

## Akıllı Fabrikalarda Çizelgeleme Yöntemlerinin Analizi

Rumeysa MANZAK<sup>1</sup>, Orhan ENGİN<sup>2</sup>

### ÖZET

**Amaç:** Bu çalışmanın amacı, Akıllı Fabrikalarda gerçekleştirilen çizelgeleme yöntemlerini incelemektir.

**Yöntem:** Bu çalışmada, veri kaynağı olarak, "Google Scholar" üzerinden ulaşılan metin türünde veriler kullanılmıştır. Veri Seti, 2015-2022 yılları arasında yayınlanmış olan ve 'Scheduling in Smart Factory' anahtar kelimesini içeren araştırma makalelerinden oluşmaktadır. Çalışma gerçekleştirilirken, 'Scheduling in Smart Factory' anahtar kelimesi ile doğrudan ilgili araştırmalar analiz edilmiştir.

**Bulgular:** Akıllı Fabrikalarda gerçekleştirilen çizelgeleme yöntemlerinin incelenmesi çalışmasında, çizelgeleme problemlerinin çözümünde, Genetik Algoritma, Çoklu Robot Önleyici Görev Çizelgelemesi, Parçacık Optimizasyonu, Ağlar Arası Birleştirme ve Çizelgeleme gibi birçok yöntemin kullanıldığı belirlenmiştir. Önerilen bu yöntemlerin performanslarını değerlendirmek için duyarlılık analizi, hata kurtarma analizi ve karşılaştırma analizi gibi metotlar tercih edilmiştir. Bu çalışmaları doğrulamak için deney çalışmaları yürütülmüştür.

**Özgünlük:** Çizelgeleme problemleri, hem geleneksel fabrikalarda, hemde akıllı fabrikalarda stratejik bir öneme sahiptir. Özellikle son yıllarda, çizelgeleme çalışmaları üzerine çok sayıda algoritma geliştirilmiştir. Bu çalışmada, 2015-2022 yılları arasında gerçekleştirilen bilimsel çalışmaları içeren özgün bir tarama sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı Fabrika, Akıllı Fabrikalarda Çizelgeleme, Endüstri 4.0.

**JEL Kodları:** D24, E23, L23, M11.

## Analysis of Scheduling Methods In Smart Factories

### ABSTRACT

**Purpose:** The objective of this study is to examine the scheduling methods implemented in Smart Factories.

**Methodology:** In this study, text-type data accessed through "Google Scholar" was used as a data source. The Data Set is consisting of articles published between 2015-2022 and contains the keyword 'Scheduling in Smart Factory'. While conducting the literature study, the keyword 'Scheduling in Smart Factory' was taken as a basis.

**Findings:** In the study of examining the scheduling methods carried out in Smart Factories, it was determined that many methods such as Genetic Algorithm, Multi-Robot Preventive Task Scheduling, Particle Optimization, Inter-Network Coupling and Scheduling were used in the solution of scheduling problems. Methods such as sensitivity analysis, error recovery analysis and comparison analysis were used to evaluate the performance of these proposed methods. Experimental studies were conducted to validate these studies.

**Originality:** Scheduling issues are of strategic importance in both traditional factories and smart factories. Especially in recent years, many algorithms have been developed for scheduling studies. In this study, an original survey study including scientific studies carried out between the years 2015-2022 is presented.

**Keywords:** Smart Factory, Scheduling in Smart Factory, Industry 4.0.

**JEL Codes:** D24, E23, L23, M11.

<sup>1</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, rumanzak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5319-1758.

<sup>2</sup> Prof. Dr., Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye, oengin@ktun.edu.tr, ORCID: 0000-0002-7250-0317 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

DOI: 10.51551/verimlilik.1136778

Derleme Makale / Review Article | Geliş Tarihi / Submitted Date: 28.06.2022 | Kabul Tarihi / Accepted Date: 11.07.2023

Atf: Manzak, R. ve Engin, O. (2023). "Akıllı Fabrikalarda Çizelgeleme Yöntemlerinin Analizi, *Verimlilik Dergisi*, 57(4), 761-774.

**EXTENDED ABSTRACT**

In today's destructive competitive environment, organizations have to meet the expectations of their customers on time and to realize high-quality, customized products and services at low cost. For this, they need automated production and service processes. Organizations use enabling technologies such as Cyber-Physical Systems, IoT, and cloud computing to increase the efficiency of their automated production processes. Production environments where these technologies are used are called smart factories. The aim of the smart factory is to increase the reuse of systematic processes and to improve the understanding of complex structures in production processes. The smart factory aims to build production-oriented Cyber-Physical Systems to implement the vertical integration of physical assets and information systems for the ultimate realization of highly flexible and self-adaptive production processes with machines and products that move both intelligently and autonomously. In smart factories, job scheduling is required to increase efficiency. The methods used in job scheduling processes in smart factories are different from the scheduling methods in the classical production environment. As far as we know, there has not been a detailed literature analysis on the analysis of scheduling methods in smart factories.

The objective of this research is to examine the scheduling methods implemented in Smart Factories. In this study, text-type data accessed through "Google Scholar" was used as a data source. The Data Set is consisting of articles published between 2015-2022 and contains the keyword 'Scheduling in Smart Factory'. When research was done on "Google Scholar" with the relevant keyword, 210 studies were identified. These studies were examined and 15 studies were identified and analyzed, suggesting detailed solutions for scheduling in smart factories. Among the studies, it has been determined that many approaches such as Artificial Intelligence Planners, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, and these, which have an important place in the literature, have been published in 2015 and later.

In the scheduling process in smart factories, decentralized and autonomous decision-making will be ensured, a flexible scheduling paradigm will come to the fore, holistic scheduling will be made, online, real-time, and reactive charts will be created, and scheduling will be possible under uncertainty and with missing data, different optimization methods in scheduling will be available. It is expected that there will be an opportunity for automatic, self-scheduling, as tradeoffs will be made for different purposes and machines will be proactive.

In this research, the concept of smart factories that emerged with the term Industry 4.0 and scheduling studies carried out in smart factories were examined. With Industry 4.0, the term smart factory, which was developed to increase productivity in production and facilitate instantaneous monitoring of production, the features of these factories, the technologies they contain and why they should be used are explained. This continuous development and improvement process, which started with Industry 4.0, has evolved to a completely different point with smart factories. In the production processes, errors in production have been reduced and the efficiency of production has been increased, as autonomous robots and machines equipped with AI technologies can communicate with each other and improve themselves by feeding on big data. Thanks to the virtual processes that will be created in the computer environment with smart factories, it is possible to foresee the problems that may arise. In this study, the differences between traditional factories and smart factories are also mentioned.

Before the transition to smart factories, it is recommended that organizations make their existing production processes lean by eliminating waste, then automated production and service processes, and equipping these processes with enabling digital technologies such as Cyber-Physical Systems, IoT and cloud computing. Techniques that will increase efficiency, such as job scheduling and other process improvement, must be used continuously in smart factories. In the coming years, it is expected that new methods for increasing efficiency in smart factories will be developed and more effective heuristic and metaheuristic methods related to dynamic scheduling will be proposed and used. Smart factories will increase efficiency in production and service processes, but continuous improvement activities will never end and efforts to increase productivity will continue in the next century.

There has not been enough research on scheduling processes in smart factories yet. More research on this subject is expected in the coming years.

## 1. GİRİŞ

Aşamalı küreselleşme, kitlesel özelleştirme ve rekabetçi iş ortamları ile geleneksel işletmelerin, günümüzün çalkantılı ekonomisinde, yeni iş zorluklarıyla karşı karşıya olduğu anlamına gelmektedir. Daha hızlı teslimat süreleri, daha verimli ve otomatikleştirilmiş süreçler, daha yüksek kalite ve özelleştirilmiş ürünlere yönelik talep, şirketleri Endüstri 4.0 olarak bilinen dördüncü sanayi devrimine doğru itmiştir (Zheng ve diğerleri, 2020). Endüstri 4.0 terimi, son birkaç yılda giderek daha önemli bir konu haline gelmiştir. Endüstri 4.0 kavramı ilk olarak Alman hükümeti tarafından, Kasım 2011'de yayınlanan ve 2020 için yüksek teknoloji stratejisine ilişkin bir girişimden kaynaklanan bir makalede ortaya çıkmıştır (Pereira ve Romero, 2017; Aydoğmuş ve Engin, 2021). Endüstri 4.0, imalat endüstrisindeki otomasyon teknolojilerinin mevcut trendini temsil etmekte ve esas olarak Siber-Fiziksel Sistemler (SFS), Nesnelerin İnterneti (Nİ) ve bulut bilişim gibi etkinleştirici teknolojileri içermektedir (Xu ve diğerleri, 2018). Endüstri 4.0'da gömülü sistemler, makineden makineye iletişim, Nİ ve SFS teknolojileri, sanal alanı, fiziksel dünyayla bütünleştirir; ayrıca, siber-fiziksel ortamda, üretimin karmaşıklığı ile başa çıkmak için akıllı fabrikalar gibi yeni nesil endüstriyel sistemleri ortaya çıkarmıştır (Xu ve diğerleri, 2018). Akıllı fabrikalarda, her yeni üretim siparişi alındığında veya fabrika durumunda değişiklik tespit edildiğinde, süreç planlama ve çizelgeleme yapılması gerekmektedir. Fabrikanın duyarlılığını ve karını hızla artırmak için yeni bir plan takviminin hızla belirlenmesi gerekir. Üretim süreci planlama ve çizelgelemenin eş zamanlı optimizasyonu, geleneksel yaklaşımlardan daha iyi sonuçlara yol açmaktadır (Zhao ve diğerleri, 2019).

Günümüzdeki yıkıcı rekabet ortamında, kuruluşlar, müşterilerin beklentilerini, tam zamanında karşılamak, yüksek kalitede, özelleştirilmiş ürün ve hizmeti, düşük maliyet ile gerçekleştirmek zorundadırlar. Bunun için de otomatikleştirilmiş üretim ve hizmet süreçlerine ihtiyaç duymaktadırlar. Kuruluşlar, otomatikleştirilmiş üretim süreçlerinin verimini artırmak için SFS, Nİ ve bulut bilişim gibi etkinleştirici teknolojileri kullanılmaktadırlar. Bu teknolojilerin kullanıldığı üretim ortamları, akıllı fabrikalar olarak nitelendirilmektedir. Akıllı fabrikalarda, verimi artırmak için iş çizelgeleme yapılması gerekmektedir. Akıllı fabrikalarda iş çizelgeleme süreçlerinde kullanılan yöntemler, klasik üretim ortamındaki çizelgeleme yöntemlerinden farklıdır. Bildiğimiz kadarı ile akıllı fabrikalarda çizelgeleme yöntemlerinin analizi ile ilgili detaylı bir literatür analizi yapılmamıştır.

Bu çalışmada, akıllı fabrikalar ile ilgili literatürde yapılan araştırmalar detaylı olarak analiz edilmiştir. Özellikle, 2015 yılından itibaren akıllı fabrikalarda çizelgeleme ile ilgili araştırmalar yapıldığı için veri seti olarak, 2015-2022 yılları arasında yayınlanmış olan ve 'Scheduling in Smart Factory' anahtar kelimesini içeren araştırma makaleleri incelenmiştir. Akıllı fabrikalarda verimi artırmak için son yıllarda literatürde önerilen yöntemler, bu araştırma ile ilk defa detaylı olarak analiz edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümde, akıllı fabrikalar ile ilgili bilgiler verilmiştir. Akıllı fabrikalardaki çizelgeleme çalışmaları, üçüncü bölümde detaylı bir şekilde sunulmuştur. İncelenen çalışmalar ile ilgili değerlendirme ve bulgular, dördüncü bölümde tartışılmıştır. Beşinci bölümde, araştırmada elde edilen sonuçlar ve çalışma ile ilgili öneriler sunulmuştur.

## 2. AKILLI FABRİKA

Akıllı fabrika, makinelerin, ekipmanların, ulaşım araçlarının, ürünlerin ve insanların birbirine bağlanmasını ve gerçek zamanlı olarak bilgi alışverişinde bulunmasını sağlayan bilgi ve iletişim teknolojisinin entegrasyonunu ifade eder (Rub ve Bahemia, 2019). Başka bir ifade ile akıllı fabrika, internet üzerinden, gerçek zamanlı olarak üretim tesisleriyle ilgili tüm bilgileri toplayan, bir üretim yöntemini bağımsız olarak değiştiren, hammaddeleri değiştiren ve nihayetinde optimize edilmiş bir dinamik üretim sistemi uygulayan, hiper bağlantılı, ağ tabanlı entegre bir üretim sistemidir (Shi ve diğerleri, 2020). Temel olarak Akıllı Fabrika, birbirleriyle akıllı iletişimin mümkün kılınması ve iş adımlarının birbiriyle otomatik olarak koordine edilebilmesi için yazılım aracılığıyla, makine ve sistemlerin ağ oluşturmasıyla ilgilidir (Hermann, 2018). Akıllı fabrikanın amacı, sistematik süreçlerin yeniden kullanımını artırmak ve üretim süreçlerindeki karmaşık yapıların anlaşılabilirliğini geliştirmektir. Akıllı fabrika hem akıllı hem de özerk hareket eden makineler ve ürünlerle son derece esnek ve kendi kendine uyarlanabilir üretim süreçlerinin nihai olarak gerçekleştirilebilmesi için fiziksel varlıkların ve bilgi sistemlerinin dikey entegrasyonunu uygulamak için üretim odaklı Siber Fiziksel Sistemler inşa etmeyi amaçlar (Shi ve diğerleri, 2020). Akıllı bir fabrika, dört akıllı özellikle karakterize edilir (Kalsoom ve diğerleri, 2020). Bunlar aşağıda sunulmuştur.

**Sensörler:** Sensörler, akıllı fabrikalarda veri izleme, toplama ve kaydetmek için kullanılır. En yaygın kablosuz sensör ağ türleri Radyo Frekans Tanımlama Teknolojisi (RFTT), ZigBee ve Bluetooth'tur (Chen ve diğerleri, 2017).

**Birlikte çalışabilirlik:** Akıllı fabrika, birlikte çalışabilirliğe ve İnternet'in gerçek zamanlı kontrolüne sahiptir. Cihazlar arasındaki ara bağlantı sayesinde cihazlar arasındaki koordinasyon geliştirilebilir ve üretim modülleri arasındaki konfigürasyon protokolleri daha esnek hale getirilebilir (Shi ve diğerleri, 2020).

**Entegrasyon:** Yapay Zekâ (YZ) ve robotlar, akıllı fabrikaların, süreçler arasında yüksek düzeyde entegrasyona sahip olmasını sağlar. YZ, insanın entelektüel yeteneklerinin entegrasyonu ile birlikte fabrikaların analiz ve karar verme faaliyetlerinin gerçekleştirilmesini sağlar (Kalsoom ve diğerleri, 2020).

**Sanal Gerçeklik (SG) teknikleri:** Sanal gerçeklik, sanal ortamlara erişim yoluyla insan duyuşsal algısını zenginleştiren bir dizi cihazı içerir. Bu öğeler, multimedya bilgisi sağlamak amacıyla görüşü (artırılmış gerçeklik gözlükleri), sesi (kulaklıklar) veya dokunmayı (eldivenler) artırmak için mobil cihazlara (akıllı telefonlar, tabletler veya PC'ler) veya diğer sensörlere eklenebilir. Sanal gerçeklik ile kurulum maliyetlerinin, hataların ve makine duruş süresinin azaltılması sağlanır. Ayrıca gerçek zamanlı bilgi alma ve sanal eğitim sağlama olasılığı nedeniyle üstün ürün kalitesi ortaya çıkar (Büchi ve diğerleri, 2020).

## 2.1. Akıllı Fabrika İçerisindeki Teknolojiler

**Nesnelerin İnterneti:** Nesnelerin İnterneti, akıllı fabrikanın temel özlerinden biridir. Nİ, basitçe internetin nesnelere entegrasyonu olarak tanımlanabilir. Nİ ağları, sensör ağları ve aktüatör ağları oluşturmak üzere bağlanan sensörler ve aktüatörler gibi gömülü cihazlardan oluşur. Nİ'nin fabrikaya entegrasyonu, akıllı üretim sürecini mümkün kılar. Akıllı üretim, akıllı cihazlar, makineler ve nesnelere arasında gerçek zamanlı veri paylaşımına ve etkileşime sahiptir. Akıllı fabrikada yaygın olarak kullanılan Nİ unsurları arasında Radyo frekansı ile tanımlama teknolojisi, akıllı etiketler, algılama teknolojileri, konum takibi, gerçek zamanlı aktüatörlerin kontrolü vb. bulunur. Nİ teknolojilerinin fabrika ortamında tam entegrasyonu, dördüncü endüstri devrimi olarak adlandırılır (Malik ve Kim, 2020). Nİ, nesnelere arasındaki ara bağlantı altyapısıdır. Nİ, imalat cihazları ile hizmet sağlayıcıları veya tüketicileri arasında veri alışverişi yapmasını sağlar. Teknik açıdan Nİ, RFTT, diğer iletişim cihazları (yani gömülü bilgisayarlar), Bulut Tabanlı İmalat (BTİ) uygulamaları, Kurumsal Kaynak Planlama (KKP) entegrasyonu ve iş zekâsı teknolojisi gibi sensörlerin bir kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Sensörler, araçlar ve ağır ekipman (vinçler, Otomatik Kılavuzlu Araçlar (OKA), yükleyiciler), makineler ve robotlar gibi fiziksel nesnelere yerleştirilmiştir (Mabkhot ve diğerleri, 2018).

**Siber Fiziksel Sistemler:** SFS, bilgisayar, iletişim ve fiziksel çevre ile etkileşime giren, bileşenler tarafından izlenen, koordine edilen, kontrol edilen ve entegre edilen, büyük ölçekli, birbirine bağlı, karmaşık heterojen ve ağ bağlantılı sistemlerdir. SFS, bilgi ve kaynakların aranabileceği, erişilebileceği, keşfedebileceği veya talep üzerinde geri yüklenebileceği, akıllıca analiz edilebileceği kablolu/kablosuz bir ağ üzerinden veri iletebilen ve alabilen gömülü sistemin güncellenmiş bir versiyonudur (Sinha ve Roy, 2020). SFS, bilgisayar ve fiziksel yetenekleri bütünleştiren yeni nesil sistemlerdir. Bilgi işlem gücü, iletişim teknolojileri ve kontrol mekanizmalarını kullanarak fiziksel dünyanın etkileşim ve genişleme yeteneklerini kullanarak geri bildirim döngülerine, üretim süreçlerini iyileştirmeye ve karar verme süreçlerinde insanların optimum desteğine izin verir. SFS, ilgili sensör teknolojisini kullanarak doğrudan fiziksel verileri alabilir ve bunları dijital sinyallere dönüştürebilir. Bu bilgileri paylaşabilir ve onu dijital ağlara bağlayan mevcut verilere erişebilir, böylece nesnelerin interneti oluşturabilirler. SFS, şüphesiz gömülü sistem ve sistemlerle gerçek zamanlı entegrasyondur. Bu tür bir entegrasyonda, bilgiye dayalı mühendislik sistemleri, YZ, mevcut kurulu sistemler gibi çok sayıda araç ve sistem bir araya getirilerek SFS adı verilen yeni bir sisteme dönüştürülür. SFS, üretimin tüm seviyelerinde, makinelerin, süreçlerin üretim ve lojistik ağlarına kadar farklı durumlarda iletişim ve etkileşimleri birbirine bağlayan, özerk ve işbirlikçi unsurlar ve alt sistemlerden oluşur (Hozdic, 2015). Akıllı üretim tesislerini kontrol etmek için bir üretim ortamında, Siber-Fiziksel Üretim Sistemleri (SFÜS) gereklidir. SFÜS'nin görevi, bireysel SFS'İ koordine etmek ve üretimdeki değişiklikleri kontrol etmektir (Hermann, 2018).

**Bulut Tabanlı İmalat:** Bulut Tabanlı İmalat, akıllı fabrikanın önemli bir bileşenidir. Bir bulut yaklaşımında, veriler veya hizmetler genellikle bir iç veya dış hizmet sağlayıcıya dışarıdan sağlanır. Bu tür hizmetlerin faturalandırılması her zaman kullanıma bağlıdır. Üç hizmet unsuru farklılaştırılabilir. Hizmet Olarak Altyapı (HOA), bir bulut sağlayıcı aracılığıyla, bilgi işlem, depolama ve ağ kapasitesinin sağlanmasıdır. Hizmet Olarak Platform (HOP) hizmet ögesi, kullanıcıya bir internet sağlayıcısı aracılığıyla teknik bir çerçeve biçiminde bir geliştirme ortamı sağlar. Bunlar, standartlaştırılmış ortamlardır. Sunulan ortamı uygulama ihtiyacını ortadan kaldırarak yazılım geliştirmeyi basitleştirir ve hızlandırır. Hizmet Olarak Yazılım (HOY), bir bulut aracılığıyla, standartlaştırılmış uygulama hizmetleri sağlar ve son kullanıcılar tarafından kullanılabilir (Hermann, 2018).

Yukarıdaki tanımlar, akıllı fabrika anlamında, üretimin, otomasyon olmadan gerçekleşmeyeceğini açıkça ortaya koymaktadır. Otomasyon, üretim süreçlerini hızlandırır ve optimize eder. Bu, üretim süreci fonksiyonlarının yapay sistemlere aktarılmasıyla yapılır. Otomatik makine, önceden tanımlanmış belirli

işlemleri otonom veya otomatik olarak yürüten bir makinedir. Otomasyonun derecesine göre kısmi veya tam otomasyon olarak adlandırılır. Akıllı fabrika alanında tam otomasyon gereklidir. Akıllı fabrikada farklı görevleri olan süreçler, esnek üretim sistemleri tarafından yürütülür (Hermann, 2018).

### 2.2. Sistem Mimarisi

Akıllı fabrikalar, fiziksel kaynak katmanı, endüstriyel ağ katmanı, bulut katmanı ve denetim katmanı olmak üzere dört somut katmandan oluşmaktadır (Wang ve diğerleri, 2015).

*Fiziksel Kaynak Katmanı:* Fiziksel kaynaklar, akıllı üretimin başarısının temelini temsil eden, üretimin tüm yaşam döngüsünde yer alan tüm üretim kaynaklarını içerir (Chen ve diğerleri, 2017). Bu kaynaklar, bir bütün olarak tüm atölye, atölyede yer alan makineler ve atölyede gerçekleştirilen tüm faaliyetlerdir (Osterrieder ve diğerleri, 2020). Bu akıllı eserler, endüstriyel ağ aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurabilir ve bunun ötesinde, sistem çapında bir hedefe ulaşmak için iş birliği yapabilirler. Örneğin, bir grup makine, bir ürünün gerektirdiği işlem sırasını işlemek için müzakere yoluyla belirlenir. Böylece akıllı yapılar, endüstriyel ağ ve akıllı iş birliği mekanizmasına dayalı, kendi kendini organize eden ve otonom bir üretim sistemi oluşturur (Wang ve diğerleri, 2015).

*Endüstriyel Ağ Katmanı:* Endüstriyel ağlar, field bus ve sensör ağları gibi çeşitli ağ teknolojilerinin entegrasyonunu temsil eder. Algılama ve kontrol ile karakterize edilen ağ katmanı, akıllı fabrikada önemli bir rol oynamaktadır (Chen ve diğerleri, 2017). Endüstriyel ağ katmanı, makinelerde yer alan sensörlerden gelen bilgileri, bulut katmanına veya tam tersi şeklinde bulut katmanında yer alan bilgileri, makinelere ileterek veri aktarım sürecini işletir. Yazılım hangi verilerin (veri türü ve çeşitliliği) ve hangi hızda (hız ve hacim) gönderildiğini/alındığını kontrol eder (Osterrieder ve diğerleri, 2020). Endüstriyel ağ katmanı, akıllı fabrikalarda, örneğin yeni eklenen makineler, makine arızası, OKA'lar ve ürünler gibi mobil varlıklardan kaynaklanan uçucu özellikleri göz önüne alındığında, Endüstriyel Ethernet gibi kablolu ağlardan üstündür (Wang ve diğerleri, 2015).

*Bulut Katmanı:* Bulut katmanı ile güçlü, esnek ve kullanılabilir depolama sağlanır. Dağıtılmış ve paralel veri işleme mimarisi, büyük ölçekli üretim verileri ve yüksek karmaşıklıkta bilgi işlem görevleri için etkili bir çözüm sağlar ve kaynakların sanallaştırılması, kaynakların bulut üzerinde akıllı yönetimini ve dağıtımını iyileştirir. Bu nedenle, YZ, algoritmalarının ve bulut bilişimin entegrasyonu, platformun veri işleme verimliliğini ve hizmet kalitesini etkin bir şekilde geliştirir (Wan ve diğerleri, 2018a). Bulut Katmanı, akıllı fabrikayı destekleyen bir diğer önemli altyapı türüdür. Bulut bilişim teknolojisi ile internet bile devasa bir kaynak havuzu olarak sanallaştırılabilir. Bu nedenle bulut katmanı, hem depolama alanı, hem de bilgi işlem yeteneğinin talep üzerine ölçeklenebilmesi anlamında büyük veri uygulaması için çok esnek bir çözüm sunar. Akıllı yapılar çalıştırıldığında, bilgi sistemlerinin işlemesi için Endüstriyel ağ katmanı aracılığıyla, buluta aktarılabilen devasa veriler üretebilir. Büyük veri analitiği, daha sonra denetim katmanı dahil olmak üzere sistem yönetimini ve optimizasyonunu destekleyebilir (Wang ve diğerleri, 2015).

*Denetim Katmanı:* Denetim Katmanı, insanları akıllı fabrikaya bağlar. Bilgisayar, tablet, cep telefonu gibi terminaller ile kişiler, bulutun sağladığı istatistiklere erişebilmekte, farklı bir konfigürasyon uygulayabilmekte veya internet üzerinden uzaktan dahi olsa bakım ve teşhis gerçekleştirebilmektedir (Wang ve diğerleri, 2015).

### 2.3. Akıllı Fabrika ve Geleneksel Fabrika

Akıllı fabrikalarda, aynı hatta, birkaç farklı ürün yapılabilirken, geleneksel fabrikalarda hat başına sadece bir ürün üretilir. Akıllı fabrikalarda, üretim ve kaynaklar önceden iyi tanımlanmıştır. Üretim hatları, yeni ürün tipine, hızlı ve otomatik olarak uyarlanırken, geleneksel fabrikalarda hatlar kolayca değiştirilemez. Akıllı fabrikalar, eksiksiz bağlantı ile karakterize edilir; bu, cihazların, ürünlerin ve insanların bilgi sistemleri aracılığıyla, birbirine bağlı ve etkileşimde olduğu anlamına gelir. Geleneksel fabrikalarda, cihazlar arasında iletişim gerekli değildir. Akıllı fabrika, belirli bir ağ üzerinde çalışır, geleneksel fabrikalarda ise cihazlar, bilgi sistemine merkezi bir şekilde bağlanır. Akıllı fabrikalar, kendi kendine organize olur ve büyük miktarda veri işler. Geleneksel fabrikalarda, her cihaz belirli bir hizmet için programlanır ve merkezi bir sistemde toplanan ve genellikle diğer cihazlar tarafından doğrudan erişilemeyen daha az miktarda veriyi işler (Resman ve diğerleri, 2021).

### 2.4. Akıllı Fabrika Kullanım Gereklilikleri

Nİ ve büyük veri kavramlarının varlığı, akıllı fabrikaya fayda sağlar. Bu kavramların kuruluşlara büyük değer sağlayan en yaygın kullanım durumları aşağıda sıralanmıştır (Illa ve Padhi, 2018).

*Tahmine Dayalı ve Önleyici Analiz:* Akıllı fabrikalarda, maliyetleri minimize etmek amacıyla tahmine dayalı analitik yöntemlerden yararlanılmıştır. Bu yöntem, makine arızası nedeniyle planlanmamış duruş sürelerini azaltmak için kullanılmaktadır. Fabrikalar, makine arızalarını önlemek için periyodik olarak



Önleyici Bakım (ÖB) gerçekleştirmektedir. Ancak, ÖB gerçekleştirilse bile makineler, zaman zaman arızalanabilmektedir. Tahmine Dayalı Analitik (TDA) yöntemi ile hedeflenen tahmine dayalı bakım gerçekleştirilebilir. Makineler, fabrikalarda, işlemlerini gerçekleştirirken tonlarca veri üretmektedir ve bu veriler, sıcaklık, basınç vb. gibi makine parametrelerini ve üst ve alt limitler vb. gibi süreç parametrelerini içerir. Nİ ile makine arızalarına yol açan nedenleri belirlemek için TDA yöntemi kullanılır. Bu yöntem ile yaklaşan arızalardan hemen önce alarmlar oluşturulur ve bu sayede, planlanmamış arıza süreleri azaltılarak, maliyetler minimize edilir.

*Kalite Yönetimi:* Hata analizi ve önleme çalışmaları, kalite yönetiminin özüdür. Nİ platformu, hammaddeler, proses parametreleri, operatör detayları vb. ile ilgili büyük hacimli verilerin çekilmesini sağlar. Üretim tesisleri çok sayıda veri ürettiğinden kaynaklı Nİ, hataları analiz eder ve nerelerde oluştuğunu belirlemeye çalışır. Bu sayede fabrikalarda, hatalar önceden önenebilir ve engellenebilir.

*Optimizasyon:* Fabrikalar, hammadde ve enerji olmak üzere iki temel girdi tüketir. Enerji kullanım maliyeti, ürün maliyet yapısının önemli bir bileşenidir. Özellikle proses üretimi aşamasında kullanılan girdilerin miktarını belirlemek zordur. Akıllı fabrikalarda, makinelere takılan sensörler ve göstergeler, kullanılan girdileri takip etmeyi sağlar ve Nİ platformuyla birlikte bağlayıcılar, sensörlerden gelen verileri çekebilir ve doğru tüketim eğilimi sağlamak için bu verileri analiz edebilir. Bu sayede, herhangi bir makinenin gereğinden fazla girdi tüketip tüketmediği doğru bir şekilde takip edebilir ve girdi tüketimini optimize edebilir. Bu sayede ürün üretme maliyetleri minimize edilebilir (Illa ve Padhi, 2018).

### 3. AKILLI FABRİKALARDA ÇİZELGELEME ÇALIŞMALARI

Endüstri 4.0 ile üretim alanında, tedarikçilerde, müşterilerde ve ortaklardan büyük miktarlarda veri elde edileceği için üretimde esneklik sağlanmış ve çizelgeleme etkinliği artırılmış olacaktır. Akıllı fabrikalarda çizelgeleme sürecinde, merkezi olmayan ve otonom karar verme sağlanacak, esnek çizelgeleme paradigması ön plana çıkmış olacak, bütünsel çizelgeleme yapılacak, çevrim içi, gerçek zamanlı ve reaktif çizelgeler oluşturulacak, belirsizlik altında ve eksik veriler ile çizelge yapma imkanı olacak, çizelgelemede farklı optimizasyon yöntemleri göz önüne alınarak farklı amaçlar için ödünleştirme yapılacak ve makineler proaktif olacağı için otomatik, kendi kendine çizelgeleme yapma fırsatının olması beklenmektedir (Parente ve diğerleri, 2020)

Bu bölümde, akıllı fabrikalarda gerçekleştirilen çizelgeleme çalışmaları incelenmiştir. Literatürde, 2015-2022 yılları arasında yapılan çalışmalar Yıl, Çalışmayı Yapan Yazar(lar) ve Çalışmanın Kısa Özeti başlıkları ile Tablo 1’de sunulmuştur. Literatür taraması, “Google Scholar” üzerinden yapılmıştır. Literatür çalışması gerçekleştirilirken “Scheduling in Smart Factory” anahtar kelimesi temel alınmıştır. “Google Scholar” üzerinde, ilgili anahtar kelime ile araştırma yapıldığında, 210 adet çalışma tespit edilmiştir. Bu çalışmalar incelenmiş ve akıllı fabrikalarda çizelgeleme ile ilgili detaylı çözüm öneren, 15 adet araştırma tespit edilmiş ve bunlar analiz edilmiştir. Çalışmalar arasında, yayın tarihi 2015 ve sonrasında olan ve literatürde önemli bir yere sahip, Yapay Zekâ Planlayıcılar, Genetik Algoritma, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ve bunlar gibi birçok yaklaşımın önerildiği belirlenmiştir.

Ivanov ve diğerleri (2015) çalışmalarında, işbirlikçi siber fiziksel sistemler temelindeki akıllı fabrikaların, endüstriyel ağların gelecekteki bir biçimini temsil ettiğini söylemişlerdir. Bu tür ağlardaki tedarik zincirleri, zamanla gelişen dinamik yapılara sahiptir. Bu ortamlarda, akıllı fabrikalarda, kısa vadeli tedarik zinciri planlaması, geçici makine yapıları, paralel makinelerde farklı işleme hızları ve dinamik iş gelişleri nedeniyle zorlanmaktadır. Çalışmalarında, akıllı fabrikalarda, Endüstri 4.0’da kısa vadeli tedarik zinciri çizelgeleme için dinamik bir model ve algoritma önermişlerdir. Ele alınan problemin özelliği, hem makine yapısı seçiminin hem de iş atamalarının aynı anda değerlendirilmesidir. Çizelgeleme yaklaşımı, işlerin yürütülmesinin dinamik, durağan olmayan bir yorumuna ve çizelgeleme probleminin zamansal bir ayrıştırmasına dayanmaktadır.

Shiue ve diğerleri (2018) çalışmalarında, Gerçek Zamanlı Çizelgeleme (GZÇ) sorunuyla ilgili önceki çalışmaları incelemiş ve sistemdeki çeşitli bölgeler için Çoklu Dağıtım Kuralı (ÇDK) stratejisi kullanmanın, üretim performansını Tek Dağıtım Kuralı (TDK) kullanmaktan daha büyük ölçüde artırabileceğinden bahsetmiştir. Çalışmalarında akıllı fabrikalarda GZÇ sistemine, ÇDK seçim mekanizması kullanılarak, Pekiştirmeli Öğrenme (PÖ) tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Yaklaşımları, atölye ortamındaki değişikliklere verimli bir şekilde yanıt vermiştir.

Wan ve diğerleri (2018b) çalışmalarında, akıllı fabrikada, yük dengeleme ve çizelgeleme optimizasyonu için akıllı sayaç ile nicel bir enerji bilinçli model oluşturmanın genel olarak mümkün olmadığından bahsetmişlerdir. Çalışmalarında akıllı fabrikada, sis düğümlerine dayalı bir Enerji Bilinçli Yük Dengeleme ve Çizelgeleme (EBYDÇ) yöntemi önerilmiştir. İlk olarak, sis düğümü üzerinde iş yükü ile ilgili bir enerji tüketim modeli kurulmuştur ve imalat kümesinin yük dengelemesini hedefleyen bir optimizasyon fonksiyonu formüle edilmiştir. Daha sonra, optimal bir çözüm elde etmek için geliştirilmiş

parçacık sürüsü optimizasyon algoritması kullanılmış ve görevleri gerçekleştirme önceliği, imalat kümesine doğru oluşturulmuştur. Son olarak, üretim kümesinin dağıtılmış çizelgelemesini elde etmek için çok etmenli sistemini tanıtmışlardır.

**Tablo 1. 2015-2022 Yılları arasında akıllı fabrikalarda çizelgeleme ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar**

<i>Çalışma</i>	<i>Çalışmanın Kısa Özeti</i>
Ivanov ve diğerleri (2015)	Akıllı fabrikalarda, Endüstri 4.0'da, kısa vadeli tedarik zinciri çizelgeleme için dinamik bir model ve algoritma önerilmiştir.
Shiue ve diğerleri (2018)	Akıllı fabrikalarda, Gerçek Zamanlı Çizelgeleme sistemine, ÇDK seçim mekanizması kullanılarak PÖ tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir.
Wan ve diğerleri (2018b)	Akıllı fabrikada, Sis düşümlerine dayalı bir Enerji Bilinçli Yük Dengeleme ve Çizelgeleme (EBYDÇ) yöntemi önerilmiştir.
Zhao ve diğerleri (2019)	Akıllı fabrikalarda, entegre süreç planlama ve çizelgelemenin, bulut tabanlı dağıtık optimizasyonu yaklaşımı önerilmiştir.
Lim ve diğerleri (2019)	Endüstri 4.0 kapsamındaki akıllı fabrika gereksinimlerini desteklemek için modülerlik ve hız gibi gereksinimleri karşılayacak bir ayrıştırma yaklaşımı önerilmiştir.
Wan ve diğerleri (2020)	Akıllı fabrikada çok kaynaklı üretim verilerinin, ağlar arası esnek iletimini ve ağ kaynaklarının optimize kullanımını gerçekleştirmek için yazılım tanımlı, ağ tabanlı, heterojen bir ağ mimarisi önerilmiştir.
Malik ve diğerleri (2020)	Akıllı bir fabrikada meydana gelebilecek sorunlar için VKBDVGYM olarak adlandırılan verimli ve kaynağa duyarlı bir çizelgeleme şemasına dayalı verimli bir görev yönetimi mekanizması önerilmiştir.
Xiao ve diğerleri (2021)	Akıllı bir fabrikada, görevleri kesintisiz ve verimli bir şekilde çalıştırmak için, bir Konteyner Tarafından Yönetilen Görev Kilitleme Kurtarma Mekanizması önerilmiştir.
Malik ve Kim (2021)	Akıllı bir fabrikada çıkabilecek sorunlara entegre çözümler bulmak için çizelgelemede öğrenmeye dayalı, verimli görev yönetimi mekanizması önerilmiştir.
Zhou ve diğerleri (2021a)	Akıllı fabrikalarda, düşük hacimli, yüksek karışımli siparişlerin, internet üzerinden çizelgelenmesi için yeni siber-fiziksel entegrasyon fikri önerilmiştir.
Kalempa ve diğerleri (2021)	Akıllı fabrikalarda, önleyici görev çizelgelemesine ilişkin, öncelik ilkelerini tanıtan ve görevler arasındaki bağımlılıkları dikkate alan ve hataları tolere eden Çok Robotlu Görev Tahsisi (ÇRGT) yaklaşımı önerilmiştir.
Zhou ve diğerleri (2021b)	Akıllı bir fabrikada, belirsizlik altında üretim işlerinin veriye dayalı dinamik zamanlaması için bileşik ödül işlevlerine sahip yeni bir YZ planlayıcı önerilmiştir.
Li ve diğerleri (2021)	Siber-fiziksel fabrikalarda, gerçek zamanlı planlama ve çizelgeleme elde etmek için "böl ve yönet" yaklaşımı olan Mekansal Zamansal Sıra Dışı Yürütme (MZSDY) yaklaşımı önerilmiştir.
Viagas ve diğerleri (2021)	Farklı derecelerde belirsizlik ve çeşitli verimlilik önlemleri ile bir atölyede çeşitli karar verme senaryoları modellenmişler ve gerçek zamanlı ve gelişmiş bilgilerin, Endüstri 4.0 bağlamında, avantajlı bir şekilde nasıl entegre edilebileceğini değerlendirmek için bir hesaplama deneyimi gerçekleştirmişlerdir.
Zhou ve diğerleri (2022)	Akıllı fabrikaya uygun bir sis hesaplama çerçevesi önerilmiş ve akıllı fabrika uygulamalarını otomatik olarak dağıtmak için Kubernetes kullanılmıştır. Sis hesaplamada, akıllı fabrikadaki görevleri planlamak ve tahsis etmek için GA'ya dayalı geliştirilmiş bir Aralık Bölmeli Genetik Çizelgeleme Algoritması (ABGÇA) önerilmiştir.

Zhao ve diğerleri (2019) çalışmalarında, akıllı fabrikalarda, her yeni üretim siparişi alındığında veya fabrika durumunda değişiklik tespit edildiğinde, süreç planlama ve çizelgeleme yapılması gerektiğinden bahsetmişlerdir. Bu çalışmada fabrikanın duyarlılığını ve kârını artırmak için yeni bir plan ve takvimin hızla belirlenmesi gerektiği anlatılmıştır. Üretim süreci planlama ve çizelgelemenin eş zamanlı optimizasyonu, geleneksel sıralı yaklaşımdan daha iyi sonuçlara yol açmaktadır. Ancak hesaplama açısından daha pahalıdır ve bu nedenle gerçek dünyadaki üretim senaryolarına uygulanması zordur. Bu

çalışmada akıllı fabrikalarda, entegre Süreç planlama ve çizelgelemenin, bulut tabanlı dağıtık optimizasyonu yaklaşımı önerilmiştir. Çoklu alt popülasyonlar üzerinde, çok amaçlı bir Genetik Algoritma (GA) yürütülmüştür. Popülasyon sayısı, mevcut optimizasyon durumuna göre otomatik olarak belirlenmiştir. Önerilen çözümün uygulanabilirliğini göstermek için iki üretim senaryosuna dayanan bir dizi test senaryosu kullanılmıştır.

Lim ve diğerleri (2019) çalışmalarında, tesis ve tedarik zinciri sorunları gibi çoğu çizelgeleme problemlerinde, kaynaklar ve operasyonlar arasındaki bağlantıların, yanal, sıralı yapıları nedeniyle genellikle sınırlandırıldığından bahsetmişlerdir. Otomatik yönlendirmeli araçlar ve iş atölyeleri ile karşılaştırıldığında, esnek bir üretim sistemi sorununun, doğal ağ yapısından kaynaklanan kombinatoryal doğa, ilgili işlerin, topolojik ve zamansal olarak iç içe geçmesine neden olur. Zamansal ve uzaysal ağ yapısı, geleneksel ayrıştırma yaklaşımlarının doğrudan uygulanmasını engeller. Bu çalışmada Endüstri 4.0 kapsamındaki akıllı fabrika gereksinimlerini desteklemek için modülerlik ve hız gibi gereksinimleri karşılayacak bir ayrıştırma yaklaşımı önerilmiştir. Temsilci metodolojisine uygun olarak, her iki temsilci arasında yalnızca gerekli bilgiler iletilmiştir ve bu yaklaşım farklı paydaşlar arasında yalnızca sınırlı bilgiler paylaşıldığı, gerçek endüstriyel ortamlarda uygulanmıştır.

Wan ve diğerleri (2020) çalışmalarında, Endüstri 4.0 bağlamında, gelişmiş üretim ekipmanlarının ve çeşitli sensörlerin kapsamlı dağıtım ve uygulanmasının, farklı cihazlar arasında veri alışverişi için artan bir talebe yol açtığından bahsetmişlerdir. Akıllı fabrikalarda, ağ iletimi, kablolu/kablosuz iletişimin çoklu protokol özelliklerine sahiptir ve farklı veri akışlarının, farklı gerçek zamanlı gereksinimleri vardır. Bu çalışmada, çok kaynaklı üretim verilerinin ağlar arası esnek iletimini ve ağ kaynaklarının optimize kullanımını gerçekleştirmek için yazılım tanımlı, ağ tabanlı heterojen bir ağ mimarisi önerilmiştir. Daha sonra, Ağlar Arası Birleştirme ve Çizelgeleme (AABÇ) mekanizması, yüksek dinamik özellikler ve veri akışlarının farklı gecikme gereksinimleri açısından analiz edilmiştir. Bu analize dayalı olarak, rotaya duyarlı bir veri akışı dinamik yeniden yapılandırma algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma, özellikle çok değişkenli ve küçük ölçekli akıllı üretim sistemleri için üretim verilerinin ağlar arası füzyonunun verimliliğini arttırmıştır. Ayrıca, farklı gecikme akışlarının bant genişliği gereksinimlerini karşılamak için gecikmeye duyarlı bir ağ bant genişliği planlama algoritması önerilmiştir. AABÇ mekanizmasının etkinliği, bir şeker paketleme akıllı üretim hattı prototip platformu kullanılarak doğrulanmıştır.

Malik ve Kim (2020) çalışmalarında, akıllı üretim olarak da bilinen akıllı fabrikaların, Endüstri 4.0 devrimi ile ortaya çıkan bir alan olduğunu söylemişlerdir. Tüm bu kavramların yardımıyla akıllı fabrika, üretim varlıklarını bütünleştirir ve endüstriyel ağları temsil eder. Bu çalışmada, akıllı bir fabrikada meydana gelebilecek sorunlar için Verimli ve Kaynak Bilincine Dayalı Verimli bir Görev Yönetimi (VKBDVGYM) mekanizması önerilmiştir. Etkin görev yönetimi için kullanılan çizelgeleme algoritması, Aracı İşbirliği Mekanizması (AİM) ve ilk önce Adil Acil Durum (AAD) çizelgeleme şeması olmak üzere iki çizelgeleme yaklaşımının melezidir. AİM, makine başına üretim maksimizasyonu hedeflerine odaklanan ve ayrıca akıllı fabrikada yer alan tüm makine ağlarının üretim hedeflerine dikkat eden merkezi olmayan bir çizelgeleme yaklaşımıdır. AAD zamanlama şeması, makine yuvalarını verimli bir şekilde kullanarak görevlerin aç kalma oranını en aza indirmeye ve makine kullanımını en üst düzeye çıkarmaya odaklanır. Önerilen hibrit mekanizma, görevlerin yürütülmesini verimli bir şekilde planlamayı, makinelerin kaynak kullanımını en üst düzeye çıkarmayı, üretkenliği en üst düzeye çıkarmayı, üretim gecikmelerini en aza indirmeyi, istisnaları verimli bir şekilde ele almayı ve akıllı fabrika aktörlerini verimli bir şekilde kontrol etmeyi amaçlamıştır.

Xiao ve diğerleri (2021) çalışmalarında, akıllı fabrikaların, teknolojinin, işin, ürünlerin ve endüstrinin derin bir entegrasyonu olduğunu söylemişlerdir. Ürünlerin Ar-Ge'si, fabrika bilgilerinin inşası, müşteri siparişleri ve tedarik zinciri verileri, üretim üzerinde hareket etmek için birleştirilir. Bu çalışmada, akıllı cihaz katmanı, iletişim protokolü katmanı, uç bilgi işlem katmanı, Nİ kontrol katmanı ve uygulama katmanı olmak üzere beş katmandan oluşan bir Hibrit Nesnelerin İnterneti (H-Nİ) platform çerçevesi önerilmiştir. İşlem Kontrolü için Nesne Bağlama ve Gömme, alınan cihaz verilerini uç sunucunun veri tabanına iletir. Edge sunucusu, veri temizleme gibi ön işlemleri gerçekleştirdikten sonra, cihaz verileri tek tip olarak toplanır ve Nİ katmanı aracılığıyla dağıtılır. Akıllı fabrikanın çeşitli alt sistemleri, gerekli kaynak verilerini Nİ aracılığıyla elde eder. Görevleri kesintisiz ve verimli bir şekilde çalıştırmak için, bir Konteyner Tarafından Yönetilen Görev Kilitlenme Kurtarma Mekanizması önerilmiştir. Uç Hiyerarşisi (UH) tasarlanmış, ardından bir görev geçişi çizelgeleme stratejisi önerilmiştir. Bu yöntem ile kısmi uç sunucuların rastgele çökmesi durumunda bile toplu veri iletimi ile üretimin güvenilirliği ve istikrarı sağlanmıştır.

Malik ve Kim (2021) çalışmalarında, tahmin mekanizmasının, akıllı bir fabrikada çok önemli olduğunu, çünkü geçmiş trendlerden edinilen bilgilere dayalı olarak ürün kalitesini ve müşteri deneyimini iyileştirmeye geniş çapta yardımcı olduğundan bahsetmiştir. Kim ve Malik'e göre üretim ve tüketici kalıplarını tahmin etmek için analitik araçlarının uygulanması hayati bir kuraldır. Bu çalışmada, akıllı bir fabrikada çıkabilecek sorunlara entegre çözümler bulmak için çizelgelemede, öğrenmeye dayalı verimli



görev yönetimi mekanizması önerilmiştir. Tahmin etmeyi öğrenme mekanizması, makine kaynaklarını verimli bir şekilde kullanmak için akıllı fabrikada yer alan makineler için makine kullanımını tahmin etmeyi amaçlar. Kullanılan tahmin algoritması Yapay Sinir Ağıdır (YSA) ve kullanılan tahmin etmeyi öğrenme algoritması Parçacık Sürüsü Optimizasyonudur (PSO). Önerilen görev yönetimi mekanizması, çoklu senaryo simülasyonları ve performans analizine dayalı olarak değerlendirilir. Karşılaştırma analizi, önerilen görev yönetim sisteminin makine kullanım oranını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve görev örneklerinin eksik oranını ve görevlerin boş kalma oranını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Zhou ve diğerleri (2021a) çalışmalarında, algılama ve iletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmelerin, büyük miktarda veri üreten ayrılmış üretim birimlerini birbirine bağladığını söylemiştir. Yeni kitlesel kişiselleştirme eğilimi, üretim çizelgelemesine daha yüksek düzeyde rahatsızlık ve belirsizlik getirir. Geleneksel üretim sistemleri, aşırı bağımlılık ve merkezi kontrolörler ve sınırlı iletişim kanalları için verimsiz ve güvenilir olmayan bilgisayar sisteminde verileri analiz eder ve siparişleri planlar. Nİ ve bulut teknolojileri, çoklu etmen sistemi gibi dağıtılmış bir üretim mimarisi oluşturmayı mümkün kılar. Son zamanlarda, YZ yöntemleri, üretim ortamındaki çizelgeleme sorunlarını çözmek için kullanılır. Ancak, çok çeşitli üretim birimlerine sahip dağıtılmış bir sistemde yüksek boyutlu verileri işlemek, çizelgeleme algoritmaları için zordur. Bu nedenle, bu çalışmada akıllı fabrikalarda düşük hacimli-yüksek karışımı siparişlerin internet üzerinden çizelgelenmesi için yeni siber-fiziksel entegrasyon fikri önerilmiştir. İlk olarak, üretim birimleri, Nİ teknolojileri tarafından, SFS aracılığıyla birbirleriyle bağlanmıştır. İşleme operasyonlarının nitelikleri kayıt altına alınmakta ve RFTT etiketleri ile iletilmektedir. İkinci olarak, gerçek zamanlı sensör verileriyle dinamik operasyonları planlamak için her bir birimde (örneğin depo, makine) yeni sinir ağlarına sahip YZ planlayıcı önerilmiştir. Her YZ planlayıcı, kendi planlama deneyimlerinden öğrenerek diğer planlayıcılarla işbirliği yapabilmektedir. Üçüncü olarak, PÖ dayalı birden fazla YZ planlayıcısının karar verme yeteneklerini geliştirmek için yeni ödül işlevleri tasarlanmıştır. Önerilen metodoloji, akıllı bir fabrikada değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarında, akıllı fabrikalarda yeni mimarinin yalnızca birden fazla YZ zamanlayıcısının öğrenme ve zamanlama verimliliği ile değil, aynı zamanda acele siparişler ve makine arızaları gibi beklenmedik olaylarla etkili bir şekilde ilgilendiği ortaya çıkmıştır.

Kalempa ve diğerleri (2021) çalışmalarında, otonom robotların kullanıldığı, akıllı fabrikalarda, verimliliği ve esnekliği artırmak için önleyici görev çizelgelemesine ilişkin öncelik ilkelerini tanıtan ve görevler arasındaki bağımlılıkları dikkate alan ve hataları tolere eden Çok Robotlu Görev Tahsisi (ÇRG T) yaklaşımını önermiştir. Yaklaşım, Hata Kurtarma ile Çoklu Robot Önleyici Görev Çizelgelemesi (ÇRÖGÇ) olarak adlandırılır. Her yeni olayda, yönetim için çalışan süreçler ve görevleri arasındaki etkileşimi göz önünde bulundurarak, boşta kalma ve gecikme olmaksızın daha alakalı görevlere öncelik verilmiştir. ÇRÖGÇ'nin değerlendirilmesi, Akıllı Depolarda, Artırılmış Gerçeklikten Gelişmiş Deneye Artırılmış Gerçeklik olarak adlandırılan küçük ölçekli depo lojistiğinde deney yoluyla gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın faydalarını göstermek için öncelik çizelgeleme, görev önleme ve hata kurtarma analizi sunulmuştur.

Zhou ve diğerleri (2021b) çalışmalarında, algılama ve bulut teknolojilerindeki hızlı gelişmelerin, üretim sistemini veri açısından zengin bir ortama dönüştürmekte olduğunu ve üretim planlamasını giderek daha karmaşık hale getirdiğini söylemişlerdir. Geleneksel çevrim dışı çizelgeleme yöntemleri, çeşitli tasarım özelliklerine sahip, düşük hacimli yüksek karma iş emirlerini işleme yeteneği açısından sınırlıdır. Simülasyona dayalı yöntemler, imalat işlerinin dağıtılmış çizelgeleme vaadini göstermektedir, ancak çoğunlukla tarihsel veriler ve empirik kurallarla statik bir şekilde uygulanmaktadır. Son zamanlarda, YZ algoritmaları, üretim ortamındaki dinamik çizelgeleme problemlerini çözmek için artan ilgiyi körüklemektedir. Bununla birlikte, akıllı üretim için birden fazla pratik amaç (örneğin, üretim süresini en aza indirmek, üretim maliyetlerini azaltmak, iş yüklerini dengelemek) düşünülürken üretim planlaması için yüksek boyutlu verileri kullanmak zordur. Bu nedenle, akıllı bir fabrikada belirsizlik altında üretim işlerinin veriye dayalı dinamik zamanlaması için bileşik ödül işlevlerine sahip yeni bir YZ planlayıcı önerilmiştir. İş emirlerinin, makinelerin ve malzeme taşıma sistemlerinin gerçek zamanlı durumlarını izlemek için akıllı fabrikada İnternet özellikli sensör ağları kurulmuştur. Girdi olarak yüksek boyutlu verileri almak ve ardından gerçek zamanlı karar verme için durum-eylem değerlerini öğrenmek için yeni bir üretim değeri ağı geliştirilmiştir. PÖ dayalı bileşik ödüller, YZ planlayıcısının üretim planlaması için gerçek zamanlı olarak birden çok hedefe ulaşmak için verimli bir şekilde öğrenmesine yardımcı olmuştur. Önerilen metodoloji, akıllı bir üretim ortamında deneysel çalışmalarla değerlendirilmiştir.

Li ve diğerleri (2021) çalışmalarında, SFS'lerin, Endüstri 4.0 akıllı üretiminin en umut verici yönlerinden biri olduğunu söylemişlerdir. SFS'de çeşitli öncü teknolojilerin uygulanması sayesinde, karar vericiler için gerçek zamanlı olarak bol miktarda üretim verisi ve bilgisi mevcuttur. Bununla birlikte, üretim optimizasyonunun doğal karmaşıklığı ve belirsizliği, bilim adamlarını ve uygulayıcılarını rahatsız etmekte ve akıllı üretimin daha fazla ilerlemesini engellemektedir. Üretim planlama ve çizelgeleme çok karmaşık ve stokastik bir problemdir. Karmaşıklık ve belirsizlik darboğazını kırmak için SFS'in güçlü yönlerinden

nasıl yararlanılacağı hala daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyan bir sorudur. Bu çalışmada siber-fiziksel fabrikalarda gerçek zamanlı planlama ve çizelgeleme elde etmek için yeni bir “böl ve yönet” yaklaşımı olan Mekansal Zamansal Sıra Dışı Yürütme (MZSDY) yaklaşımı önerilmiştir. MZSDY, bir fabrikanın mekân ve zaman kapsamalarını, karmaşıklığı azaltmak ve belirsizlikleri yerelleştirmek için sonlu alanlara ve aralıklara böler, böylece orijinal karmaşık optimizasyon problemi, farklı mekansal ve zamansal özelliklere sahip bir dizi alt probleme ayrıştırmıştır. Bu küçük boyutlu alt problemler, veri ve bilgi görünürlüğü ve izlenebilirliği kullanılarak birleştirilebilmekte ve daha sonra küresel bir çözüm üretmek için yuvarlanan bir mekansal-zamansal tarzda çözülebilmektedir. MZSDY'nin geleneksel stratejilere kıyasla iyi dengelenmiş ve daha istikrarlı bir performansa sahip olduğu bir deney çalışması ile gösterilmiştir. Mekansal ve zamansal ölçeklerin sonuçlar üzerindeki etkilerini incelemek için duyarlılık analizi yapılmıştır.

Viagas ve Framinan (2021) çalışmalarında, son zamanlarda üretim alanına getirilen teknolojik gelişmelerin (topluca Endüstri 4.0 olarak bilinir), bilgilerin gerçek zamanlı olarak entegrasyonunu sağlayarak atölyedeki karar verme süreçlerini iyileştirmek için büyük olanaklar sunduğunu söylemişlerdir. Bu süreçler arasında, verinin yoğun ve dinamik doğası göz önüne alındığında, çizelgeleme genellikle ana yararlanıcılardan biri olarak gösterilir. Ancak, Endüstri 4.0'ın son derece yüksek uygulama maliyetleri göz önüne alındığında, bu potansiyel faydaların doğru bir şekilde değerlendirilmesi gereklidir. Ayrıca karar verme sürecinde kullanılacak farklı yaklaşımlar ve çözüm prosedürlerinin yanı sıra çeşitli bilgi kaynakları olduğu da (yani yalnızca atölye durum verileri değil, aynı zamanda yukarı/aşağı akış süreçlerinden gelen veriler) dikkate alınmalıdır. Bu yüzden farklı derecelerde belirsizlik ve çeşitli verimlilik önlemleri ile bir atölyede çeşitli karar verme senaryoları modellenmiştir ve gerçek zamanlı ve gelişmiş bilgilerin Endüstri 4.0 bağlamında avantajlı bir şekilde nasıl entegre edilebileceğini değerlendirmek için bir hesaplama deneyimi gerçekleştirilmiştir. Kapsamlı hesaplama deneyleri, gerçek zamanlı, entegre atölye verileri ve ileri bilgi kullanmanın faydalarının, büyük ölçüde hem planlama yaklaşımının hem de çözüm prosedürlerinin doğru seçimine bağlı olduğunu ve bu kullanımın verimsiz olduğu senaryolar olduğunu göstermektedir.

Zhou ve diğerleri (2022) çalışmalarında, yeni nesil bilgi teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte birçok geleneksel fabrikanın akıllı fabrikalara dönüşmeye başladığını söylemişlerdir. Üretim verimliliğini artırmak için akıllı fabrikalarda büyük hacimli verilerin nasıl işleneceği ciddi bir sorundur. Akıllı fabrikanın özelliklerinden hareketle, akıllı fabrikaya uygun bir sis hesaplama çerçevesi önerilmiş ve akıllı fabrika uygulamalarını otomatik olarak dağıtmak için Kubernetes kullanılmıştır. İlk olarak, sis hesaplama olayında, akıllı fabrikadaki görevleri planlamak ve tahsis etmek için GA'ya dayalı geliştirilmiş bir Aralık Bölmeli Genetik Çizelgeleme Algoritması (ABGÇA) önerilmiştir. Bu çalışmada, görev yürütme süresi ve kaynak dengesinin optimizasyonu aynı anda ele alınarak ve ABGÇA ile birleştirilerek optimize edilmiş çizelgeleme kararı verilmiştir. İkinci olarak, bir bulut ve sis işbirliğine dayalı bilgi işlem mimarisi tasarlanmıştır. Bu senaryoda, ABGÇA'ya dayalı optimizasyon için Ceza faktörlü Aralık Bölmeli Genetik Çizelgeleme Algoritması (CFABGÇA) önerilmiştir.

#### 4. DEĞERLENDİRME ve BULGULAR

Akıllı fabrikalarda çizelgeleme konusunda, “Google Scholar” üzerinden “Scheduling in Smart Factory” anahtar kelimesi ile literatürde yapılan çalışmalar bir önceki bölümde detaylı olarak açıklanmıştır. Literatürde yapılan bu çalışmalardan elde edilen değerlendirme ve bulgular aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Akıllı fabrikalarda, her yeni sipariş alındığında veya fabrika süreçlerinde herhangi bir değişiklik meydana geldiğinde, çizelgelemenin tekrar yapılması ve güncellenmesi gerektiği,
- Çizelgeleme süreçlerinde, akıllı fabrikalarda, dağıtık optimizasyon, genetik algoritma ve hibrit mekanizmaların kullanıldığı,
- Çizelgelemede, akıllı fabrikalarda, çok temsilcili sistemler yardımı ile başarılı sonuçlar elde edildiği,
- Dinamik ağ tabanlı mimarilerin, akıllı fabrikalarda çizelgeleme süreçlerinde tercih edildiği,
- Akıllı fabrikalarda çizelgeleme sürecinde, teknolojinin, üretilen ürünlerin, kullanılan makinaların, akıllı cihazların, iletişim protokollerinin, nesnelerin interneti platformlarının entegrasyonunun, çizelgeleme performansı için oldukça önemli olduğu,
- Çizelgeleme sürecinde tahmin mekanizmasının önemli olduğu, tahmin için de yapay sinir ağları ve parçacık sürü optimizasyonu yöntemlerinin kullanıldığı,
- Akıllı fabrikalarda, büyük miktarlarda veri elde edildiğinden dolayı etkin bir çizelgeleme için bu verilerin analiz edilmesi gerektiği bunun için de yapay zekâ tekniklerine ihtiyaç duyulduğu,

- Akıllı fabrikalarda çizelgelemede, üretim süreçlerinde otonom robotların kullanıldığı durumlarda, çoklu robotlu görev tahsisi yaklaşımlarının kullanıldığı,
- Akıllı fabrikalarda dinamik bir ortam olduğu için çizelgelemede simülasyon ve yapay zekâ yaklaşımlarının tercih edildiği,
- Çizelgeleme süreçlerinin çok karmaşık ve stokastik olduğu; bu karmaşıklığı azaltmak için böl-yönet yaklaşımı önerildiği ve problemin bir dizi alt problemlere bölüp çözüm arandığı belirlenmiştir.

Akıllı fabrikalara geçiş ile beraber her zamankinden daha fazla veri elde etme imkânı olduğundan sağlam ve etkili çizelgeleme yapmak için sadece üretim alanının değil değer zincirinin tüm aşamalarının planlanması gerekir (Alemão ve diğerleri, 2021). Gelecek on yılda, akıllı fabrikalarda, imalatın dijitalleştiği, modelleme, optimizasyon ve simülasyon çalışmalarının ön plana çıktığı, malzeme süreç ve ürün olgusunun pekiştirildiği, kaynak paylaşımının etkin olduğu, ekipman izleme, teşhis ve onarım özzerkliğinin benimsendiği, standardizasyon ve iş birliğine geçildiği, siber güvenlik ve emniyetin esas olduğu bir ortamda çizelgeleme sürecinin anlık ve dinamik ortama uyumlu yapılması beklenmektedir (Kusiak, 2018).

### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu araştırmada, Endüstri 4.0 terimi ile ortaya çıkan akıllı fabrika kavramı ve akıllı fabrikalarda gerçekleştirilen çizelgeleme çalışmaları incelenmiştir. Endüstri 4.0 ile birlikte üretimde verimliliği arttırmak ve üretimin anlık olarak takip edilmesini kolaylaştırmak için geliştirilen akıllı fabrika terimi, bu fabrikaların özellikleri, içlerinde barındırdıkları teknolojiler ve neden kullanılmaları gerektiği açıklanmıştır. Endüstri 4.0 ile başlayan bu sürekli geliştirme ve iyileştirme süreci akıllı fabrikalar ile bambaşka bir noktaya evrilmiştir. Üretim süreçlerinde, YZ teknolojileri ile donatılan otonom robotlar ve makinelerin birbirleri ile iletişim kurabilmeleri ve büyük veriden beslenerek kendilerini geliştirebilmeleri sayesinde üretimde hatalar indirgenmiş ve üretimin verimliliği artırılmıştır. Akıllı fabrikalar ile bilgisayar ortamında oluşturulacak sanal süreçler sayesinde ortaya çıkabilecek sorunların öngörülmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada, ayrıca geleneksel fabrikalar ve akıllı fabrikalar arasındaki farklardan bahsedilmiştir. İşletmeler, karar verme süreçlerini kolaylaştırmak ve sınırlı kaynaklarını belirli amaçlar doğrultusunda belirli bir zaman aralığında işlere atanmasını sağlamak amacıyla çizelgeleme faaliyetleri yürütmektedir. Çalışmanın son bölümünde, akıllı fabrikalardaki çizelgeleme çalışmaları incelenmiştir. Bu çalışmalarda hangi amaçlar için ne tür algoritmaların kullanıldığı ve problemlerin çözüme kavuşturulması için ne gibi yöntemlerin geliştirildiğinden bahsedilmiştir. Bu problemlerin çözümünde, Genetik Algoritma, Çoklu Robot Önerici Görev Çizelgelemesi, Parçacık Optimizasyonu, Ağlar Arası Birleştirme ve Çizelgeleme gibi birçok yöntem incelenmiştir. Geliştirilen yöntemlerin etkilerini incelemek için duyarlılık analizi, hata kurtarma analizi ve karşılaştırma analizi gibi metotlar kullanılmıştır. Bu çalışmaları doğrulamak için deney çalışmaları yürütülmüştür. İncelenen bu araştırmalar doğrultusunda geliştirilen yöntemler, akıllı fabrikalardaki çizelgeleme performansının iyileştirilmesine katkıda bulunmuştur.

Akıllı fabrikalarda çizelgeleme süreçleri ile ilgili henüz yeteri kadar araştırma yapılamamıştır. Önümüzdeki yıllarda bu konuda daha fazla araştırma yapılması beklenmektedir. Akıllı fabrikalara geçiş sürecinden önce kuruluşların mevcut üretim süreçlerini, israflardan arındırarak yalın hale getirmeleri, verimli hale getirilmiş üretim ve hizmet süreçlerinin otomasyona geçirilmesi ve bu süreçlerin, SFS, Nİ ve bulut bilişim gibi etkinleştirici dijital teknolojileri ile donatılması önerilmektedir. Akıllı fabrikalarda, iş çizelgeleme ve diğer süreç iyileştirme gibi verim artışını sağlayacak tekniklerin sürekli kullanılması gerekmektedir. Önümüzdeki yıllarda, akıllı fabrikalarda verim artışı ile ilgili yeni yöntemlerin geliştirilmesi ve dinamik çizelgeleme ile ilgili daha etkin sezgisel ve metasezgisel yöntemlerin önerilerek kullanılması beklenmektedir. Akıllı fabrikalar, üretim ve hizmet sürecindeki verim artışını sağlayacak ama sürekli iyileştirme faaliyetleri hiçbir zaman son bulmayacak ve verimlilik artışı ile ilgili çabalar önümüzdeki yüzyılda da devam edecektir.

Gelecekte, akıllı fabrikalarda çizelgeleme problemlerinin yanında lojistik, kalite gibi farklı birimlere ait problemlere ve bu problemlerin çözümünde birden çok çözüm algoritmasının bir arada kullanıldığı çalışmalar araştırılacaktır.

### Yazar Katkıları / Author Contributions

*Rumeysa Manzak*: Literatür Taraması, Metodoloji, Veri Derleme, Analiz, Makale Yazımı-rijinal taslak  
*Orhan Engin*: Literatür Taraması, Makale Yazımı-inceleme ve düzenleme, Analiz  
*Rumeysa Manzak*: Literature Review, Methodology, Data Curation, Analysis, Writing-original draft  
*Orhan Engin*: Literature Review, Writing-review and editing, Analysis

### **Çatışma Beyanı / Conflict of Interest**

Yazarlar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.  
*No potential conflict of interest was declared by the authors.*

### **Fon Desteği / Funding**

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.  
*Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.*

### **Etik Standartlara Uygunluk / Compliance with Ethical Standards**

Yazarlar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.  
*It was declared by the authors that the tools and methods used in the study do not require the permission of the Ethics Committee.*

### **Etik Beyanı / Ethical Statement**

Yazarlar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.  
*It was declared by the authors that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.*



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmaları CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.  
*The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.*

## KAYNAKÇA

- Alemão, D., Rocha, A.D. ve Barata, J. (2021). "Smart Manufacturing Scheduling Approaches-Systematic Review and Future Directions", *Applied Science*, 11, 2186.
- Aydoğmuş, U., Engin, O. (2021). "Endüstri 4.0 Sürecinde Ağırlama Sektörüne Yönelik Uygulamaların İncelemesi", *İstanbul Aydın Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 13(3), 851-874.
- Büchi, G., Cugno, M., Castagnoli, R. (2020). "Smart Factory Performance and Industry 4.0", *Technological Forecasting and Social Change*, 150,1-10.
- Chen B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M. ve Yin, B. (2017). "Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges", *IEEE Access*, 6, 6505-6519.
- Hermann, F. (2018). "The Smart Factory and Its Risks", *Systems*, 6(38), 1-15.
- Hozdic, E. (2015). "Smart Factory for Industry 4.0: A Review", *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 7(1), 28-35.
- Illa, P.K. ve Padhi, N. (2018). "Practical Guide to Smart Factory Transition Using IoT, Big Data and Edge Analytics", *IEEE Access*, 6, 55162-55170.
- Ivanov, D., Sokolov, B.V., Werner, F. ve Dolgui, A. (2015). "A Dynamic Model and an Algorithm for Shortterm Supply Chain Scheduling in the Smart Factory Industry 4.0", *International Journal of Production Research*, 54(2), 386-402.
- Kalempa, V.C., Piardi, L., Limeira, M. ve Oliveira, A.S. (2021). "Multi-Robot Preemptive Task Scheduling with Fault Recovery: A Novel Approach to Automatic Logistics of Smart Factories", *Sensors*, 21, 01-26.
- Kalsoom T., Ramzan, N., Ahmed, S. ve Ur-Rehman, M. (2020). "Advances in Sensor Technologies in the Era of Smart Factory and Industry 4.0", *Sensors*, 20, 1-22.
- Kusiak A. (2018). "Smart Manufacturing", *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 508-517.
- Li, M., Zhong, R.Y., Qu, T. ve Huang, G.Q. (2021). "Spatial–Temporal Out-of-Order Execution for Advanced Planning and Scheduling in Cyber-Physical Factories", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33, 1355-1372.
- Lim, C.H., Moon, S.K. ve Okpoti, E.S. (2019). "A Reusable Scheduling Problem Decomposition Framework for Smart Factories", *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Macao, China, 516-520.
- Mabkhot, M.M., Al-Ahmari, A.M., Salah, B. ve Alkhalefah, H. (2018). "Requirements of the Smart Factory System: A Survey and Perspective", *Machines*, 6, 1-22.
- Malik, S. ve Kim, D. (2021). "Improved Control Scheduling Based on Learning to Prediction Mechanism for Efficient Machine Maintenance in Smart Factory", *Actuators*, 10(2), 1-17.
- Malik, S. ve Kim, D., (2020). "A Hybrid Scheduling Mechanism Based on Agent Cooperation Mechanism and Fair Emergency First in Smart Factory", *IEEE Access*, 8, 227064-227075.
- Osterrieder, P., Budde, L. ve Friedli, T. (2020). "The Smart Factory as a Key Construct of Industry 4.0: A Systematic Literature Review", *International Journal of Production Economics*, 107476.
- Parente, M., Figueira, G., Amorim, P. ve Marques, A. (2020). "Production Scheduling in the Context of Industry 4.0: Review ve Trends", *International Journal of Production Research*, 58(17), 5401-5431.
- Pereira, A.C. ve Romero, F. (2017). "A Review of the Meanings and the Implications of the Industry 4.0 Concept", *Procedia Manufacturing*, 13, 1206-1214.
- Resman, M., Turk, M. ve Herakovic, N. (2021). "Methodology for Planning Smart Factory", *8th CIRP Conference of Assembly Technology and Systems*, 29 September - 1 October 2020, Athens, Greece, 97, 401-406.
- Rub, J. ve Bahemia, H. (2019). "A Review of the Literature on Smart Factory Implementation", *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 17-19 June 2019, Valbonne Sophia-Antipolis, France, 1-9.
- Shi, Z., Xie, Y., Xue, W., Chen, Y., Fu, L. ve Xu, X. (2020). "Smart Factory in Industry 4.0", *System Research and Behavioral Science*, 37, 607-617.
- Shiue, Y.R., Lee, K.C. ve Su, C.T. (2018). "Real-time Scheduling for a Smart Factory Using a Reinforcement Learning Approach". *Computers & Industrial Engineering*, 125, 604-614.
- Sinha, D. ve Roy, R. (2020). "Reviewing Cyber-Physical System as a Part of Smart Factory in Industry 4.0", *IEEE Engineering Management Review*, 48(2), 103-117.
- Viagas, V.F ve Framinan, J.M. (2021). "Exploring the Benefits of Scheduling with Advanced and Real-time Information Integration in Industry 4.0: A Computational Study", *Journal of Information Integration*, 27, 1-11.



- Wan, J., Chen, B., Wang, S., Xia, M., Li, D. ve Liu, C. (2018b). "Fog Computing for Energy-Aware Load Balancing and Scheduling in Smart Factory", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14, 4548-4556.
- Wan, J., Yang, J., Wang, Z., Hua, Q., (2018a). "Artificial Intelligence for Cloud-Assisted Smart Factory", *IEEE Access*, 6, 55419-55430.
- Wan, J., Yang, J., Wnag, S., Li, D., Li, P. ve Xia, M. (2020). "Cross-Network Fusion and Scheduling for Heterogeneous Networks in Smart Factory", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(9), 6059-6068.
- Wang, S., Wan, J., Li, D. ve Zhang, C. (2015). "Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, 1-10.
- Xiao, R., Zhang, Y., Cui, X.H., Zhang, F. ve Wang, H.H. (2021). "A Hybrid Task Crash Recovery Solution for Edge Computing in IoT-Based Manufacturing", *IEEE Access*, 9, 106220-106231.
- Xu, L.D., Xu, E.L. ve Li, L. (2018). "Industry 4.0: State of the Art and Future Trends", *International Journal of Production Research*, 56, 2941-2962.
- Zhao, S., Dziurzanski, P., Przewozniczek, M., Komarnicki, M. ve Indrusiak, L.S. (2019). "Cloud-based Dynamic Distributed Optimisation of Integrated Process Planning and Scheduling in Smart Factories, GECCO'19: Genetic and Evolutionary Computation Conference", 13-17 July 2019, Prague Czech Republic, 1381-1389.
- Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A. ve Perona, M. (2020). "The Applications of Industry 4.0 Technologies in Manufacturing Context: A Systematic Literature Review", *International Journal of Production Research*, 59, 1922-1954.
- Zhou, M.T., Ren, T.F., Dai, Z.M. ve Feng, X.Y. (2022). "Task Scheduling and Resource Balancing of Fog Computing in Smart Factory", *Mobile Network and Applications*, 1-12.
- Zhou, T., Tang, D., Zhu, H. ve Wang, L. (2021b). "Reinforcement Learning with Composite Rewards for Production Scheduling in a Smart Factory", *IEEE Access*, 9, 752-766.
- Zhou, T., Tang, D., Zhu, H. ve Zhang, Z. (2021a). "Multi-Agent Reinforcement Learning for Online Scheduling in Smart Factories", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 72, 1-14.