

Sürdürülebilirlik Perspektifinden Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Tedarik Zinciri Yönetimi Fonksiyonları Üzerine Etkisi

İbrahim ÖZTÜRK^{İB}

Necmettin Erbakan Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 27.04.2024
Kabul Tarihi: 23.12.2024
Yayın Tarihi: 30.06.2025

Anahtar Kelimeler:
Sürdürülebilirlik,
endüstri 4.0,
tedarik zinciri yönetimi.

ÖZET

Bilgi teknolojisinin iş süreçlerinde performansı artırmadaki önemli rolü göz önünde bulundurarak, bu çalışma sürdürülebilirlik perspektifinden Endüstri 4.0 teknolojisi ve bununla ilişkilendirilen teknolojik ilerlemelerin Tedarik Zinciri yönetimi performansına olan potansiyel etkisini araştırmayı hedeflemektedir. Birçok şirket, artan iklim değişikliği etkilerine karşı operasyonel sürdürülebilirliği sağlamak, doğal kaynakları azaltmak ve çevresel konularda tüketici bilincini artırmak için Endüstri 4.0 teknolojilerini benimsemektedir. Akıllılık ve sürdürülebilirlik kavramlarının hazır olgunluk değerlendirmesi iç içe olmasına rağmen, hiçbir çalışma aynı anda bu kavramlara odaklanmamaktadır. Çalışmada, literatür taraması yaparak Sürdürülebilirlik perspektifinden Endüstri 4.0 teknolojisinin tedarik zinciri yönetiminin fonksiyonları üzerindeki etkisini araştırarak desteklenen operasyonel bir çerçeveye kavramsallaştırmaya ve geliştirmeye çalışılmaktadır. Konya'da faaliyet gösteren otomotiv sektöründe traktör, dizel motor ve elektrikli forklift üreten Tümosan fabrikasında üretim mühendislerle bir anket çalışması hazırlayarak çıkan sonuçlarının analizi yaparak doğrulanmaktadır. Çalışmada önceki bölümlerde sunulan literatür taramasının temel bilgileri alınarak, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimin olgunluk seviyesi incelenmiştir. Modelinin özellikle Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik kavramının üç temel boyutu olan sosyal, çevresel ve ekonomik boyutlarda tedarik zinciri yönetimi ile ne ölçüde entegre olduğunu ne kadar katkıda bulunduğunu, organizasyonel hedeflere ne kadar dahil edildiği ve performans ve olgunluk seviyesi hangi seviyeye geldiğini değerlendirmektedir. Böylece endüstri 4.0 teknolojilerin tedarik zinciri yönetimine adaptasyonunda sürekli AR-GE çalışmaları yaparak sürdürülebilirlik ve yenilik faaliyetlerini destekleyerek var olan durumları bir performans ve olgunluk yaklaşımı ile değerlendirilmesi, performans ve olgunluk ölçülmesi ve hedeflerin belirlenmesi gibi olumlu bir şekilde sonuçlanabilmektedir. Endüstri 4.0 teknolojileri ve sürdürülebilir tedarik zinciri olgunluk yaklaşımı modelinin fonksiyonlarını 12 adet teknoloji ve 10 adet sürdürülebilirlik fonksiyonunun üç ana boyut (sosyal, çevresel ve ekonomik) olarak tasarlanmaktadır.

The Effect of Industry 4.0 Technologies on Supply Chain Management Functions from A Sustainability Perspective

Article Info

Received: 27.04.2024
Accepted: 23.12.2024
Published: 30.06.2025

Keywords:
Sustainability,
industry 4.0,
supply chain management.

ABSTRACT

Considering the important role of information technology in improving performance in business processes, this study aims to investigate the potential impact of Industry 4.0 technology and associated technological advances on supply chain management performance from a sustainability perspective. Many companies are adopting Industry 4.0 technologies to ensure operational sustainability against increasing climate change effects, reduce natural resources and increase consumer awareness on environmental issues. Although the concepts of smartness and sustainability are intertwined in the maturity assessment, no study focuses on these concepts simultaneously. In the study, an operational framework is attempted to be conceptualized and developed by investigating the impact of Industry 4.0 technology on the functions of supply chain management from a sustainability perspective by conducting a literature review. A survey study is conducted with production engineers in the Tümosan factory in Konya, which produces tractors, diesel engines and electric forklifts in the automotive sector, and the results are analyzed and verified. The maturity level of sustainable supply chain management is examined by taking the basic information from the literature review presented in the previous sections. The model evaluates to what extent Industry 4.0 technologies are integrated with supply chain management in the three basic dimensions of the sustainability concept, namely social, environmental and economic dimensions, how much they contribute, how much they are included in organizational goals and what level of performance and maturity level they have reached. Thus, by continuously conducting Research and Development studies in the adaptation of Industry 4.0 technologies to supply chain management, by supporting sustainability and innovation activities, evaluating existing situations with a performance and maturity approach, measuring performance and maturity and determining targets can yield positive results. The functions of the industry 4.0 technologies and sustainable supply chain maturity approach model are designed as 12 technologies and 10 sustainability functions in three main dimensions (social, environmental and economic).

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Öztürk, İ. (2025). Sürdürülebilirlik perspektifinden endüstri 4.0 teknolojilerinin tedarik zinciri yönetimi fonksiyonları üzerine etkisi. *Fivezero*, 5(1), 59-80. <https://doi.org/10.54486/fivezero.2024.42>

*Sorumlu Yazar: İbrahim ÖZTÜRK, ibrahim.jbour@gmail.com



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

Her geçen gün Dünya kaynakları azalmakta ve üretim hacmi artmaktadır. Bununla beraber son yıllarda küresel rekabet artmakta ve tüketici taleplerindeki çeşitlilik fazlaşmaktadır. Tüm bu yaşanan gelişmeler tedarik zinciri süreçlerindeki karmaşayı beraberinde getirmektedir (Gabaçlı ve Uzunöz, 2017). Etkin tedarik süreçlerinde, gerçek zamanlı bilgi paylaşımı ve zincirdeki her adımın etkin koordinasyonu önemli rol oynamaktadır. Bu durum ise şirketlerin tedarik zinciri süreçlerinde daha akıllı ve sürdürülebilir paradigmlar kullanmasını gerekli kılmaktadır (Dev ve ark., 2020). Günümüzde, satın alma kararları, tedarikçi seçimi, üretim ve dağıtım süreçlerinin planlanması ve koordinasyonu, müşteri geri bildirimlerinin alınması ve taleplerine karşılık verilmesi, teslimat ve satış sonrası hizmetler vb. operasyonların sürdürülmesi, izlenmesi ve gerçek zamanlı takibi, dijital tedarik zincirlerine uyum sağlayarak gerçekleştirilmektedir (Ghadimi ve ark., 2018; Sahay ve Ranjan, 2008). Birçok endüstri, halihazırda e-business teknolojisini kullansa da operasyonel verimliliği arttırmak için yeni inovasyonlara ihtiyaç duyulmaktadır (Srinivasan ve Swink, 2015). Karmaşık ve sürekli değişen iş ortamı ile birlikte müşteri talepleri, kuruluşlarda esneklik ve hızlı yanıt verme ihtiyacını arttırmakta, bu ise dikkatleri ileri teknolojik yeniliklere çevirmektedir (Fatorachian ve Kazemi, 2021). Kuruluşlar; teknolojiyi, sürdürülebilir performans ile gelecekteki başarıyı sağlamak için güçlü bir stratejik silah olarak görüp hızla artan büyük ölçekteki verileri; kontrol edilebilir, akıllı ve sürdürülebilir tedarik zincirlerini desteklemek için kullanmaktadır (Jabbour ve ark., 2020; Barrientos ve ark., 2017). Bu hedef doğrultusunda, Endüstri 4.0 adı verilen dördüncü sanayi devrimi ile birlikte, teknolojik inovasyonları geliştirmek için otomasyon ve robotlaşma alanında büyük yatırımlar yapılmaktadır. Son yıllarda bilgi ve iletişim teknolojilerinin hızlı gelişimi ve tedarik zincirlerine entegrasyonu, dördüncü sanayi devrimi olan Endüstri 4.0'ın ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Ghadge ve ark., 2020). Endüstri 4.0'ın en belirgin etkisinin endüstriyel üretim ve yönetim; lojistik ve iş süreci alanlarında olması beklenmektedir (Strange ve Zucchella, 2017). Endüstri 4.0'ın başlangıcından bu yana üretkenliği ve performansı arttırmak için bu yeni sanayi devriminin ilke ve teknolojilerini benimseyen şirket sayısı giderek artmaktadır (Barreto vd., 2017). Bu bağlamda Endüstri 4.0 trendini takiben, tedarik zinciri ağlarında Endüstri 4.0 uygulamasına yönelik araştırmalara duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır (Akkara ve Kuriakose, 2023).

Çalışmanın ilk etapta hem Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetiminin 10 tane fonksiyonu kısaca bahsedildikten sonra Endüstri 4.0'ın 12 tane teknolojisinin tek tek küçük paragraflarla açıklanmıştır. Sonraki bölümde sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimin olgunluk seviyesi ölçülenebilmesi için uygulanan yöntemin metodoloji kısmında detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Konyada faaliyet gösteren Tümosan fabrikasında modelinin özellikle Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik kavramının üç temel boyutu olan sosyal, çevresel ve ekonomik boyutlarda tedarik zinciri yönetimi ile ne ölçüde entegre olduğunu, ne kadar katkıda bulunduğunu, organizasyonel hedeflere ne kadar dahil edildiği ve performans ve olgunluk seviyesi hangi seviyeye geldiğini değerlendirmek için üretim mühendisleri ile uygulamış olduğumuz anket çalışması yapılmıştır. Son olarak, makale, önerilen modelin önemini vurgulayarak ve gelecekteki araştırmalar için yollar önererek sona ermektedir.

ENDÜSTRİ 4.0 VE SÜRDÜRÜLEBİLİR TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ

Sürdürülebilir Tedarik Zinciri Yönetiminde Endüstri 4.0 teknolojileri katkısı ve bu 2 kavramı nasıl bütünleştiğine dair bilginin mevcut durumu bu bölümde incelenecektir. Endüstri 4.0 bağımsız değişken ve sürdürülebilirlik bağımlı değişken gibi düşünüp 3 boyuta göre sınıflandırılacaktır.

Literatürde birtakım çalışmalarda endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirliğin sosyal boyutuna olan katkısı incelenmektedir buna göre ilk olarak Endüstri 4.0 teknolojileri, çalışanların sağlığı ve güvenliği, iş yasalarına uygunluk, işyeri eşitliği ve sosyal sorumluluk gibi sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunabilir. Örnek olarak robotik teknolojileri kullanarak işletmeler, çalışanların güvenliğini

artırabilir ve tekrarlanan görevleri otomatikleştirerek çalışanların yaralanma riskini azaltabilir. Ayrıca, Endüstri 4.0 teknolojileri, işyerinde eşitliği sağlamak için işe alım ve terfi süreçlerinde insan ön yargısını azaltabilir. Böylece işletmeler, çalışanlarına daha adil ve güvenli bir çalışma ortamı sunarak, sürdürülebilir bir sosyal etki yaratabilirler. Çevresel boyutu Endüstri 4.0 teknolojileri, enerji ve kaynak verimliliği, atık azaltma ve çevre dostu üretim gibi sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için kullanılabilir. Endüstri 4.0 teknolojileri, üretim sürecindeki enerji kullanımını azaltarak çevreye olan etkiyi azaltabilir. Ayrıca, akıllı sensörler ve analitik araçlar sayesinde, üretim sürecindeki atık miktarı azaltılabilir ve atıkların geri dönüşümü kolaylaştırılabilir. Böylece, işletmeler, çevreye olan etkilerini azaltarak daha sürdürülebilir bir şekilde faaliyet gösterebilirler. Ekonomik boyut: Endüstri 4.0 teknolojileri, verimlilik artışı, maliyet tasarrufu ve yeni iş fırsatları sağlayarak sürdürülebilir ekonomik büyümeye katkıda bulunabilir. Örneğin, otomatik üretim hatları, üretim sürecinde verimlilik artışı sağlayarak işletmelerin daha az kaynakla daha fazla üretim yapmasına olanak tanır. Ayrıca, akıllı lojistik ve tedarik zinciri yönetimi sayesinde, ürünlerin taşıma süreci daha verimli hale getirilebilir ve nakliye sırasında oluşan atıklar azaltılabilir. Böylece işletmeler, maliyetleri düşürerek daha sürdürülebilir bir şekilde büyüyebilirler.

Endüstri 4.0, yapay zekâ, Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri analitiği ve robotik gibi ileri teknolojilerin üretim süreçlerine entegrasyonu ile karakterize edilen dördüncü sanayi devrimini ifade eder. Endüstri 4.0, işletmelerin çalışma şeklini değiştirerek daha fazla verimlilik, üretkenlik ve esneklik sağlamaktadır. Endüstri 4.0'ın önemli bir uygulaması, sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi alanındadır. Sürdürülebilir bir tedarik zinciri, bir ürün veya hizmetin ham maddelerin tedarik edilmesinden kullanım ömrü sonunda atılmasına veya geri dönüştürülmesine kadar tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel, sosyal ve ekonomik etkileri dikkate alan bir tedarik zinciridir. Endüstri 4.0 teknolojileri, daha bilinçli karar vermeyi sağlayan gerçek zamanlı veriler ve içgörüler sağlayarak işletmelerin tedarik zincirlerinde daha fazla sürdürülebilirlik elde etmelerine yardımcı olabilir. Örneğin IoT sensörleri, tedarik zinciri boyunca enerji ve kaynak tüketimini izlemek için kullanılabilir ve işletmelerin verimsizlikleri belirlemesine ve daha sürdürülebilir uygulamalar uygulamasına olanak tanır. Tedarik zinciri operasyonlarındaki eğilimleri ve kalıpları belirlemek için büyük veri analitiği kullanılabilir, bu da işletmelerin süreçlerini optimize etmesine ve israfı azaltmasına olanak tanır. Robotik otomasyon, işletmelerin üretim süreçlerinin çevresel etkisini azaltarak daha fazla sürdürülebilirlik elde etmelerine de yardımcı olabilir. Örneğin, robotik montaj hatları atıkları en aza indirecek ve tehlikeli kimyasalların kullanımını azaltacak şekilde tasarlanabilir. Özetle, Endüstri 4.0, işletmelerin daha fazla sürdürülebilirlik, verimlilik ve rekabet gücü elde etmelerini sağlayarak tedarik zinciri yönetimini dönüştürme potansiyeline sahiptir. İşletmeler, ileri teknolojilerden yararlanarak hem çevreye hem de topluma fayda sağlayan daha sürdürülebilir ve sorumlu tedarik zincirleri oluşturabilir.

TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİNİN FONKSİYONLARI

Tedarik zinciri yönetiminin fonksiyonları, mal ve hizmetlerin verimli ve etkin bir şekilde üretilmesini ve müşterilere teslim edilmesini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Tedarik zinciri yönetiminde yer alan çeşitli fonksiyonlar arasında planlama, kaynak bulma, üretim, lojistik, envanter yönetimi, tahmin, kalite kontrol, müşteri hizmetleri, risk yönetimi, sürdürülebilirlik ve performans ölçümü yer almaktadır. Bu fonksiyonların her biri, tedarik zincirinin sorunsuz bir şekilde işlenmesini ve şirketlerin maliyetlerini en aza indirirken ve israfı azaltırken müşterilerinin taleplerini karşılayabilmesini sağlamada hayati bir rol oynamaktadır.

Tedarikçi Yönetimi

Genellikle satın alma veya sözleşme faaliyetleri yoluyla dış kaynaklardan mal, hizmet veya yapım işi edinme fonksiyonudur. Tedarik zinciri yönetimi, mal veya hizmet ihtiyacını belirlemeyi, tedarikçileri

veya satıcıları seçmeyi, sözleşmeleri müzakere etmeyi ve satın alma sürecini baştan sona yönetmeyi içeren önemli bir fonksiyondur. Tedarik; hammaddeler, bileşenler, bitmiş ürünler, ekipman, yazılım, danışmanlık ve pazarlama gibi profesyonel hizmetleri içermekle birlikte çok çeşitli mal ve hizmetleri barındırmaktadır. Etkili satın alma uygulamaları, kuruluşların maliyetleri düşürmesine, kaliteyi artırmasına ve tedarikçi ilişkileriyle ilişkili riskleri azaltmasına yardımcı olabilir. Tedarikçi yönetimi, kuruluşun; kalite, teslimat ve fiyat ihtiyaçlarını karşıladıklarından emin olmak için tedarikçilerle iş birliği yapmasını gerektirmektedir. Tedarik, uzun vadeli ortaklıklar kurmak ve tedarik zincirinin verimli ve sorunsuz bir şekilde işlemesini temin etmek için tedarikçi ilişkilerinin yönetilmesini de içermektedir (Gündüz vd., 2021).

Satınalma Yönetimi

Satınalma yönetimi, bir organizasyonun mal ve hizmet ihtiyaçlarını karşılamak üzere dış kaynaklardan ürün veya hizmet satın almayı içeren bir süreçtir. Bu süreç, hizmet ve mal tedarikinden başlayarak tedarikçi seçimi, müzakere, sözleşme yönetimi ve sürekli performans değerlendirmesini içermektedir. Satınalma yönetimi genellikle bir şirketin rekabet avantajını sürdürmesine, maliyetleri optimize etmesine ve sürekli iyileştirmeye odaklanmaktadır. Satınalma yönetimi, şirketlerin rekabet avantajı kazanmalarına ve sürdürmelerine destek olan stratejik bir işlevdir. Maliyetleri düşürmek, kaliteyi artırmak, tedarik zinciri risklerini azaltmak ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemek amacıyla etkili bir şekilde uygulandığında, şirketler daha rekabetçi hale gelmektedir (Delke ve ark., 2023).

Sipariş Yönetimi

Sipariş yönetimi, bir organizasyonun müşteri taleplerini karşılamak üzere ürün veya hizmetleri tedarik etme, işleme ve teslim etme sürecini içeren bir yönetim sürecidir. Bu süreç, müşteri siparişi alındığı andan itibaren başlar ve siparişin müşteriye teslim edilmesine kadar devam eder. Müşteri siparişi vermeye başladığında, genellikle çevrimiçi mağazalar, satış temsilcileri veya diğer satış kanalları aracılığıyla alınmaktadır. Siparişin doğru ve eksiksiz alınması, müşteri memnuniyeti ve operasyonel verimlilik açısından kritiktir. Sipariş yönetimi, müşteri memnuniyetini sağlamak, stokları optimize etmek, lojistik süreçleri yönetmek ve işletme verimliliğini yükseltmek için önemli bir rol oynamaktadır. Teknolojik gelişmelerle beraber, otomasyon ve veri analitiği gibi araçlar, sipariş yönetimini daha etkili ve verimli hale getirmek için kullanılmaktadır (Hinrichsen ve ark., 2023).

Müşteri İlişkileri Yönetimi

Müşteri İlişkileri Yönetimi, bir organizasyonun alıcılarıyla etkileşimini planlama, uygulama ve izleme sürecini ifade eder. Temel amaç, müşteri memnuniyetini artırmak, müşteri sadakatini güçlendirmek ve uzun vadeli müşteri ilişkileri oluşturmaktır. Müşteri tanıma konusunda müşterilerin ihtiyaçları, tercihleri ve geçmiş etkileşimleri hakkında bilgi toplaması gibi sistemler kullanarak müşteri verilerini merkezi bir platformda toplaması tercih edilmektedir. Müşterilerle iletişimi güçlendirmek adına müşterilerle etkileşimde bulunma ve onlarla doğrudan iletişim kurması ve çeşitli kanalları kullanarak (telefon, e-posta, sosyal medya vs) müşterilere ulaşma sağlanmaktadır (Kevin ve Ana, 2019).

Depo/Envanter Yönetimi

Bir kuruluşun tedarik zinciri içindeki mal ve malzemelerin akışını denetleme ve kontrol etme sürecidir. Kuruluşun müşteri talebini karşılamak için elinde doğru miktarda envantere sahip olmasını sağlamak ve aynı zamanda fazla envanter tutmayla ilgili maliyetleri en aza indirmek için hammaddelerin, devam eden işlerin ve bitmiş ürünlerin envanter seviyelerini yönetmeyi içermektedir. Etkili envanter yönetimi, talep ve tedarik sürelerinin doğru tahmin edilmesini, verimli üretim planlaması

ve envanter seviyelerinin gerçek zamanlı takibini gerekmektedir. Ayrıca envanter seviyelerini izlemek ve stok tükenmesi, fazla stok veya eskimiş envanter gibi olası sorunları belirlemek için envanter sayımı, döngü sayımı ve envanter analizi gibi envanter kontrol önlemlerinin uygulanmasını bulunmaktadır. Etkili envanter yönetimi ile kuruluşlar, tedarik zinciri operasyonlarını optimize edebilir, envanterle ilgili maliyetleri azaltabilir, ürünlerin gerektiğinde kullanılabilir olmasını sağlayarak müşteri memnuniyetini artırabilir ve israfı ve fazla envanteri en aza indirmektedir (Singh ve Verma, 2018).

Taşıma

Operasyon yönetimi bağlamında taşıma, bir tedarik zinciri veya üretim ortamında malların, malzemelerin veya bilgilerin fiziksel manipülasyonu, nakliyesi ve yönetimi ile ilgili süreç ve prosedürleri kapsamaktadır. Etkin taşıma uygulamaları, operasyonel verimliliği optimize etmek, maliyetleri en aza indirmek ve tedarik zinciri yaşam döngüsü boyunca ürün kalitesi ve bütünlüğünü sağlamak için kritik öneme sahiptir (Pandikumar ve Manickavasagam, 2023). Buna malzeme taşıma, envanter yönetimi, paketleme ve nakliye lojistiği gibi faaliyetler dahildir. Üstelik taşıma, malların depolanması, taşınması ve dağıtımı için en verimli ve uygun maliyetli yöntemlerin belirlenmesinde yer alan stratejik planlama ve karar verme süreçlerini de kapsayacak şekilde salt fiziksel görevlerin ötesine geçmektedir. Başarılı taşıma stratejileri, ürün özellikleri, depo düzeni, ekipman kullanımı ve iş gücü eğitimi gibi faktörleri dikkate alan bütünsel bir yaklaşım gerektirmektedir. Ayrıca otomasyon, robot teknolojisi ve veri analitiği gibi gelişen teknolojilerin benimsenmesi, gelişen pazar dinamikleri ve müşteri taleplerine yanıt olarak daha fazla hassasiyet, ölçeklenebilirlik ve çeviklik sağlayarak işleme operasyonlarında devrim yaratma potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle, tedarik zinciri performanslarını optimize etmek ve günümüzün küresel pazarında rekabet avantajı kazanmak isteyen kuruluşlar için işleme ilkeleri ve en iyi uygulamalara ilişkin kapsamlı bir anlayış çok önemlidir (Kugler, Brandenburg, ve Limant, 2021).

Lojistik

Tedarik zinciri içerisinde malzemelerin ve malların bir alandan başka bir alana taşınması işlemidir. Doğru ulaşım modunu seçmeyi, lojistik faaliyetlerini koordine etmeyi ve malların varış noktasına zamanında, emniyetli ve uygun maliyetli bir şekilde teslim edilmesini sağlamayı içeren tedarik zinciri yönetiminde önemli bir fonksiyondur. Taşımacılık, tedarik zincirinin mesafe, hız ve maliyet ihtiyaçlarına bağlı olarak karayolu, demiryolu, deniz ve hava taşımacılığını içinde bulunduran çok çeşitli modları içermektedir. Etkili lojistik yönetimi, mal ve malzeme akışını optimize etmek için lojistik faaliyetlerini tedarik, depolama ve envanter yönetimi gibi diğer tedarik zinciri işlevleriyle koordine etmeyi kapsamaktadır. Bu, tedarik zincirinin ihtiyaçlarına göre en verimli lojistik modunu seçmeyi, nakliye ücretlerini müzakere etmeyi ve sevkiyatların gerçek zamanlı olarak takip edilmesini ve izlenmesini göstermektedir. Etkili lojistik yönetimi ile kuruluşlar, ürünlerin zamanında ve iyi durumda teslim edilmesini sağlayarak teslimat sürelerini iyileştirmektedir (Chinna, 2016).

Ambalajlama

Ambalaj, ürünlerin muhafaza edilmesi ve korunmasının yanı sıra ürünle ilgili bilgilerin tüketicilere iletilmesi amacına da hizmet etmektedir. Mallar için bir konteyner alanı bulmayı ve onları dış çevre koşullarından koruyacak şekilde sarmayı içermektedir. Ambalaj, ürünün görünürlüğü ve çekiciliğini artırmak için şeffaf kısımlar veya görünür bölgeler gibi ayırt edici özelliklere de sahip olmaktadır. Ek olarak paketleme yöntemleri, ürünleri emniyete almak ve taşımak için robot kollarının kullanılmasını ve bunların kap içinde doğru şekilde konumlandırılmasını sağlamayı ön görülmektedir. Paketleme işlemi aynı zamanda diğer cihazlarla ara bağlantıya izin veren bir paket gövdesi oluşturmak için bir alt tabaka üzerinde montaj bileşenleri ve ara bağlantı yapılarını da içermektedir. Genel olarak

ambalaj, çeşitli ürünlerin korunmasında, sunulmasında ve dağıtımının basitleştirmesinde çok mühim bir rol oynamaktadır (Delahaye ve ark., 2023).

Sigortalama

Sigortalama, modern ekonomilerde bireylere, işletmelere ve kuruluşlara çeşitli risklere ve belirsizliklere karşı koruma sağlayan hayati bir finansal araç olarak hizmet vermektedir. Sigorta, özünde, poliçe sahiplerinin belirli kayıplar veya beklenmedik durumlar durumunda tazminat vaadi karşılığında sigorta şirketlerine prim ödediği risk transferi ilkesine göre çalışmaktadır. Bu mekanizma yalnızca öngörülemeyen olayların mali etkisini azaltmakla kalmıyor, aynı zamanda geniş ve çeşitli poliçe sahipleri grubu arasında kaynakları bir havuzda toplayarak risk paylaşımını ve toplumsal dayanıklılığı da desteklemektedir. Sigorta ürünleri, hayat sigortası, sağlık sigortası, mülk ve kaza sigortası ve sorumluluk sigortası da dahil olmak üzere, farklı sektör ve sanayilerdeki belirli ihtiyaçlara ve risklere yönelik olarak tasarlanmış çok çeşitli teminat seçeneklerini kapsamaktadır. Ayrıca sigorta, potansiyel kayıplara karşı bir güvenlik ağı sağlayarak ekonomik istikrarın desteklenmesinde ve yatırımın kolaylaştırılmasında kritik bir rol oynamakta, dolayısıyla girişimciliği, yenilikçiliği ve uzun vadeli planlamayı teşvik etmektedir. Ancak sigortanın etkinliği, risk değerlendirmesinin doğruluğu, sigorta sağlayıcılarının ödeme gücü ve güvenilirliği ve sektörü yöneten düzenleyici çerçeve gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, sigorta piyasalarının gelişen dinamiklerini anlamak, risk yönetimi uygulamalarını geliştirmek ve hem kişiler hem de şirketler için sigorta kapsamının erişilebilirliğini ve karşılanabilirliğini sağlamak için sürekli araştırma ve analiz gereklidir (Lin, Cai, ve Xu, 2010).

Muayene ve Gümrükleme

Gümrükleme, çeşitli prosedür ve denetimleri içeren, malların gümrükten geçirilmesi sürecini ifade etmektedir (MacDougall ve MacDougall, 2022). Gümrüklemenin süresi ve karmaşıklığı, malın türü, gümrük rejimleri ve gümrük yetkililerinin etkinliği gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Müfettişler gümrüklemede, malların gümrük mevzuatına uygunluğunu sağlayarak ve gerekli kontrolleri yaparak önemli bir rol üstlenmektedir (Kim ve ark., 2023). Gümrüklemenin etkinliği, yük gümrük komplekslerinin sorunsuz işleyişi ve yüksek kalitede gümrük ve lojistik hizmetlerinin sağlanması açısından önemlidir. Bazı durumlarda gümrükleme, Gümrük Kanunu'nda belirtilmeyen ek prosedürleri de kapsayabilir ve bu da asıl işte harcanan süreyi etkilemektedir. Genel olarak gümrükleme, uluslararası ticarete etkin prosedürler ve çeşitli paydaşların koordinasyonunu gerektiren kritik bir süreçtir.

ENDÜSTRİ 4.0 TEKNOLOJİLERİ

Nesnelerinin interneti, otonom robotlar ve büyük veri gibi birçok dijital teknoloji ve bu teknolojiler üretimi yenilemeye ve temel üretim süreçlerinin dijitalleşmesinin gelişmesine destek olmaya devam ediyor. Bu teknolojiler, önde gelen şirketler tarafından operasyonel gelişim planlarını kolaylaştırmak için uygulanmıştır. Hızlı bir ivme oluşturmak ve stratejik bir vizyona ulaşmak için bu teknolojilerin şirketler tarafından uygulanması, hızlı geri dönüşler sağlamalı ve uygulanarak uzun vadeli kazanımlar sağlamalıdır. Birçok şirket, Endüstri 4.0 uygulamasının avantajlarından yararlandı. Bununla birlikte, Endüstri 4.0'dan değer yaratmanın yeni yolları hala araştırılmaktadır. Yeni metot ve teknikler keşfedildikçe bu yeni yaklaşımın yaratacağı değer artacaktır.

Otonom Robot

Robotlar, çağdaş imalat endüstrisinde ehemmiyetli bir rol üstlenmektedir. Endüstri 4.0'ın önemli bir yüzü, emniyet, esneklik, çok yönlülük ve iş birliğine odaklanarak görevleri doğru gerçekleştiren robotlar ile desteklenen otonom üretim yöntemleridir. Çalışma ortamını izole etmeyi gerektirmeden, insan çalışma alanlarına entegrasyonu daha ucuz ve üretken hale getiren ve endüstrilerde birçok olası

uygulama oluşturmaktadır (Bahrin ve ark., 2016). Sanayi devrimini basitleştirmek için en gelişmiş teknolojik yeniliklerle daha çok endüstriyel robot gelişmektedir. Akıllı robotlar, sadece çalışma alanlarındaki yapılandırılmış işlerde insanların yerini almakla sonuçlanmayacaktır. Endüstri 4.0'da robotlar ve insanlar, görevleri birbirine bağlamak ve akıllı sensör insan-makine arayüzlerini işletmek için ekip gibi çalışacaklardır. Robotların işletilmesi farklı işlevleri barındıracak şekilde büyümektedir: üretim, lojistik ve ofis yönetimi uzaktan kontrol altına almaktadır. Bir problem durumunda işçi cep telefonuna bir web kamerasına bağlı bir mesaj alır, böylece problemi fark edebilir ve üretimin ertesi günün devamlılığı için talimatlar verebilir. Böylece fabrika 24 saat çalışabilir, işçiler ise sadece gündüzleri orada bulunmaktadır (Blanchet, 2014).

Simülasyon

Simülasyon, gerçek dünyada var olan bir fiziksel sistemin verilerini sanal bir ortama aktararak gerçek sistemin özelliklerinin izlenmesi için bir altyapı oluşturan bir modelleme tekniğidir. Süreçlerin gelişimini izlenebilir hale getirebildiği için zaman, maliyet ve risk açısından avantajlar sağlamaktadır (Çelen, 2017). Karmaşık ve akıllı üretim sistemlerinin tasarımı ve operasyonlarının yanı sıra karar vermeyi optimize etmek için planlama ve keşif modelleri geliştirmek, önemli bir teknolojidir. Ayrıca şirketlerin riskleri, maliyetleri, uygulama engellerini, operasyonel performans üzerindeki etkisini ve Endüstri 4.0'a yönelik yol haritasını değerlendirmelerine yardımcı olabilir. Bu alanda çeşitli ilerlemeler kaydedilmesine rağmen, Endüstri 4.0'da simülasyon tabanlı araştırmaların gelişimini sistematik olarak karakterize eden ve analiz eden çalışmalar azdır. (Ferreira ve ark., 2020).

Yatay ve Dikey Entegrasyon

Yatay Entegrasyon

Yatay entegrasyon, benzer müşteri tipine sahip farklı şirketlerin birleşmesidir. Bu birleşmenin temel amacı, aynı müşteri tipine hitap eden bu şirketlerin pazar payını artırmaktır. Yatay entegrasyon genellikle genç girişimciler tarafından tercih edilmektedir. Bunun nedeni piyasada müşteri profillerinin henüz oluşmamış olmasıdır. Bu tür bir entegrasyon, rekabetin çok yüksek olması ve ürün eskime oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Ar-Ge faaliyetlerine önem verilerek belirsizlikleri azaltmak, rekabet güçlerini ve piyasa değerlerini artırmak amacıyla firmalar yatay entegrasyon sistemine dahil edilmektedir (Yelis, 2021). Şirketin performansı, sahip olduğu sinerji seviyesinde yatmaktadır, bu nedenle ürünün yaratılması, geliştirilmesi ve imalatı ile idaresi ile ilgili önemli unsurlar olarak düşünülmelidir; dikey entegrasyon veya dahili entegrasyon haritalaması, yardımları için önemli alanları farklı bir şekilde belirlemek için sistemi değerlendirmektir (Lara ve ark., 2020).

Dikey Entegrasyon

Dikey entegrasyon, aynı sektördeki ancak farklı alt sektörlerdeki müşterileri olan şirketlerin birleşmesidir. Üç tür vardır: geriye doğru dikey entegrasyon, ileri dikey entegrasyon ve dengeli dikey entegrasyon. Girdi kaynaklarının birleştirilmesine geriye dönük entegrasyon denir. İşletmeyi ürettiği malları kullananlara bir adım daha yaklaştıran genişlemeye ileri entegrasyon denir. Daha çok satış ve dağıtım kanallarını kontrol etmeyi amaçlar. Dengeli entegrasyon tipinde şirketler hem girdi kaynakları hem de pazarlama kısmı için birleştirir. Bu tür birleşme diğerlerine göre daha azdır. Dikey entegrasyon sistemine bir örnek, araba üreten bir şirketin tekerlek üreten bir şirketle birleşmesidir (Yelis, 2021). Akıllı bir üretim sisteminin gerçekleştirilmesini engelleyen üretim sistemlerinin farklı düzeylerinden gelen stratejik ve operasyonel hedefler arasında karmaşık bir ilişki vardır. Stratejik planlama için hedeflenecek bir üretim sisteminin özelliklerini belirlemek için kullanılır; operasyonel hedef olarak standartlaştırılmış teknikleri ve çevik bir senaryoyu kullanmaktadır (Lara ve ark., 2020).

Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin İnterneti ifadesi ilk olarak 1999'da Ashton tarafından kullanılmıştır (Barreto ve ark., 2017). Genel olarak, Nesnelerin İnterneti, fabrika ekipmanı ve arabalardan mobil cihazlara ve akıllı saatlere kadar bir İnternet ağına bağlanabilen herhangi bir nesneyi içermektedir. Ancak bugün, IoT (Internet of Things) daha spesifik olarak sensörler, yazılımlar ve diğer şeylerden veri iletmelerine ve almalarına izin veren diğer teknolojilerle donatılmış bağlantılı şeyler anlamına gelmektedir. Geleneksel halinde, bağlantı, esas olarak Wi-Fi aracılığıyla sağlanırken, günümüzde 5G ve diğer ağ platformları, büyük veri kümelerini hız ve güvenilirlikle giderek daha fazla işleyebilmektedir.

Siber Güvenlik

Siber alan, bilgisayar bilimi, matematik, ekonomi, hukuk, psikoloji ve mühendisliğin çok disiplinli bir birleşimidir. Yalnızca çevrimiçi cihazların birbirine bağlanması değil, insanların bu cihazlardan nasıl etkilendiğini ve nasıl etkilendiğini de kapsamaktadır. Bu nedenle, siber alan, milyonlarca eve güç sağlayan elektrikten her gün milyonlarca insanı hareket ettiren ulaşım ağına kadar modern yaşamın her yönünü etkiler. Bağlı cihazların sayısı ve kullanımları arttıkça, siber altyapının karmaşıklığı ve savunmasız cihazların sayısı katlanarak artmaktadır (Dawson ve Thomson, 2018). Nesneler bağlandığında, daha fazla risk seviyesi oluşturacaklar. IoT cihazlarının bazıları çok büyük siber risklere sahip olduğundan ve sonuç olarak, güvenliği ihlal edilmiş cihazdaki güvenlik etkileri tesise veya ekipmana zarar vereceğinden ve üretim için aksama süresine neden olacağından, ekipmanın feci şekilde arızalanmasına ve hatta aşırı durumlarda, can kaybına neden olur (Clim, 2019). Siber güvenlik, sistemleri, ağları ve programları dijital saldırılardan koruma uygulamasıdır. Bu siber saldırılar genellikle hassas bilgilere erişmeyi, bunları değiştirmeyi veya yok etmeyi, kullanıcılardan zorla para almayı veya normal iş süreçlerini kesintiye uğratmayı amaçlamaktadır (Halvorsen, 2021).

Bulut Bilişim

Bulut Bilişim, büyük miktarda verinin depolanmasını sağlar. Bu kapasite, makinelerin ve sensörlerin bir kişiden daha fazla veri ürettiği ve bu tür verilerin her zaman bağlantılı olduğu düşünüldüğünde, tüm üretim süreci boyunca üretilen verileri depolamak için esas olarak önemlidir. Ölçeklenebilir bir yapı sayesinde bulut, talep üzerine kaynakların tüketilmesine izin verir. Sunucular, lisanslar satın almaktan ve bakım için uzman personel istihdam etmekten kaçındığı için maliyetleri düşürmenin yanı sıra enerji tasarrufu sağlar. Ayrıca platform ve bağlantı cihazlarından bağımsız olarak farklı coğrafi noktalardan ve farklı programlardan depolamaya erişim kolaylığı sağlar. Tüm bunlar, üretim ekosistemlerinin oluşturulmasını kolaylaştırır ve müşteriler ile tedarikçiler arasındaki iş birliğini teşvik eder. Özellikle müşteri, üretim sürecinin tüm aşamalarına katılabilmekte ve bu sayede memnuniyetleri artırılmaktadır (Velasquez, Estevez, ve Pesado, 2018).

Katmanlı Üretim

Katmanlı üretim veya eklemeli imalat denir. 1987 yılında başlayan Ultra Viole ışığına duyarlı polimerlerin lazer ile katman katman kurlenmesi, birkaç yıl sonra büyük çapta bir endüstri haline gelmiştir. Katmanlı üretim modeli, özel yazılım programları ile katmanlara dilimlendikten sonra 3B yazıcı aracılığı ile tabandan başlayarak katman katman fiziksel bir modele dönüştürülmektedir. Üretilmesi mümkün olmayan ya da zor olan parçalar bu sayede kısa zamanda kolaylıkla üretilmektedir. Katmanlı üretim sayesinde, zaman tasarruf ile beraber tasarımda çok büyük bir esneklik sağlanmaktadır (Kahraman, 2021). Yaklaşan Endüstri 4.0 döneminde akıllı üretim için büyük fırsatlar sunmaktadır. Ek olarak, eklemeli imalat, metaller, seramikler ve polimerler dahil olmak üzere çok çeşitli malzemelerin imalatına uygun, çok yönlü, esnek ve son derece özelleştirilebilir üretim tekniklerinden sınıflandırılmaktadır (Liu ve ark., 2022). Katmanlı üretim, üç boyutlu Bilgisayar Destekli Tasarım (3D

CAD) modeline dayalı olarak, malzemeyi birleştirerek fiziksel bir nesne oluşturmaya izin veren bir süreçtir (Pajonk ve ark., 2022).

Artırılmış Gerçeklik

Artırılmış gerçeklik (AR), dijital görsel öğeler, ses veya teknoloji aracılığıyla sağlanan diğer duyuşsal uyarıların kullanımıyla elde edilen gerçek fiziksel dünyanın geliştirilmiş bir versiyonudur. Özellikle mobil bilgi işlem ve iş uygulamalarıyla uğraşan şirketler arasında büyüyen bir trend olmuştur. Kişinin deneyimini geliştirmek için görsel, işitsel veya diğer duyuşsal bilgilerin dünya üzerine bindirilmesini içerir. Şirketler ürünleri veya hizmetleri tanıtmak, yeni pazarlama kampanyaları başlatmak ve benzersiz kullanıcı verileri toplamak için artırılmış gerçekliği kullanılmaktadır (Hayes, 2020).

Büyük Veri ve Analitik (BDA)

Endüstri 4.0 teknolojileri yeni başlaması ile birlikte, bilgi teknolojisi üretim sistemleriyle entegrasyonunu hızlandırdı ve şirketlerinin sahip olduğu veri hacmi, çeşitliliği ve hız özellikleriyle giderek daha zengin hale gelmiştir (Wang ve ark., 2021). Endüstriyel büyük veri, firmalarının sistemdeki iç ve dış çevre değişikliklerini doğru algılamasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda üretim sürecini optimize etmek, maliyetleri düşürmek ve operasyonel verimliliği artırmak için bilimsel analiz ve karar vermeyi kolaylaştırır. Büyük verilerle, sosyal kalkınmayı ve ekonomik büyümeyi güçlendirmek için kitlesel özelleştirme ve hassas pazarlama gibi beklentilerden yeni iş modları oluşturulmaktadır (Leng ve ark., 2021).

Yapay Zekâ

Yapay Zekâ (AI), insan zekasını simüle etmek ve yaygın gerçek dünya sorunlarını çözmek için sistemler ve makineler kullanır. Makine öğrenimi ve derin öğrenme, insan müdahalesine dayanmadan sonuçları daha doğru tahmin etmek için algoritmalar kullanan yapay zeka teknolojileridir (Saranya ve Subhashini, 2023). Yapay zekâ sistemleri, büyük miktarda veriyi analiz etmek ve yorumlamak, kalıpları tanımak, kararlar almak ve sorunları çözmek için tasarlanmıştır. Deneyimlerden öğrenebilirler ve yeni girdilere uyum sağlayabilmektedir, bu da zaman içinde performanslarını iyileştirmelerine olanak tanımaktadır.

SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK BOYUTLARI

Sosyal Sürdürülebilirlik

Son birkaç on yılda, sosyal sürdürülebilirlik, tüm dünyada kentsel politikayı, konutları ve şehir planlamasını giderek daha fazla etkilemektedir. Özellikle son yıllarda, sosyal sürdürülebilirlik, sürdürülebilir kalkınmanın temel bir bileşeni olarak artan bir ilgi görmüştür. Bununla birlikte, 2000 yılında bir Avrupa Konseyi (AK) toplantısında sürdürülebilir kalkınmanın üçüncü ayağı olarak ilk kez tanıtılmasından bu yana neredeyse bir buçuk on yıl geçmesine rağmen, sosyal sürdürülebilirlik hala sürdürülebilir kalkınma gündemindeki yerini bulmak için mücadele etmektedir. 2000 yılından bu yana, sürdürülebilir kalkınmanın sosyal boyutuna çevresel ve ekonomik boyutlara kıyasla nispeten daha az önem verilmektedir (Burton, 2000). Bu, sosyal sürdürülebilirliği neyin oluşturduğuna ve nasıl elde edilebileceğine dair hala sınırlı bir anlayış olduğu anlamına gelmektedir. Sosyal sürdürülebilirliği çok boyutlu bir kavram olarak tanımlamak, ölçmek ve analiz etmek için geniş kabul görmüş bir yaklaşım yoktur, sosyal sürdürülebilirlik kavramı değerlendirirken hangi kriterlerin dikkate alınması gerektiği konusunda hala bir fikir birliği yoktur (Bramley ve ark., 2006). Gerçekten de sürdürülebilir kalkınmanın sosyal boyutu, ekonomik veya çevresel sürdürülebilirlikten farklı tanımından yoksun olduğu sürece, kendi uygulama modellerini sunamaz. Bu zorluklara rağmen, bazı araştırmacılar sosyal

sürdürülebilirliği tanımlamaya çalışmaktadır.

Çevresel Sürdürülebilirlik

Çevresel sürdürülebilirlik, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden şimdiki neslin ihtiyaçlarını karşılamayı amaçlayan bir kaynak kullanımı yaklaşımıdır. Doğal kaynakların sorumlu ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlamak için ekonomik, sosyal ve çevresel hususları dengelemeyi içerir (Liu, Browne ve Iossifova, 2022). Çevresel sürdürülebilirlik, doğal kaynakları tüketirken ve atıkları üretirken, çevreye zarar vermeden, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını da karşılayacak şekilde hareket etmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, çevre, ekonomi ve toplum arasındaki dengeyi korumak ve gelecekteki nesillere daha yaşanabilir bir dünya bırakmak için gereklidir. çevrenin korunmasını, doğal kaynakların verimli kullanımını, atık azaltımını ve geri dönüşümü içerir (Khan, Tabish ve Zhang, 2023). Bu amaçla, çevre dostu üretim yöntemleri, yenilenebilir enerji kaynakları, enerji verimliliği, çevresel düzenlemeler ve atık yönetimi gibi birçok strateji kullanılır. Güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının teşvik edilmesi de çevresel sürdürülebilirliğin kritik bir yönüdür (Cansino ve ark., 2011). Fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı azaltarak ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçerek, sera gazı emisyonlarını azaltabilir ve iklim değişikliğinin etkilerini azaltabiliriz (Chen ve ark., 2023).

Ekonomik Sürdürülebilirlik

Ekonomik sürdürülebilirlik, bir ekonomik sistemin, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden şimdiki neslin ihtiyaçlarını karşılama kabiliyetini ifade etmektedir. Kaynakları, üretimi ve tüketimi ekonomik büyüme, sosyal refah ve çevre koruma arasında sağlıklı bir denge sağlayacak şekilde yönetmeyi içermektedir (Baumgärtner ve Quaas, 2010). Sürdürülebilir bir ekonomik sistem, doğal kaynakları tüketmeden veya çevresel bozulmaya neden olmadan sonsuza kadar işlemeye devam edebilen sistemdir. Bu, kısa vadeli büyümeye ve kâra uzun vadeli sürdürülebilirlik yerine öncelik veren geleneksel ekonomik modellerden uzaklaşmayı gerektirmektedir (Barbier, 1987).

Ekonomik sürdürülebilirliğin kilit yönlerinden biri, enerji, su ve malzemeler dahil olmak üzere kaynakların verimli kullanılmasıdır. Bu, atıkların azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması gibi önlemlerle sağlanmaktadır (Sfakianaki, 2015). Bir diğer önemli faktör de toplumun tüm üyelerinin ekonomik fırsatlara ve faydalara erişiminin sağlanmasını içeren sosyal eşitlik ve içermenin teşvik edilmesidir. Bu, adil vergilendirme, gelirin yeniden dağıtımı ve eğitim ve öğretime yatırım gibi politikalarla başarı elde edilmektedir. Ekonomik sürdürülebilirlik ayrıca doğal çevrenin korunmasını ve ekonomik faaliyetlerin iklim değişikliğine veya diğer çevresel bozulma biçimlerine katkıda bulunmamasını sağlamaktadır. Bu, sera gazı emisyonlarının azaltılması, biyoçeşitliliğin korunması ve sürdürülebilir arazi kullanımı ve kaynak yönetiminin teşvik edilmesi gibi önlemler alınmaktadır. Ekonomik sürdürülebilirlik, ekonomik, sosyal ve çevresel hususları dengeleyen kapsamlı bir yaklaşım gerektirmektedir. Herkes için daha sürdürülebilir ve eşitlikçi bir ekonomik sistem oluşturmak için hükümetler, işletmeler ve bireyler arasındaki işbirliği oluşturmayı hedeflenmektedir (Curtis ve Lehner, 2019).

YÖNTEM

Bu çalışma için veri toplama, niceliksel değerlendirmeler toplamak ve araştırma sorularının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için örnek şirket uzmanlarıyla bir anketi içeriyordu. Anketin uygulanmasıyla akıllı üretim uygulamalarının sürdürülebilirlik perspektifiyle entegrasyonunun analizi için sağlam bir veri seti sağlanması amaçlanmıştır.

Tezde bahsedilen önceki bölümlerde sunulan literatür taraması temel bilgileri alınarak akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri olgunluk seviyesi. Modelde temel olarak Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirliğin üç temel boyutu olan sosyal, çevresel ve ekonomik boyutlarda tedarik zinciri yönetimi ile integrasyonu ne derece uygulandığı, ne derece katkıda bulunduğu ve organizasyonel amaçlara ne derece içselleştirildiği nitelenmektedir. Böylece endüstri 4.0 teknolojilerin tedarik zincirine adaptasyonunda sürekli AR-GE çalışmaları sürdürüp ve yenilik faaliyetlerini destekleyerek var olan durumu bir olgunluk yaklaşımı ile değerlendirilmesi, performans ölçülmesi ve hedeflerin belirlenmesi olumlu bir şekilde sonuçlanabilmektedir.

Akıllı ve sürdürülebilir tedarik zinciri olgunluk yaklaşımı modelinin fonksiyonlarını 12 adet Endüstri 4.0 teknoloji ve 10 adet sürdürülebilirlik fonksiyonunun 3 ana boyutu (sosyal, çevresel ve ekonomik) olarak tasarlanmaktadır.

Sosyal sürdürülebilirlik boyutu; stok devir, maliyet ve kârlılık gibi parametreler çerçevesinde değerlendirilmektedir.

Çevresel sürdürülebilirlik boyutu; atık minimizasyonu, emisyon ve kirlilik gibi parametreler çerçevesinde değerlendirilmektedir.

Ekonomik sürdürülebilirlik boyutu; ise kurumsal sosyal sorumluluk, çalışan refahı ve iş sağlığı ve güvenliği gibi parametreler çerçevesinde değerlendirilmektedir.

NÜMERİK ÖRNEK

Konyada faaliyet gösteren Tümosan, dizel motor ve traktör üretmektedir. Üretim alanı 1.600.000 m² üzerine kurulmuş olup 93.000 m² kapalı alan içerisinde üretim gerçekleştirmektedir. Tümosan fabrikası, üç vardiya ile çalışıp 45.000 adet traktör ve 75.000 adete kadar dizel motoru üretim kapasitesine ulaşmaktadır. Tümosan fabrikası, traktör, dizel motor ve elektrikli forklift üretmekte olup pazarlama ve satışı ile müşterilerine vermiş olduğu etkin satış sonrası hizmet sunmaktadır. Üretilen dizel motorların Türkiye ve yurtdışında bir çok ülkeye müşterileri tarafından traktör, otomotiv sanayi yedek parçaları, temizlik ekipmanları, jeneratör ve deniz araçları üretiminde kullanılmaktadır.

Tecrübeli kadrosu ile beraber yeni uygulanan teknolojilerle müşterilere kaliteli ve güvenilir traktör çözümleri sunarak pazarlama süreçlerini yürüterek performansı artırmaktadır. Müşteri odaklı yaklaşımlarıyla, ihtiyaçlara uygun modeller ve satış sonrası hizmetlerle uzun süreli iş birliği sağlamaktadır. Pazarlama faaliyet merkezi İstanbul'da bulunmaktadır. Tümosan fabrikası ürettiği ürünlerle müşteri memnuniyetini yükseltmek, uygulanabilir yeni teknolojileri kullanarak üretim maliyetlerini azaltmak ve AR-GE çalışmalarına önemli kaynak ayırmakta ve öncelik vermektedir. Tümosan Fabrikası bünyesinde bulundurduğu mühendislik organizasyonu aracılığı ile üretilen motor ve traktörlere ilişkin modernizasyon ve geliştirme çalışmalarını yapmaktadır. Tümosan fabrikası olarak müşterilerine sunmuş olduğu ürün ve hizmeti değerlendirerek en son teknolojik gelişmeleri üretiminde uygulanmak ve tüm çalışmalarında güncel tasarım, kabul görmüş modern otomasyonlarından yararlanmak için yatırımdan hiç kaçınmamaktadır. Yeni ürünlerin geliştirilmesinde, prototip ürünler sanal ortamda oluşturularak seri üretime kısa zamanda geçilmesi sağlanabilmektedir.

Metodoloji

Adım 1. Endüstri 4.0 teknolojilerinin sürdürülebilirlik katkılarının belirlenmesi: ilk olarak modelin on iki adet Endüstri 4.0 teknolojileri, üç adet sürdürülebilirlik (çevresel, ekonomik ve sosyal) boyutları üzerine on adet Tedarik Zinciri yönetimi fonksiyonlarına tek tek tablo oluşturularak olgunluk ve performans katkı puanları katılımcılardan 5'li Likert ölçeği ile elde edilmektedir. Ölçekte 1 çok düşük, 2 düşük, 3 orta, 4 yüksek, 5 çok yüksek olgunluk ve performans katkı puanı olarak gösterilmektedir.

Böylece on iki Endüstri 4.0 teknolojinin satırları sürdürülebilirliğin üç ana boyutunda, her boyutun 8 tane gösterge vardır aşağıdaki tablo 6.1’da açıklanmıştır. Uygulama, katkı ve skorlarının sütunları oluşturduğu 12x9’luk araç olgunluk birincil matrisi elde edilmektedir.

Tablo 1

Sürdürülebilirlik boyutlarının göstergeleri

Sürdürülebilirlik Boyutları	Göstergeler
Çevresel	A1. Atık A2. Kirlilik A3. Emisyon A4. Arazi kullanımı A5. Enerji kullanımı A6. Doğal kaynak kullanımı A7. Yeniden kullan A8. Geri dönüşüm
Ekonomik	B1. Maliyet B2. MLT B3. OEE B4. Stok devri B5. Tesis alanı kullanımı B6. Hasar ve kayıp B7. Borsa değeri B8. Satış geliri
Sosyal	C1. Sosyal sorumluluk C2. Avantajlar ve bonuslar C3. Olumlu çalışma ortamı C4. İş sağlığı ve güvenliği C5. Kariyer gelişimi C6. İş memnuniyeti C7. İş güvenliği C8. Esnek çalışma programı

Adım 2. Endüstri 4.0 teknolojilerin olgunluğunun değerlendirilmesi: Endüstri 4.0 teknolojilerin olgunluk ve performans düzeyi, boyut puanlarının (mevcut durumu, uygulama durumu ve benimsenme durumu) geometrik ortalaması alınarak değerlendirilmektedir. Olgunluk puanı, teknolojilerinin derecesini ve bunların olgunluk ve performans açısından nasıl değerlendirildiğini göstermektedir.

Adım 3. Katkı açığının hesaplanması: Katkı açığı, 1’den 5’e kadar bir ölçekte 5’e eşit olan ideal seviyeden mevcut olgunluk düzeyinin çıkarılmasıyla belirlenir. Metodolojik çerçeve, mevcut araç olgunluğu ile mevcut araç olgunluğu arasındaki boşluğu kapatmanın önemini vurgulamaktadır. Ve istenilen seviye. Daha yüksek bir boşluk puanı, daha yüksek öncelik anlamına gelir çünkü daha yüksek bir puan, istenen ve hedef düzeyler arasında daha önemli bir farkın bulunduğunu göstermektedir.

Adım 4. Sürdürülebilirlik üzerindeki etkinin analiz edilmesi: Katkı açığının sürdürülebilirlik üzerindeki kapatılmasının potansiyel etkisini anlamak için her boyutun (çevresel, ekonomik ve sosyal) ilişkisel değerleri (korelasyon derecelendirmeleri) katkı açığıyla çarpılır. Sürdürülebilirliğin her boyutu için ağırlığı eşit aldık ve ardından boşlukla çarptık. Ancak karar verici isterse, üç boyutu ayrı ayrı toplam 1 olacak şekilde ağırlıklandırabilir ve daha sonra ilişki değerlerini ağırlıklar ve boşlukla çarparak: (sürdürülebilirlik alt boyutunun bireysel ağırlığı) * (ilişki değerleri) * (GAP).

Not: GAP = 5 – ilişki değerleri

Adım 5. Öncelik puanının belirlenmesi: Önceliklendirme puanı, her bir sürdürülebilirlik boyutu için ilişki değerleri ve katkı açığının çarpımlarının toplanmasıyla elde edilmektedir. Bu puan, akıllı veya yalın bir aracın önemini ve sürdürülebilirliğe potansiyel katkısını göstermektedir.

Adım 6. Yol haritasının geliştirilmesi: Önceliklendirme puanı ile uygulamaya yönelik yol haritasında akıllı ve yalın araçlara öncelik verilir. Bu yol haritası, firmalara sürdürülebilirliği olumlu yönde etkileme potansiyeli olan akıllı ve yalın araçları birleştirme konusunda rehberlik edecek ve hem bir ölçüm hem de gelecekteki gelişim için bir yol sunacaktır (Gündüz ve ark., 2024).

Çalışmanın bu bölümünde, modelin uygulanabilirliğini test etmek amacıyla gerçekleştirilen örnek olay çalışmasının ayrıntıları ve sonuçları sunulmaktadır. Şirketin AR-GE Tasarım ve Mühendislik departmanının yöneticileriyle, Endüstri 4.0 araçlarının olgunluk seviyelerini belirlemeyi amaçlayan bir anket çalışması yapılmıştır. Verilerin analizi sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur. Tablo 6.1 olduğu gibi önerilen modelin uygulanabilirliğini göstermek için varsayımsal bir örnek sunmaktadır. Basitlik adına, her bir aracın sürdürülebilirlik açısından ilişki düzeyini “eşit” olarak aldım. Ancak karar verici bunların hepsini tek tek belirleyebilecek, daha sonra aracın sürdürülebilirlik alt boyutunun ilişki düzeyi “geometrik ortalama” ile belirlenebilecektir. Sonuçlara göre, yol haritalamasında öncelik sıralamasında 30.6452 öncelik puanıyla siber güvenlik ilk sırada yer alırken, büyük veri analitik 26.3159 öncelik puanıyla ikinci, otonom robot ise 21.1927 öncelik puanıyla üçüncü sırada yer almaktadır.

BULGULAR

Tablo 2

Sürdürülebilirlik varsayımsal örneği

	Çevresel Sürdürülebilirlik Katkı Puanı	Ekonomik Sürdürülebilirlik Katkı Puanı	Sosyal Sürdürülebilirlik Katkı Puanı	Bileşen Olgunluğu	Gap	Çevresel Boyutta Eylem Önemi	Ekonomik Boyutta Eylem Önemi	Sosyal Boyutta Eylem Önemi	Sürdürülebilirlik Eylem Önemi	Sürdürülebilirlik Öncelik Sıralaması
Otonom Robot	2	2	2	1,8171	3,1829	7,0593	7,2743	6,8591	21,1927	3
Simülasyon	3	2	2	3,3019	1,6981	4,7779	3,7267	3,9474	12,4519	11
Yatay ve Dikey Sistem Entegrasyonu	2	2	2	2,8845	2,1155	5,1212	4,4583	4,1597	13,7392	8
Nesnelerin İnterneti	3	3	3	2,8845	2,1155	6,6708	5,9068	6,4058	18,9834	6
Siber Güvenlik	5	4	4	2,6207	2,3793	11,6338	9,1877	9,8238	30,6452	1
Bulut Bilişim	4	4	4	3,4200	1,5800	6,7578	6,8216	6,3799	19,9593	4
Katmanlı Üretim	2	2	2	3,3019	1,6981	4,1594	3,2063	3,3389	10,7046	12
Artırılmış Gerçeklik	2	1	2	2,2894	2,7106	5,0581	3,8787	4,1085	13,0453	9
Büyük Veri Analitik	4	4	3	2,6207	2,3793	10,5719	8,3293	7,4147	26,3159	2
Yapay Zeka	2	2	2	2,8845	2,1155	4,4061	4,3319	4,0418	12,7797	10
Blok Zinciri Teknolojisi	4	3	3	3,0000	2,0000	7,5041	6,9282	5,0420	19,4743	5
Makine Öğrenmesi	3	3	2	2,6207	2,3793	6,5736	6,5047	5,7227	18,8010	7

0=Yok 1=Çok Düşük 2=Düşük 3=Orta 4=Yüksek 5=Çok Yüksek

Tablo 3

Sürdürülebilirlik Perspektifinden Endüstri 4.0 Teknolojileri Olgunluk Anketi

Endüstri 4.0 Teknolojileri	Mevcut Durumu	Uygulama Durumu	Adaptasyon Durumu	Geometrik Ortalaması	Gap
Otonom Robot	3	2	1	1,8171	3,1829
Simülasyon	4	3	3	3,3019	1,6981
Yatay ve Dikey Sistem Entegrasyonu	4	2	3	2,8845	2,1155
Nesnelerin İnterneti	4	3	2	2,8845	2,1155
Siber Güvenlik	3	3	2	2,6207	2,3793
Bulut Bilişim	5	4	2	3,4200	1,5800
Katmanlı Üretim	4	3	3	3,3019	1,6981
Artırılmış Gerçeklik	3	2	2	2,2894	2,7106
Büyük Veri Analitik	3	3	2	2,6207	2,3793
Yapay Zeka	4	2	3	2,8845	2,1155
Blok Zinciri Teknolojisi	3	3	3	3,0000	2,0000
Makine Öğrenmesi	3	3	2	2,6207	2,3793

0=Yok 1=Çok Düşük 2=Düşük 3=Orta 4=Yüksek 5=Çok Yüksek

TARTIŞMA VE SONUÇ

Endüstri 4.0, akıllı cihazları kullanarak, üretim süreci ve tedarik zincirleri arasında iletişim kurarak, iyileştirme alanlarını araştırmak için sanal toplu veri toplayarak, yeni ürün ve hizmet teklifleri geliştirerek yeni bir dijitalleşme dönemi başlamaktadır. Endüstri 4.0, kitlesel üretimden, gerçek son tüketici talep ihtiyaçlarına dayalı üretim sistemine potansiyel bir geçiş getirmektedir. Sürdürülebilirlik, ürünlerde kullanılan kıt kaynakların miktarını azaltmak, ürünlerdeki malzemelerin onarılmasını, yeniden kullanılmasını ve geri dönüştürülmesini sağlamaktadır (Takhar, 2018). Endüstri 4.0 konseptinin ortaya çıkmasıyla birlikte, çeşitli endüstrilerde IoT, bulut bilişim, büyük veri analitiği, otonom robotik vb. gibi yenilikçi teknolojilerin artan oranda benimsendiği gözlemlenmektedir. Kuruluşlar, süreç verimliliğini artırmak için üretim sistemlerinde ileri teknolojileri kullanmanın faydalarından yararlanmaya başlamaktadır (Shao ve ark., 2021). Endüstri 4.0, İşletmelerin rekabetçi kalmak ve sürdürülebilirliği eşit derecede sağlamak için dijital dönüşümü takip etmesi gerekmektedir. Bu teknoloji, sosyal ve ekonomik avantajlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada, endüstri 4.0 teknolojilerinin sergilenmesine ve teknolojilerin tedarik zinciri operasyonlarına entegre edilmesinin faydalarına odaklanmaktadır. Endüstri 4.0 teknolojileri, tedarik zincirinde etkin bir şekilde uygulanırsa, ürünler kaynaktan varış noktalarına zamanında teslim edileceğinden üretim operasyonlarında verimliliği büyük ölçüde artıracaktır. Yeni teknolojiye elde edilecek diğer avantajlar arasında daha iyi yönetilmesi, daha düşük maliyet, daha iyi satışlar ve finansal performansta genel iyileşme yer almaktadır. Tüm bunları başarmak için stratejik planlama, yüksek teknolojiye iyileştirme, bütünsel küresel liderlik, iş süreci dönüşümü ve küresel uygulamalar için en iyi bilgiye ihtiyaç olacaktır (Okwu ve ark., 2020).

Bu araştırma boyunca, makale sürdürülebilirlik açısından üretimde kurumsal hazırlığın temel rolünü vurgulamıştır. Liderlik taahhüdü, çalışan katılımı, sağlam teknoloji altyapısı, veri yönetimi ve siber güvenlik önlemleri akıllı-yalın araçların başarılı bir şekilde konuşlandırılması ve kullanılması için temel ön koşullar olarak belirlenmiştir. Bu, akıllı bir organizasyon olmada kurumsal olgunluğun önemini vurgulayan (Elizondo ve ark., 2023) bulgularıyla uyumludur.

Yukardaki tabloda gösterildiği gibi önerilen modelin uygulanabilirliğini göstermek için varsayımsal bir örnek sunmaktadır. Basitlik adına, her bir aracın sürdürülebilirlik açısından ilişki düzeyini “eşit” olarak aldım. Ancak karar verici bunların hepsini tek tek belirleyebilecek, daha sonra aracın sürdürülebilirlik alt boyutunun ilişki düzeyi “geometrik ortalama” ile belirlenebilecektir. Sonuçlara göre, yol haritalamasında öncelik sıralamasında 30.6452 öncelik puanıyla siber güvenlik ilk sırada yer alırken, büyük veri analitik 26.3159 öncelik puanıyla ikinci, otonom robot ise 21.1927 öncelik puanıyla üçüncü sırada yer almaktadır.

Önümüzdeki yıllarda ulaşım ve tedarik zinciri sektörünün sürücüsüz araçlara, kaptansız gemilere ve pilotsuz uçaklara sahip olacağı öngörülmektedir. Tedarik zinciri ile yeni teknolojiler hayatımızı yakından etkileyecek ve mevcut tedarik zinciri sistemi yerini en son teknoloji ile dijitalleştirilmiş entegre yeni sistemlere bırakacaktır. Organizasyonlar arası koordinasyon ve bağlantılar gerektiren yeni ortaya çıkan bir fenomendir. Buna ek olarak, ortak firmaların teknoloji uzmanlığı ve işbirliği geçmişlerinin de daha fazla araştırılması gerekmektedir.

Sürdürülebilir perspektifinden Endüstri 4.0 teknolojileri ve Tedarik Zinciri yönetiminin araçlarla birleştirmenin sunduğu dönüştürücü fırsat abartılamaz. (Benkhathi ve ark., 2023), (Dahmani ve ark., 2021), Shahin ve ark. (2020), Treviño-Elizondo ve ark. (2023), Akbal ve Doğan (2023), Li (2019), Mahmood ve Montagna (2013) ve Tripathi ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmalar, rekabet gücünü artırma, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma ve sosyal refaha katkıda bulunma konusunda bu entegre yaklaşımın potansiyelini topluca vurgulamaktadır. Üretim endüstrisindeki kuruluşlar bu entegre modeli benimsedikçe, kendilerini yalnızca operasyonel mükemmellik için değil, aynı zamanda

sürdürülebilir ve sosyal olarak bilinçli bir geleceğe sorumlu katkıda bulunanlar olarak da konumlandırılır.

SINIRLAMALAR VE GELECEKTEKİ ARAŞTIRMA YÖNLERİ

Ek olarak, gelecekteki keşif yollarını değerlendirirken araştırmacıların sektöre özgü uygulamaları derinlemesine incelemeleri, uygulama konusunda uzunlamasına çalışmalar yürütmeleri, ortaya çıkan teknolojileri keşfetmeleri, küresel karşılaştırmalı çalışmalar yapmaları, sürdürülebilirlik etkisinin nicel analizini kullanmaları, derinlemesine vaka çalışmaları yürütmeleri ve çalışan bakış açılarını değerlendirmeleri önerilmektedir

Çalışmada birkaç sınırlamayı kabul ediyoruz. İlk olarak, araştırmamız öncelikle üretim sektörüne odaklanmıştır ve önerilen modelin diğer sektörlerle doğrudan uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Bulguların genelleştirilmesine, farklı organizasyonel bağlamların özgüllükleri göz önünde bulundurularak ihtiyatlı yaklaşılmalıdır. Dahası, modelin uygulanabilirliği, üretim organizasyonlarındaki birincil veri toplamasından elde edilen ampirik doğrulamadan yoksun olan mevcut literatüre ve kavramsal analize dayanmaktadır. Akıllı üretim teknolojilerinin dinamik yapısı, ortaya çıkan gelişmeleri dahil etmek için periyodik güncellemeler gerektiren bir zorluk oluşturmaktadır. Ek olarak, modelimiz ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları kapsarken, belirli sürdürülebilirlik ölçümlerinin endüstri ve organizasyonel faktörlere göre özelleştirilmesi gerekebilir. Bu sınırlamalar, önerilen modelin sağlamlığını ve pratikliğini artırmak için gelecekteki araştırmalar için alanları vurgulamaktadır.

Etik Beyan

Bu çalışma NEÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Fakültesi, İşletme Anabilim dalında “Sürdürülebilirlik Perspektifinden Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Tedarik Zinciri Yönetimi Fonksiyonları Üzerine Etkisi: Bir Performans ve Olgunluk Ölçme Uygulaması” isimli tez çalışmasından üretilmiştir.

Etik Kurul Onayı

Çalışmadaki gerçekleştirmiş olduğumuz anket çalışması için etik onay alınmıştır.

Yazar Katkıları

Araştırma Tasarımı: Prof. Dr. Turan PAKSOY

Veri Toplama: MSc. Eng. Ibrahim ÖZTÜRK

Araştırma- Veri Analizi – Doğrulama: MSc. Eng. Ibrahim ÖZTÜRK

Makalenin Yazımı: MSc. Eng. Ibrahim ÖZTÜRK

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi: Prof. Dr. Turan PAKSOY

Finansman

Makalenin herhangi bir finansmanı yoktur.

Çıkar Çatışması

Makalenin çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG):

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme

REFERANSLAR

- A, S., & R, S. (2023). A systematic review of Explainable Artificial Intelligence models and applications: Recent developments and future trends. *Decision Analytics Journal*, 7, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100230>
- Akkara, J. D., & Kuriakose, A. (2023). To reuse or not reuse? That is a rebound question! *Indian Journal of Ophthalmology*, 71(7), 2914-2915. https://doi.org/10.4103/ijo.Ijo_411_23
- Bahrin, M., Othman, F., Azli, N., & Talib, M. (2016). Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi*, 78. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9285>
- Barbier, E. B. (1987). The concept of sustainable economic development. *Environmental conservation*, 14(2), 101-110.
- Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, 13, 1245-1252. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045>
- Baumgärtner, S., & Quaas, M. (2010). What is sustainability economics? *Ecological Economics*, 69(3), 445-450.
- Blanchet, M. (2014). *Industrie 4.0: the new industrial revolution. How Europe will succeed*.
- Bramley, G., Dempsey, N., Power, S., & Brown, C. (2006). What is sustainability and how do existing urban forms perform in nurturing it? *Planning Research Conference*.
- Burton, E. (2000). The Compact City: Just or Just Compact? A Preliminary Analysis. *Urban Studies*, 37(11), 1969-2006. <https://doi.org/10.1080/00420980050162184>
- Cansino, J. M., Pablo-Romero, M. d. P., Román, R., & Yñiguez, R. (2011). Promoting renewable energy sources for heating and cooling in EU-27 countries. *Energy Policy*, 39(6), 3803-3812. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.010>
- Chavarría Barrientos, D., Batres, R., Wright, P., & Molina, A. (2017). A methodology to create a sensing, smart and sustainable manufacturing enterprise. *International Journal of Production Research*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1386333>
- Chen, X., Kurdve, M., Johansson, B., & Despeisse, M. (2023). Enabling the twin transitions: Digital technologies support environmental sustainability through lean principles. *Sustainable Production and Consumption*, 38, 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.03.020>
- Chiappetta Jabbour, C. J., Fiorini, P. D. C., Ndubisi, N. O., Queiroz, M. M., & Piato, É. L. (2020). Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. *Science of The Total Environment*, 725, 138177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138177>
- Chinna, P. R. (2016). LOGISTIC MANAGEMENT: A FEEDBACK STUDY ON SELECTED AUTOMOBILE TRANSPORTATION SYSTEMS. 1.
- Clim, A. (2019). *Cyber security beyond the Industry 4.0 era. A short review on a few technological promises*.
- Curtis, S. K., & Lehner, M. (2019). Defining the sharing economy for sustainability. *Sustainability*, 11(3), 567.
- Çelen, S. (2017). SANAYİ 4.0 VE SİMÜLASYON. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* (33982/376175), 9-26.

- Dawson, J., & Thomson, R. (2018). The Future Cybersecurity Workforce: Going Beyond Technical Skills for Successful Cyber Performance. *Frontiers in Psychology*, 9, 744. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00744>
- de Paula Ferreira, W., Armellini, F., & De Santa-Eulalia, L. A. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106868. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868>
- Delahaye, A., Salehy, Y., Derens-Bertheau, E., Duret, S., Adlouni, M. E., Merouani, A., . . . Hoang, H.-M. (2023). Strawberry supply chain: Energy and environmental assessment from a field study and comparison of different packaging materials. *International Journal of Refrigeration*, 153, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.06.011>
- Delke, V., Schiele, H., Buchholz, W., & Kelly, S. (2023). Implementing Industry 4.0 technologies: Future roles in purchasing and supply management. *Technological Forecasting and Social Change*, 196, 122847. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122847>
- Dev, N. K., Shankar, R., & Qaiser, F. H. (2020). Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104583. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104583>
- Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2021). Impact of Industry 4.0 on supply chain performance. *Production Planning & Control*, 32(1), 63-81. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1712487>
- Gabaçlı, N., & Uzunöz, M. (2017). IV.Sanayi Devrimi: Endüstri 4.0 ve Otomotiv Sektörü. 3rd *International Congress on Political, Economic and Social Studies (ICPESS)*, 150-174.
- Ghadge, A., Er Kara, M., Moradlou, H., & Goswami, M. (2020). The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(4), 669-686. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2019-0368>
- Ghadimi, P., Ghassemi Toosi, F., & Heavey, C. (2018). A multi-agent systems approach for sustainable supplier selection and order allocation in a partnership supply chain. *European Journal of Operational Research*, 269(1), 286-301. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.014>
- Gunduz, M. A., Demir, S., & Paksoy, T. (2021). Matching functions of supply chain management with smart and sustainable Tools: A novel hybrid BWM-QFD based method. *Computers & Industrial Engineering*, 162, 107676. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107676>
- Gündüz, M. A., Demir, S., & Paksoy, T. (2024). Road-mapping for smart and lean tools with a sustainability perspective: A new model proposal. *Journal of Transportation and Logistics*. <https://doi.org/10.26650/JTL.2024.1329972>
- Halvorsen, H.-P. (2021). Cyber Security. Retrieved from https://www.halvorsen.blog/documents/technology/cyber_security/cyber_security.php
- Hayes, A. (2020). Augmented Reality. Retrieved from <https://www.investopedia.com/terms/a/augmented-reality.asp>
- Hinrichsen, T.-F., Fries, C., Hagg, M., & Fechter, M. (2023). Order Management Perspective on Fluid Manufacturing Systems. *Procedia Computer Science*, 217, 413-422. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.237>
- Kahraman, H. (2021). Endüstri 4.0 ile Katmanlı Üretim. Retrieved from <https://www.endustri40.com/endustri-4-0-ile-katmanli-uretim/>
- Kevin, M., & Ana, F. I. (2019). Case Study - Customer Relation Management, Smart Information

- Systems and Ethics. *The ORBIT Journal*, 2(2), 1-24. <https://doi.org/10.29297/orbit.v2i2.114>
- Khan, S. A. R., Tabish, M., & Zhang, Y. (2023). Embrace of industry 4.0 and sustainable supply chain practices under the shadow of practice-based view theory: Ensuring environmental sustainability in corporate sector. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136609>
- Kim, S., Mai, T. D., Han, S., Park, S., Nguyen, D. K. T., So, J., . . . Cha, M. (2023). Active Learning for Human-in-the-Loop Customs Inspection. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 35(12), 12039-12052. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2022.3144299>
- Kugler, M., Brandenburg, M., & Limant, S. (2021). Automizing the manual link in maritime supply chains? An analysis of twistlock handling automation in container terminals. *Maritime Transport Research*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2021.100017>
- Lara, M., Saucedo, J., Marmolejo, J., Salais, T., & Vasant, P. (2020). Vertical and horizontal integration systems in Industry 4.0. *Wireless Networks*, 26. <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1873-2>
- Leng, J., Ruan, G., Song, Y., Liu, Q., Fu, Y., Ding, K., & Chen, X. (2021). A loosely-coupled deep reinforcement learning approach for order acceptance decision of mass-individualized printed circuit board manufacturing in industry 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124405>
- Lin, Z., Cai, C., & Xu, B. (2010). Supply chain coordination with insurance contract. *European Journal of Operational Research*, 205(2), 339-345. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.01.013>
- Liu, Q., Browne, A. L., & Iossifova, D. (2022). A socio-material approach to resource consumption and environmental sustainability of tourist accommodations in a Chinese hot spring town. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 424-437. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.021>
- Liu, Z., Zhao, D., Wang, P., Yan, M., Yang, C., Chen, Z., . . . Lu, Z. (2022). Additive manufacturing of metals: Microstructure evolution and multistage control. *Journal of Materials Science & Technology*, 100, 224-236. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.06.011>
- MacDougall, D., & MacDougall, D. (2022). *The art of the observer: A personal view of documentary*. *The art of the observer*: Manchester University Press.
- Okwu, M., U-Dominic, C., Orji, I., M, M., & Ayomoh, M. (2020). A review of the effect of Industry 4.0 on supply chain systems. In (pp. 463-492).
- Pajonk, A., Prieto, A., Blum, U., & Knaack, U. (2022). Multi-material additive manufacturing in architecture and construction: A review. *Journal of Building Engineering*, 45, 103603. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103603>
- Pandikumar, M. P., & Manickavasagam, V. M. (2023). Chapter 12 - Application of blockchain for handling volatility in supply chains—a finance perspective. In K. Mathiyazhagan, V. R. Sreedharan, D. Mathivathanan, & V. Sunder M (Eds.), *Blockchain in a Volatile-Uncertain-Complex-Ambiguous World* (pp. 163-193): Elsevier.
- Rashid, A., & Tjahjono, B. (2016). Achieving Manufacturing Excellence through the integration of Enterprise Systems and Simulation. *Production Planning and Control*. <https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1143132>
- Sahay, B. S., & Ranjan, J. (2008). Real time business intelligence in supply chain analytics.

- Information Management & Computer Security*, 16(1), 28-48.
<https://doi.org/10.1108/09685220810862733>
- Sanders, N. (2007). An Empirical Study of the Impact of e-Business Technologies on Organizational Collaboration and Performance. *Journal of Operations Management - J OPER MANAG*, 25, 1332-1347. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.008>
- Sarvari, P., Ustundag, A., Cevikcan, E., Kaya, I., & Cebi, S. (2018). Technology Roadmap for Industry 4.0. In (pp. 95-103).
- Sfakianaki, E. (2015). Resource-efficient construction: Rethinking construction towards sustainability. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*.
- Shao, X.-F., Liu, W., Li, Y., Chaudhry, H., & Yue, X.-G. (2021). Multistage implementation framework for smart supply chain management under industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120354. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120354>
- Singh, D., & Verma, A. (2018). Inventory Management in Supply Chain. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1), 3867-3872. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.641>
- Srinivasan, R., & Swink, M. (2015). Leveraging Supply Chain Integration through Planning Comprehensiveness: An Organizational Information Processing Theory Perspective. *Decision Sciences*, 46. <https://doi.org/10.1111/deci.12166>
- Strange, R., & Zucchella, A. (2017). Industry 4.0, global value chains and international business. *Multinational Business Review*, 25(3), 174-184. <https://doi.org/10.1108/MBR-05-2017-0028>
- Takhar, S. (2018). *The Impact of Industry 4.0 on Supply Chains and Sustainability*.
- Trappey, A. J. C., Trappey, C. V., Hareesh Govindarajan, U., Chuang, A. C., & Sun, J. J. (2017). A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0. *Advanced Engineering Informatics*, 33, 208-229.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.11.007>
- Velasquez, N., Estevez, E., & Pesado, P. (2018). Cloud Computing, Big Data and the Industry 4.0 Reference Architectures. *Journal of Computer Science and Technology*, 18, e29.
<https://doi.org/10.24215/16666038.18.e29>
- Wang, J., Xu, C., Zhang, J., & Zhong, R. (2021). Big data analytics for intelligent manufacturing systems: A review. *Journal of Manufacturing Systems*.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.005>
- Wu, L., Yue, X., Jin, A., & Yen, D. C. (2016). Smart supply chain management: a review and implications for future research. *The International Journal of Logistics Management*, 27(2), 395-417. <https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2014-0035>
- Yelis, B. (2021). Yatay ve Dikey Entegrasyon Nedir. Retrieved from
<https://www.endustri40.com/yatay-ve-dikey-entegrasyon-nedir/>