Yoke sistemlerini daha etkili hale getirmektedir.
- Heijunka + Büyük Veri Analitiği:** Heijunka, üretim seviyesini dengeleme yöntemidir. Büyük Veri Analitiği, talep dalgalanmalarını analiz edip üretim planlamasını optimize ederek Heijunka uygulamalarını daha hassas hale getirmektedir.

- i. **Andon + IoT:** Andon, üretim hattındaki sorunları görünür kılmaktadır. IoT, gerçek zamanlı veri aktarımıyla sorunların daha hızlı algılanmasını ve çözülmesini sağlar.
- j. **TPM + Sensörler:** TPM, ekipmanların çalışma durumunu analiz ederek arıza meydana gelmeden önce bakım yapılmasını sağlamaktadır. Sensörler, ekipmandan gerçek zamanlı olarak titreşim, sıcaklık, basınç ve toz durumu gibi veriler toplar. Toplanan veriler, IoT platformları ve analitik araçlarla işlenir, böylece sorunlar tahmin edilip önleyici bakım planlanmaktadır.

Çalışmanın yapıldığı üretim işletmesinde bu Yalın 4.0 yöntemleri üretim, bakım, kalite ve lojistik departmanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Verimlilik artışında Yalın 4.0 araçlarının en etkin olanının belirlenmesi için toplanan veriler, seçilen beş hedef boyuta göre alt boyutların oluşturulmasında kullanıldı. Bu verilere göre hedef boyutlar belirlendikten sonra alt boyutlar tematik içerik analizi yoluyla Yalın 4.0 ana teması altında Şekil 1’deki gibi gruplandırıldı.



Şekil 1: Tematik içerik analizi (MAXQDA-boyutlar-alt boyutlar)

Şekil 1, beş ayrı hedef boyutunda Yalın 4.0 kavramının içerik analizini göstermektedir. 5 hedef boyutun altında 13 alt boyut tespit edilmiştir.

3. Bulgular

Araştırma bulguları, LP prensipleri ile I4.0 teknolojilerinin entegrasyonunun üretim süreçlerinde önemli iyileştirmeler sağladığını göstermektedir. İçerik analizi ile ortaya çıkan boyut ve alt boyutların birlikte çalışması Yalın 4.0’ın etkinliği açısından önemlidir. Analiz edilen verilere göre, Yalın 4.0 ile on üç alt boyut arasında önemli bir korelasyon vardır. Frekans alt boyutların kod başına ne sıklıkla öne sürüldüğünü göstermektedir. MAXQDA 22’deki analiz sonuçlarına göre verimliliği artırmada Yalın 4.0’ın araçlarının frekans ve yüzdelik oranları şu şekildedir.

3.1. Esneklik

Veri analizi sonucunda esneklik hedef boyutunun 3 alt boyutu ve verimliliğini artırmada uygulanan Yalın 4.0’ın araçları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: *Hedef boyut ‘Esneklik’*

No	Alt boyut	Yalın 4.0 aracı	Frekans	Yüzde %
1	Ürün Esnekliği		12	20,69
1.1		Kanban+IoT	5	8,62
1.2		SMED+AI	3	5,17
1.3		Heijunka + Büyük Veri Analitiği	2	3,45
1.4		Andon+IoT	2	3,45
2	Teslimat Esnekliği		22	37,93
2.1		JIS+AGV	9	15,52
2.2		DAH+Dijital İkizler	9	15,52
2.3		Heijunka + Büyük Veri Analitiği	2	3,45
2.4		Andon+IoT	2	3,45
3	Ürün Hacmi		24	41,38
3.1		Kanban+IoT	7	12,07
3.2		Heijunka + Büyük Veri Analitiği	2	3,45
3.3		SMED+AI	4	6,90
3.4		TPM+Akıllı Sensörler	2	3,45
3.5		Poka-Yoke+IoT	6	10,34
3.6		Andon+IoT	3	5,17
	Toplam		58	100

Tablo 2, esneklik hedef boyutunu oluşturan alt boyutların frekans ve yüzde dağılımlarını sunmaktadır. “**Ürün hacmi**” alt boyutu en yüksek seviyede (%41,38) çıkmış olup Yalın 4.0’ın verimliliği artırmadaki en etkili aracı Kanban + IoT olarak bulunmuştur.

3.2. Kalite

Veri analizi sonucunda kalite hedef boyutunun 3 alt boyutu ve verimliliğini artırmada uygulanan Yalın 4.0’ın araçları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3: *Hedef boyut ‘Kalite’*

No	Alt boyut	Yalın 4.0 aracı	Frekans	Yüzde %
1	Ürün Kalitesi		35	28,93
1.1		Kaizen+AGV	8	6,61
1.2		Poka-Yoke+IoT	2	1,65
1.3		5S+IoT	5	4,13
1.4		SMED+AI	5	4,13
1.5		Andon+IoT	7	5,79
1.6		TPM+Akıllı Sensörler	8	6,61
2	Proses Kalitesi		38	31,40
2.1		Poka-Yoke+IoT	2	1,65
2.2		Kaizen+AGV	8	6,61
2.3		5S+IoT	5	4,13

Ülge TAŞ

2.4	TPM+Akıllı Sensörler	7	5,79
2.5	SMED+AI	4	3,31
2.6	Andon+IoT	6	4,96
2.7	Heijunka + Büyük Veri Analitiği	6	4,96
3	Hata Oram	48	39,67
3.1	Kanban+IoT	2	1,65
3.2	Kaizen+AGV	9	7,44
3.3	JIS+AGV	3	2,48
3.4	DAH+Dijital İkizler	4	3,31
3.5	5S+IoT	2	1,65
3.6	SMED+AI	2	1,65
3.7	Poka-Yoke+IoT	9	7,44
3.8	Heijunka + Büyük Veri Analitiği	3	2,48
3.9	Andon+IoT	8	6,61
3.10	TPM+Akıllı Sensörler	6	4,96
Toplam		121	100

Tablo 3, kalite hedef boyutunu oluşturan alt boyutların frekans ve yüzde dağılımlarını sunmaktadır. “**Hata oranı**” alt boyutu en yüksek seviyede (%39,67) çıkmış olup Yalın 4.0’ın verimliliği artırmadaki en etkili araçları Kaizen + AGV ve Poka-Yoke + IoT olarak bulunmuştur.

3.3. Maliyet

Veri analizi sonucunda maliyet hedef boyutunun 4 alt boyutu ve verimliliğini artırmada uygulanan Yalın 4.0’ın araçları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4: Hedef boyut ‘Maliyet’

No	Alt boyut	Yalın 4.0 aracı	Frekans	Yüzde %
1	Üretim Maliyetleri		34	30,09
1.1		Poka-Yoke+IoT	9	7,96
1.2		SMED+AI	4	3,54
1.3		TPM+Akıllı Sensörler	6	5,31
1.4		Kanban+IoT	8	7,08
1.5		5S+IoT	7	6,19
2	Sabit Maliyetler		28	24,78
2.1		Poka-Yoke+IoT	7	6,19
2.2		SMED+AI	2	1,77
2.3		TPM+Akıllı Sensörler	5	4,42
2.4		Kanban+IoT	8	7,08
2.5		5S+IoT	6	5,31
3	Değişken Maliyetler		24	21,24
3.1		Poka-Yoke+IoT	6	5,31
3.2		SMED+AI	2	1,77

3.3		TPM+Akıllı Sensörler	4	3,54
3.4		Kanban+IoT	7	6,19
3.5		5S+IoT	5	4,42
4	Hurda/Fire		27	23,89
4.1		Poka-Yoke+IoT	6	5,31
4.2		SMED+AI	3	2,65
4.3		Kanban+IoT	5	4,42
4.4		Heijunka + Büyük Veri Analitiği	7	6,19
4.5		TPM+Akıllı Sensörler	6	5,31
Toplam			113	100

Tablo 4, maliyet hedef boyutunu oluşturan alt boyutların frekans ve yüzde dağılımlarını sunmaktadır. “**Üretim Maliyetleri**” alt boyutu en yüksek seviyede (%30,09) çıkmış olup Yalın 4.0’ın verimliliği artırmadaki en etkili aracı Poka-Yoke + IoT olarak bulunmuştur.

3.4. Teslim Süresi

Veri analizi sonucunda teslim süresi hedef boyutunun 3 alt boyutu ve verimliliğini artırmada uygulanan Yalın 4.0’ın araçları Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5: Hedef boyut ‘Teslim Süresi’

No	Alt boyut	Yalın 4.0 aracı	Frekans	Yüzde %
1	Üretim Süresi		38	34,23
1.1		SMED+AI	8	7,21
1.2		Kanban+IoT	8	7,21
1.3		TPM+Akıllı Sensörler	5	4,50
1.4		Heijunka + Büyük Veri Analitiği	9	8,11
1.5		Kaizen+AGV	8	7,21
2	Hazırlık Süresi		33	29,73
2.1		SMED+AI	9	8,11
2.2		Kaizen+AGV	5	4,50
2.3		Poka-Yoke+IoT	5	4,50
2.4		Heijunka + Büyük Veri Analitiği	8	7,21
2.5		Kanban+IoT	6	5,41
3	Lojistik Süreler		40	36,04
3.1		Kanban+IoT	9	8,11
3.2		Kaizen+AGV	7	6,31
3.3		JIS+AGV	9	8,11
3.4		Heijunka + Büyük Veri Analitiği	6	5,41
3.5		DAH+Dijital İkizler	9	8,11
Toplam			111	100

Tablo 5, teslim süresi hedef boyutunu oluşturan alt boyutların frekans ve yüzde dağılımlarını sunmaktadır. “**Lojistik süreler**” alt boyutu en yüksek seviyede (%36,04) çıkmış olup Yalın 4.0’ın verimliliği artırmadaki en etkili araçları Kanban + IoT, JIS + AGV ve DAH + Dijital ikizler olarak bulunmuştur.

3.5. Verimlilik

Verimliliği artırmadaki en etkin Yalın 4.0 araçlarının bulunması için yapılan bu araştırmada verimlilik ile 13 alt boyut arasında önemli bir ilişki bulunmuştur. Bu alt boyutlar; ürün esnekliği, teslimat esnekliği, ürün hacmi, ürün kalitesi, proses kalitesi, hata oranı, üretim maliyetleri, sabit maliyetler, değişken maliyetler, hurda/fire, üretim süresi, hazırlık süresi ve lojistik süreleridir. Verimliliği artırmak için, tüm bu unsurlar birlikte çalışmalıdır. Bunlara bağlı olarak verimliliği artırmak için;

- Esneklik boyutunda verimlilik artışı için en önemli faktör ürün hacmi, Yalın 4.0 aracı ise Kanban + IoT'dur.
- Kalite boyutunda verimlilik artışı için en önemli faktör hata oranı, Yalın 4.0 araçları ise Kaizen + AGV ve Poka-Yoke + IoT'dur.
- Maliyet boyutunda verimlilik artışı için en önemli faktör üretim maliyetleri, Yalın 4.0 aracı ise Poka-Yoke + IoT'dur.
- Teslim süresi boyutunda verimlilik artışı için en önemli faktör hata oranı, Yalın 4.0 araçları ise Kanban+IoT, JIS+AGV ve DAH+Dijital ikizlerdir.

LP ve I4.0 paradigmalarının bir organizasyondaki rolünü analiz etmek ve geleceğe yönelik üretim sistemleri tasarlamak amacıyla; zaman, maliyet ve kalite gibi hedefler üzerindeki etkilerinin araştırılması kritik bir öneme sahiptir (Bick, 2014). Bu bağlamda çalışmanın sonuçları literatür ile uyumlu olarak ortaya çıkmıştır.

4. Sonuç

LP ile I4.0 entegrasyonunda verimliliği artıran en etkin Yalın 4.0 araçlarının tanımlanması amacıyla yapılan bu çalışma nitel araştırma varsayımı yorumlanmıştır. Araştırmada, tematik içerik analizi yöntemiyle çözümlenen veriler beş hedef boyut altında gruplandırılmış ve her bir boyutun alt boyutları olmak üzere toplamda on üç alt boyut elde edilmiştir.

Bu çalışma, LP prensipleri ile I4.0 teknolojilerinin entegrasyonunun üretim sistemleri üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde analiz etmektedir. Elde edilen bulgular, Yalın 4.0'ın üretim süreçlerinde esneklik, kalite, maliyet, teslim süreleri ve verimlilik hedeflerine ulaşmada güçlü bir araç olduğunu göstermektedir. Ancak, bu entegrasyonun etkinliği hedef boyutlara göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Analizler, Yalın 4.0 kapsamında 5 hedef boyutunun her birinin belirli alt boyutlarla desteklendiğini ortaya koymuştur. Araştırma bulgularına göre, LP ve I4.0 entegrasyonu, üretim süreçlerinde önemli iyileştirmeler sağlamak ve Yalın 4.0'ın etkili uygulanması için kritik çözüm yolları sunmaktadır.

Esneklik boyutunda, verimliliği artırma noktasında ürün hacmi faktörü %41,38 oranıyla en çok vurgulanan alt boyut olmuş ve bu hedefin gerçekleştirilmesinde Kanban + IoT araç kombinasyonu en etkili yöntem olarak ortaya konmuştur. Kalite boyutunda ise hata oranı %39,67, verimlilik artışında kritik bir faktör olarak öne çıkmış, Kaizen+AGV ve Poka-Yoke+IoT kombinasyonları bu bağlamda en etkili araçlar olarak belirlenmiştir. Maliyet boyutunda, üretim maliyetlerinin düşürülmesi %30,09 oranıyla öne çıkmış ve bu hedefe ulaşılmasında Poka-Yoke+IoT kombinasyonu önemli bir rol oynamıştır. Teslim süreleri boyutunda lojistik sürelerin %36,04 oranıyla en çok vurgulanan faktör olduğu gözlemlenmiş; Kanban+IoT, JIS+AGV ve DAH+Dijital İkizler gibi araçlar bu hedefi destekleyen çözümler olarak tanımlanmıştır. Buna bağlı olarak toplam verimliliği artırmadaki en etkili Yalın 4.0 araçları Kanban + IoT ve Poka-Yoke + IoT denilebilir.

Bu çalışmanın bulguları, literatürde LP ve I4.0 uygulamalarının birbirini tamamlayıcı nitelikte olduğunu vurgulayan çalışmalarla uyum içindedir. Bulgular, LP'nin uygulandığı ortamlarda I4.0 teknolojilerinin entegrasyonunun verimliliği artırdığını ve bu entegrasyonun 'Yalın 4.0' olarak tanımlanan bir sinerji yarattığını ortaya koymaktadır.

Araştırmanın genel bulguları, işletmelerin verimlilik artışında LP prensiplerini ve I4.0 teknolojilerini birleştiren Yalın 4.0'ın stratejik bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Esneklik, kalite, maliyet, teslim süreleri ve verimlilik boyutlarında çeşitli alt boyutların bir arada etkin bir şekilde çalışması, Yalın 4.0'ın genel performansını belirleyen temel bir etken olmuştur. Bu çalışma, hem akademik hem de endüstriyel açıdan Yalın 4.0'ın potansiyelini anlamak ve üretim süreçlerine entegre etmek için önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Yazar Katkı Oranı (Author Contributions): Ülge TAŞ (%100)

Yazarların Etik Sorumlulukları (Ethical Responsibilities of Authors): Bu çalışma bilimsel araştırma ve yayın etiği kurallarına uygun olarak hazırlanmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflicts of Interest): Çalışmadan kaynaklı çıkar çatışması bulunmamaktadır.

İntihal Denetimi (Plagiarism Checking): Bu çalışma intihal tarama programı kullanılarak intihal taramasından geçirilmiştir.

KAYNAKÇA

- Abele E., Metternich J. & Tisch M (2019). *Learning factories: Concepts, guidelines, best-practice examples*. Springer International Publishing, Cham, İsviçre.
- Agostinho Jr, V., & Baldo, C. R. (2021). “Assessment of the impact of Industry 4.0 on the skills of Lean professionals”. *Procedia Cirp*, 96: 225-229.
- Arey, D., Le, C. H., & Gao, J. (2021). “Lean industry 4.0: a digital value stream approach to process improvement”. *Procedia Manufacturing*, 54: 19-24.
- Bertagnolli F. (2018). *Lean management: einföhrung und vertiefung in die japanische management-philosophie*. Springer Gabler, Wiesbaden, Heidelberg, Almany.
- Bick W. (2014). “Produktionsmanagement warum Industrie 4.0 und Lean zwingend zusammengehören”. *Produktionsmanagement* 156 (11): 46–7.
- Büyükoçkan, G., Uztürk, D., & Ilıcak, Ö. (2020). Digitalization in Industry: IoT and Industry 4.0. In *Enabling Technologies for the Successful Deployment of Industry 4.0* (pp. 31-46). CRC Press, Baco Raton.
- Cachada A, Barbosa J, Leitño P, Gcraldcs CA, Deusdado L, Costa J, Romero L. (2018). Maintenance 4.0: Intelligent and predictive maintenance system architecture. In 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vol. 1, 139-146.
- Dillinger F., Formann F. & Reinhart G (2020). “Lean production und Industrie 4.0 in der produktion: Eine Studie zur Wechselwirkung und den gemeinsamen Potenzialen”. *ZWF* 115 (10): 738–41.
- Dombrowski, U., Richter, T., & Krenkel, P. (2017). “Interdependencies of Industrie 4.0 & lean production systems: A use cases analysis”. *Procedia Manufacturing*, 11: 1061-1068.
- Ejsmont K., Gladysz B., Corti D., Castaño F., Mohammed W.M. & Lastra J.L.M. (2020). “Towards “Lean Industry4.0” – Current trends and future perspectives”. *Cogent Bus. Manag.* 7, 1781995.
- Gröbner, M. (2007). *Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Just-in-time-, Just-in-sequence- und One-piece-flow-Fertigungskonzepten. Schlanker Materialfluss: mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Vieweg.
- Gürsoy, Ö. (2022). *Yalın üretimde endüstri 4.0 uygulaması: otomotiv yan sanayi örneği*. Efe Akademi Yayınları.
- Hambach J., Kümmel K. & Metternich J. (2017). “Development of a digital continuous improvement system for production”. *Procedia CIRP*, 63:330– 5.
- Huber W. (2016). *Industrie 4.0 in der Automobilproduktion: Ein Praxisbuch*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Kagermann H., Wahlster W. & Helbig J. (2013). “Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0”. *Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie*, 4(5), 1-9.
- Kolberg, D., & Zühlke, D. (2015). Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1870-1875.
- Liker, J. K. (2021). *Toyota Tarzı*. Optimist Yayın Grubu, İstanbul.
- Metternich J., Müller M., Meudt T. & Schaeede C. (2017). “Lean 4.0 – zwischen Widerspruch und Vision”. *ZWF* 112(5): 346–8.

- Meudt T., Metternich J. & Abele E. (2017). “Value stream mapping 4.0: Holistic examination of value stream and information logistics in production”. *CIRP Annals* 66(1):413–6.
- Miles, M. B. & Huberman, A. M. (1994). *Qualitative data analysis: an expanded sourcebook*. (2nd ed). Thousand Oaks, CA: Sage.
- Mrugalska B. & Wyrwicka M.K. (2017). “Towards Lean Production in Industry 4.0. *Procedia Engineering*, 182: 466–473.
- Ōno T. (2013). *Das Toyota-Produktionssystem: Das Standardwerk zur Lean Production*. 3rd ed. Campus-Verl., Frankfurt am Main, Almanya.
- Perico, P. & Mattioli, J. (2020). “Empowering process and control in lean 4.0 with artificial intelligence. In Proceedings of the 3rd International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I), Irvine, CA, USA, 21–23 September 2020; pp. 6–9.
- Prinz C., Kreggenfeld N. & Kuhlenkötter B. (2018). “Lean meets Industrie 4.0 – a practical approach to interlink the method world and cyber-physical World”. *Procedia Manufacturing* 23: 21–26.
- Rittberger S. & Schneider M. (2018). *Continuous Improvement of Lean Processes with Industry 4.0 technologies*. 11th International Doctoral Students Workshop on Logistics, Magdeburg, Germany (Vol. 9).
- Rosin F., Forget P., Lamouri S. & Pellerin R. (2020) “Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles”. *International Journal of Production Research*, 58(6): 1644–1661.
- Rüttimann B.G. & Stöckli MT (2016). “Lean and Industry 4.0—Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems”. *JSSM* 09(06), 485–500.
- Schuelke-Leech, B. A., & Barry, B. (2017). *Philosophical and methodological foundations of text data analytics*. In *Frontiers in Data Science* (pp. 147-169). CRC Press.
- Soba, M. ve Akar, E. (2021). Endüstri 4.0 uygulamalarının üretim süreçlerine etkisi. *Dumlupınar Üniversitesi İİBF Dergisi*, 4 (8): 116-129.
- Sony M. (2018). “Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions”. *Production & Manufacturing Research*, 6: 416–432.
- Tortorella GL. & Fettermann D. (2018). “Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies”. *International Journal of Production Research* 56(8): 2975–2987.
- Vita R.O. (2018). *Integration of Industry 4.0 and Lean Manufacturing and the Impact on Organizational Performance*. Universidade do Porto,.
- Wagner T., Herrmann C. & Thiede S. (2017). “Industry 4.0 impacts on Lean Production systems”. *Procedia CIRP* 63: 125–131.
- Womack, J.P. & Jones, D.T. (2016). *Yalın düşünce*. (O. Yamak, Çev.). İstanbul: Optimist Yayın.