

*Araştırma Makalesi / Research Article*

DOI: 10.29064/ijma.1512055

## Teknoloji-Örgüt-Çevre Bakış Açısıyla Gelişmekte Olan Ülkelerde Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Benimsenmesine Dair Bir Model Önerisi

Sayıll SAÇAK DÜZGÜN<sup>1</sup>, Üstün ÖZEN<sup>2</sup>, Derya FINDIK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MSc, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Ankara, Türkiye / s\_sacak@yahoo.com.

<sup>2</sup> Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye / uozen@atauni.edu.tr.

<sup>3</sup> Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye / [dfindik@aybu.edu.tr](mailto:dfindik@aybu.edu.tr).

**Özet:** Gelişmiş ülkeler 4. Sanayi devriminin gereklerini yerine getirip Endüstri 4.0'ın yıkıcı teknolojileri ile sanayilerini tamamıyla dijitalleştirirken gelişmekte olan ülkelerin de rekabet edebilmeleri için bu dönüşüme ayak uydurmaları zorunludur. Literatürde gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesini inceleyen çalışmaların sayısı azdır. Çalışmada öncelikle sistematik literatür taraması ve içerik analizi yöntemi ile gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın benimsenmesine etki eden faktörler tespit edilmiş daha sonra bu faktörler Teknoloji-Organizasyon-Çevre kavramsal çerçevesi kullanılarak modellenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Endüstri 4.0, Teknoloji-Organizasyon-Çevre kavramsal çerçevesi, Organizasyon yönetimi, Benimseme, Gelişmekte olan ülkeler.

**JEL Sınıflandırması:** L60, M11, M15, O14, O33, Q55

**ORCID<sup>1</sup>:** 0000-0002-2890-2917 / **ORCID<sup>2</sup>:** 0000-0002-7595-4306 / **ORCID<sup>3</sup>:** 0000-0002-3002-4391

**Başvuru Tarihi:** 07.07.2024

**Kabul Tarihi:** 19.07.2024

## A Model Proposal For The Adoption Of Industry 4.0 Technologies In Developing Countries From The Perspective Of Technology-Organization-Environment

Sayıll SAÇAK DÜZGÜN<sup>1</sup>, Üstün ÖZEN<sup>2</sup>, Derya FINDIK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MSc, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Ankara, Türkiye / s\_sacak@yahoo.com.

<sup>2</sup> Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye / uozen@atauni.edu.tr.

<sup>3</sup> Prof. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye / [dfindik@aybu.edu.tr](mailto:dfindik@aybu.edu.tr).

**Abstract:** While developed countries meet the requirements of the Fourth Industrial Revolution and fully digitize their industries with the disruptive technologies of Industry 4.0, it is essential for developing countries to adapt to this transformation to remain competitive. The literature on the adoption of Industry 4.0 technologies in developing countries is scarce. In this study, factors affecting the adoption of Industry 4.0 in developing countries were first identified through systematic literature review and content analysis methods, and then these factors were modeled using the Technology-Organization-Environment conceptual framework.

**Keywords:** Industry 4.0, Technology-Organization-Environment conceptual framework, Organization management, Adoption, Developing countries.

**JEL Classification:** L60, M11, M15, O14, O33, Q55

**ORCID<sup>1</sup>:** 0000-0002-2890-2917 / **ORCID<sup>2</sup>:** 0000-0002-7595-4306 / **ORCID<sup>3</sup>:** 0000-0002-3002-4391

**Received Date:** 07.07.2024

**Accepted Date:** 19.07.2024

## EXTENDED SUMMARY

### *Research Problem*

This article aims to identify the factors affecting the transition to Industry 4.0 in developing countries and propose a conceptual model based on the Technology-Organization-Environment framework.

### *Research Questions*

What are the factors affecting adoption of Industry 4.0 technologies in developing countries? What are the technological factors that affect adoption of Industry 4.0 in developing countries? What are the organizational factors that affect adoption of Industry 4.0 in developing countries? What are the environmental factors that affect adoption of Industry 4.0 in developing countries? How can the factors affecting the adoption of Industry 4.0 in developing countries be modeled using the technology-organization-environment framework?

### *Literature Review*

The researchers reviewed literature in two main areas: Industry 4.0 literature in developing countries and technology-organization-environment framework.

### *Methodology*

To identify the factors affecting the adoption of Industry 4.0 in the industries of developing countries, a systematic literature review was conducted on Scopus and Web of Science databases. Publications accessed as a result of the systematic literature review were evaluated according to predetermined criteria, and it was found appropriate to include 227 of these publications in the study. The included publications were analyzed using the content analysis method to identify the factors affecting the adoption of Industry 4.0 in developing countries.

### *Results and Conclusions*

Through content analysis of the articles included in the study as a result of the systematic literature review, ten different factors affecting the adoption of Industry 4.0 technologies in developing countries were identified. These factors can be listed as 'sustainability,' 'circular economy,' 'supply chain,' 'determination of maturity and readiness levels,' 'innovation,' 'awareness,' 'quality management,' 'education system,' 'competencies,' and 'planning, policy, and strategy studies.'

In the study, 'perceived technological benefit related to sustainability,' 'perceived technological benefit related to circular economy,' and 'perceived technological benefit related to supply chain performance' were identified as factors related to the technology category of the TOE framework. The factors 'organizations' maturity and readiness levels,' 'innovation,' 'awareness,' and 'quality management' are associated with the organization category. 'Education system,' 'workforce competencies,' and 'planning, policy, and strategy studies' were categorized as environmental factors outside the organization.

## GİRİŞ

2011 yılı ve sonrasında sanayide teknolojik ilerlemeler sonucunda Endüstri 4.0 olarak adlandırılan yeni bir paradigma kayması yaşanmıştır. Endüstri 4.0'ı birlikte çalışarak örgüt performansını arttıran farklı teknolojiler topluluğu olarak tanımlamak mümkündür (Gaddekar ve diğerleri, 2022). Yıkıcı teknolojilerin yön verdiği bu yeni devire dördüncü sanayi devrimi gözü ile bakılmaktadır. Bu devrimin başlangıcı olarak 2011 yılında Almanya'nın açıklamış olduğu yeni sanayi politikası yani Endüstri 4.0 kabul edilmektedir (Effoduh, 2016).

Endüstri 4.0 olarak anılan yeni sanayi döneminde yapay zeka, bulut bilişim, siber fiziksel sistemler, 5G, nesnelerin interneti, üç boyutlu yazıcılar gibi yıkıcı teknolojilerin kullanımı tüm tedarik zincirini değiştirmiş ve üretim akıllı olarak tabir edilen yeni nesil fabrikalarda gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Endüstri 4.0'ın en belirgin özelliği yatayda yani tüm üretim zinciri boyunca ve dikeyde yani bir firmanın tüm otomasyon seviyeleri boyunca entegrasyonun sağlanmasıdır (Ávila Bohórquez ve Gil Herrera, 2022). Geliştirilmiş tedarik zinciri ve akıllı fabrikalarda üretim temel alınan teknolojilerin sunduğu iletişim ortamı sayesinde üretim fiziksel mekânlara bağımlılıktan kurtulmuştur. Farklı mekanlardaki cihazların senkronize iletişimi sayesinde üretim süreci boyunca konumdan bağımsız olarak gerçek zamanlı iletişim kurmak ve cihazlar arası ve cihazlarla insanlar arası bilgi paylaşımı mümkün hale gelmiştir (León García ve Baez Landeros, 2020).

Günümüzde pek çok müşteri üreticilerden yüksek kalitede üretilmiş ve kısa sürede teslim edilebilen özelleştirilmiş ürünler talep etmektedir (Ramos ve diğerleri, 2020). Endüstri 4.0'a uyum sağlamak firmalara ürünleri müşterilerinin taleplerine göre özelleştirebilme, izleme ve kontrol, üretimde verimliliğin artması gibi pek çok fayda sunarken bu avantajlardan yararlanmak da iş süreçlerinin optimize edilmesi, maliyet ve teslimat sürelerinde düşüş, kalitede artış, rekabet avantajı sağlama gibi çeşitli olumlu geri dönüşleri beraberinde getirir (Cordero ve diğerleri, 2023).

Endüstri 4.0 Almanya'nın ekonomide diğer gelişmiş ülkelere üstünlük sağlayabilme çabasının bir ürünü olsa da hızla diğer gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler tarafından da kabul görmüştür. Farklı ülkeler sırasıyla yeniçağa ayak uydurmak için kendi stratejilerini ortaya koymuşlardır. "Çin Malı 2025", "Akıllı Üretim (ABD)", "Üretimin Geleceği (Birleşik Krallık)", "Akıllı Gelişmiş Üretim ve Hızlı Dönüşüm Merkezi (SAMARTH)- Udyog Bharat 4.0 (Hindistan)" (Sony ve diğerleri, 2021) bu stratejilerin bazılarıdır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerin sanayideki bu devrime ayak uydurmaları rekabet güçlerini koruyabilmeleri açısından çok önemlidir. Fakat sanayi seviyeleri 1.0-3.0 (Wang ve diğerleri, 2020) arasında değişen gelişmekte olan ülkeler açısından bu çok da kolay bir görev değildir. Bu nedenle gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'a geçişe etki edecek faktörlerin araştırılması oldukça önemlidir.

Endüstri 4.0'ın getirdiği yeniliklerin benimsenmesi ile ilgili olarak kullanılabilir en uygun çerçevelerden biri Teknoloji-Organizasyon-Çevre (Technology-Organization\_Environment: TOE) çerçevesidir. TOE teorik modeli ile yeniliklerin benimsenmesi konusunu teknolojik, organizasyonel ve çevresel faktörler bağlamında bütüncül bir yaklaşımla incelemek mümkündür (Hwang ve diğerleri, 2016). TOE Endüstri 4.0 teknolojisinin benimsenmesini incelemek için uygun bir altyapı sunar ve literatürde birçok farklı teknolojinin benimsenmesini incelemek için kullanılmıştır (Zhong & Moon, 2023). TOE çerçevesi mevcut teknoloji, organizasyon yapısı ve endüstriyel çevre koşullarında bir teknolojinin ne kadar kabul edilebilir olduğunu açıklamayı hedefler. Bu bakımdan TOE'nin teknolojinin bir organizasyon tarafından benimsenmesini etkileyen tüm olası faktörleri ele aldığı söylenebilir (Aligarh ve diğerleri, 2023).

TOE çerçevesi yeni teknolojilerin benimsenmesini teknoloji, organizasyon ve çevre olmak üzere üç farklı boyutta ele alır. Teknolojik boyut teknoloji altyapısının benimseme davranışı üzerindeki etkilerini ele alır. Organizasyonel boyut organizasyonun yeni teknolojileri benimsemeyi destekleyecek ya da engelleyebilecek özelliklerine odaklanır. Çevresel boyut ise benimsemeye etki edebilecek dış faktörleri vurgular (Zhong & Moon, 2023). Organizasyonun sahip olduğu iç teknolojiler ve organizasyon dışında mevcut olan teknolojiler çerçevenin teknolojik boyutunda, organizasyonun kapsamı, büyüklüğü, yönetim modeli gibi faktörler organizasyon boyutunda, rakipler, piyasa koşulları, yasal düzenlemeler gibi faktörler ise çevre boyutunda incelenir (Aligarh ve diğerleri, 2023).

Bu makalede gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'a geçişe etki eden faktörlerin Teknoloji-Örgüt-Çevre modeli temelinde ortaya konması amaçlanmaktadır. Literatürde TOE genellikle firmaların teknoloji adaptasyonunu incelemek maksatlı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmalar arasında, yeşil tedarik zinciri yaklaşımının benimsenmesini TOE çerçevesinde inceleyen çalışmaların (Hwang ve diğerleri, 2016) yanı sıra TOE modeli ile sanayi sektöründe temiz teknoloji edinimini teknolojik, örgütsel ve çevresel faktörler başlıkları altında belirlenen değişkenler vasıtasıyla analiz eden çalışmalar da mevcuttur (Dinçbaşı ve Yiğitbaşıoğlu, 2017). TOE modeline dair literatürde rastlanan ampirik çalışmalardan bir tanesi Endonezya KOBİ'lerinde bulut bilişimin benimsenmesinin öncüllerini ve sonuçlarını bireysel faktörleri entegre ederek analiz eden bir çalışmadır (Aligarh ve diğerleri, 2023). Zhong & Moon (2023) ise Endüstri 4.0 teknolojisinin benimsenmesi, ürün inovasyonu ve süreç inovasyonu ile ilişkilendirilerek TOE tabanlı bir model oluşturmuşlardır. Literatürde TOE çerçevesini gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesini incelemek amacıyla kullanan başka bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışma gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'a geçişe etki eden faktörleri ortaya koyarak bu ülkelerin çağı yakalaması konusunda kamu ve özel sektördeki yöneticilere destek sağlayacaktır. Ayrıca TOE çerçevesini bu bağlamda kullanan ilk çalışma olarak akademik literatüre katkıda bulunacaktır.

Makalenin geri kalanında yöntem kısmında çalışmanın gerçekleştirilmesi aşamasında izlenen yöntem detaylı şekilde açıklanmıştır. Bulgular kısmında çalışmanın bulguları ortaya koyulduktan sonra tartışma kısmında TOE çerçevesi kullanılarak oluşturulan gelişmekte olan ülkelerde endüstri 4.0'ın benimsenmesine yönelik kavramsal model önerisi detayları ile tartışılmıştır. Sonuç kısmı ile de çalışma tamamlanmıştır.

## 2. YÖNTEM

Gelişmekte olan ülkelerin sanayisinde Endüstri 4.0'ın benimsenmesine etki eden faktörlerin tespit edilebilmesi amacı ile akademik yazında kabul görmüş olan iki önemli veri tabanı üzerinde sistematik literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Sistematik literatür taramasının ilk aşaması planlama aşamasıdır. Planlama aşamasında anahtar kelimeler olarak "Endüstri 4.0" ile birlikte IMF (IMF,2021)'nin gelişmekte olan ülkeler olarak belirttiği Arjantin, Brezilya, Şili, Çin, Kolombiya, Mısır, Macaristan, Hindistan, Endonezya, İran, Malezya, Meksika, Filipinler, Polonya, Rusya, Suudi Arabistan, Güney Afrika, Tayland, Türkiye ve Birleşik Arap Emirlikleri ülkelerinin isimlerinin kullanılarak her bir ülke için ayrı sorgu çalıştırılması planlanmıştır. Ayrıca sorgu yapılacak zaman aralığının Endüstri 4.0'ın ortaya atıldığı yıl olan 2011'den başlatılması, sadece makale türünde yayınların taranması ve yayın dilinin İngilizce olarak seçilmesi planlanmıştır. Çalışmanın gerçekleştirileceği akademik veri tabanları olarak akademik yazında yüksek derecede kabul görmüş olan Scopus ve Web of Science veri tabanları belirlenmiştir.

Sistematik literatür taramasının gerçekleştirilmesi 2023 yılının Mart ve Nisan aylarında yapılmıştır. Gerçekleştirme aşamasında öncelikle Scopus veri tabanında tarama yapılmıştır. Anahtar kelime araması ülke ismi

makalenin başlık, anahtar kelimeler ve öz kısmında, «Industry 4.0» kelimesi ise anahtar kelimeler ve öz kısmında aranacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra benzer bir arama Web of Science veritabanı üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Sistemik literatür taramasının son aşamasında ise ulaşılan yayınlar gözden geçirilmiş iki veri tabanında ortak olan ve farklı ülke sorgularından birden fazla dönen makaleler tespit edilerek veri setindeki mükerrerlikler giderilmiştir. Sonrasında makaleleri hızlı bir elemeye tabi tutmak amacı ile öz kısımları incelenmiştir. Aşağıdaki kriterleri sağlamayan makaleler çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır:

- İngilizce olmayan makaleler
- Endüstri 4.0'ın geneline değil de tek bir yıkıcı teknolojiye odaklanan makaleler.
- Teknik makaleler.
- Odak noktası Endüstri 4.0 olmayan makaleler
- Gelişmekte olan ülkeleri konu edinmeyen makaleler.
- Sadece bibliyometrik analiz içeren makaleler
- Yazarları tarafından geri çekilmiş olan makaleler.

Çalışmaya dâhil edilen makaleler daha sonra içerik analizi yöntemi ile incelenmiştir.

### 3. BULGULAR

Sistemik literatür taraması sonucunda çalışmaya 227 makale dahil edilmiştir. Çalışmanın hedeflerinden biri gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın benimsenmesine etki eden faktörlerin tespit edilmesidir. Bu amaçla çalışmaya dâhil edilen makalelerin her biri içerik analizi yöntemi ile incelenmiş ve gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın benimsenmesine etki edecek faktörler tespit edilmiştir.

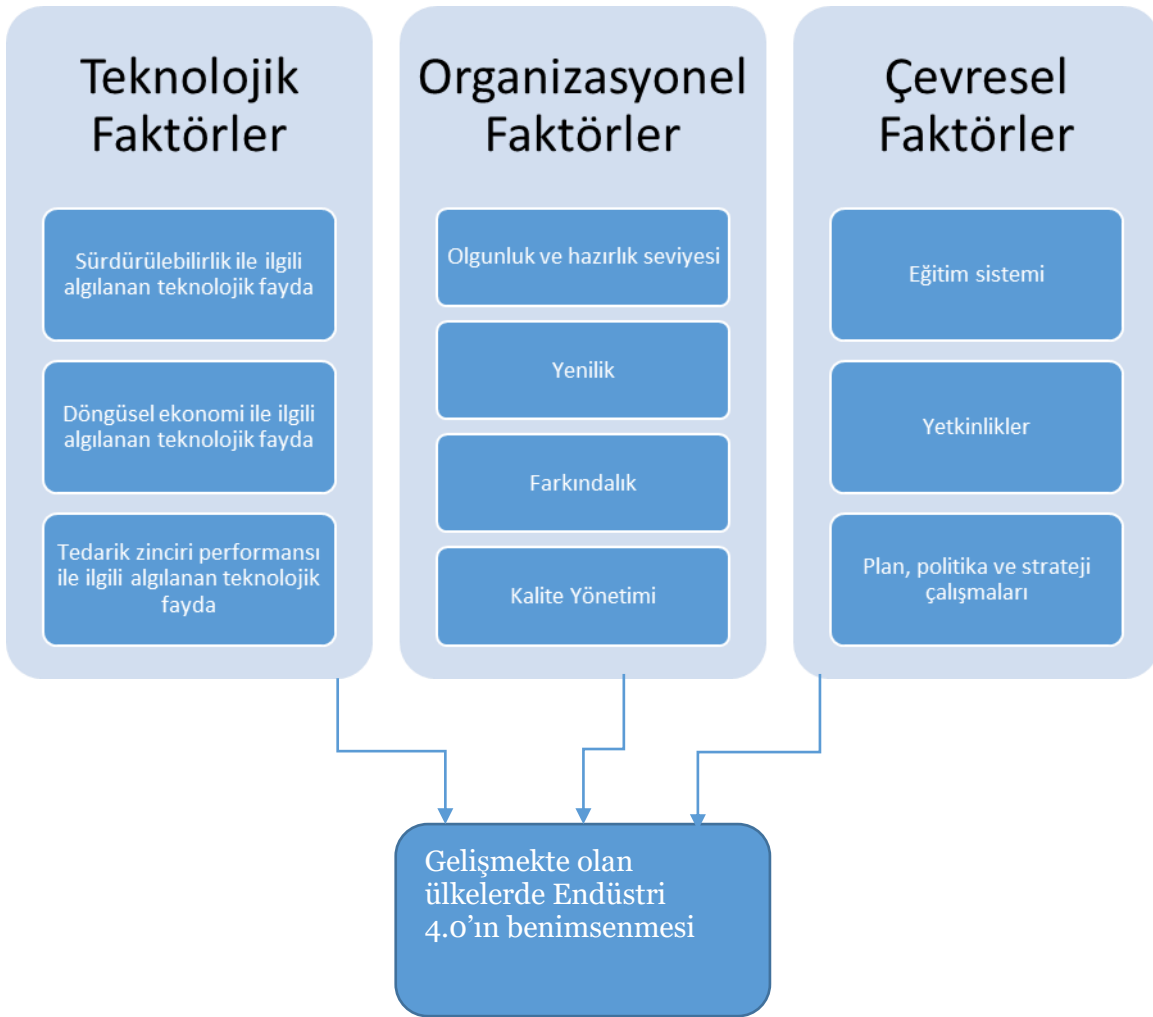
Makalelerin içerik analizi sonucunda gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesine etki eden on farklı faktör tespit edilmiştir. Bu faktörleri “sürdürülebilirlik”, “döngüsel ekonomi”, “tedarik zinciri”, “olgunluk ve hazırlık seviyelerinin tespiti”, “yenilik”, “farkındalık”, “kalite yönetimi”, “eğitim sistemi”, “yetkinlikler”, “plan, politika ve strateji çalışmaları” olarak saymak mümkündür.

Makalenin amaçlarından bir diğeri ülkelerde Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesine etki eden faktörlerin TOE çerçevesi kullanılarak modellenmesidir. TOE çerçevesi isminden de anlaşılacağı üzere yeni teknolojilerin organizasyonlar tarafından benimsenmesi sürecini teknolojik, organizasyonel ve çevresel bakış açısından inceler. Sistemik literatür taraması ve doküman analizi neticesinde tespit edilen on faktör nitelikleri bakımından uygun oldukları TOE kategorisinin altına yerleştirilmiştir.

Çalışmada “sürdürülebilirlik ile ilgili algılanan teknolojik fayda”, “döngüsel ekonomi ile ilgili algılanan teknolojik fayda”, “tedarik zinciri performansı ile ilgili algılanan teknolojik fayda” TOE çerçevesinin teknoloji kategorisi ile ilgili olarak tespit edilen faktörlerdir. “Organizasyonların olgunluk ve hazırlık seviyeleri”, “yenilik”, “farkındalık” ve “kalite yönetimi” faktörleri organizasyon kategorisi ile ilişkilidirler. “Eğitim sistemi”, “iş gücünün yetkinlikleri” ile “plan, proje ve strateji çalışmaları” ise organizasyon dışı faktörler olarak çevre kategorisi ile ilişkilendirilmişlerdir.

### 4. TARTIŞMA: TOE ÇERÇEVESİNDE GELİŞMEKTE OLAN ÜLEKLERDE ENDÜSTRİ 4.0'IN BENİMSENMESİNE YÖNELİK KAVRAMSAL BİR MODEL ÖNERİSİ

Literatürde teknolojinin edinimi ve yaygınlaşması konularında TOE çerçevesi kullanılarak gerçekleştirilmiş kavramsal model çalışmalarına sıkça rastlamak mümkündür (Dinçbaşı ve Yiğitbaşıoğlu, 2017). Her ne kadar TOE çerçevesi çeşitli bilgi teknolojilerinin organizasyon düzeyinde benimsenmesini incelemek için geliştirilmiş teorik bir çerçeve (Tornatzky ve diğerleri, 1990) olsa da yazarlar bir ülkenin yeni bir teknolojiyi benimseme sürecine etki eden faktörlerin de bu kavramsal çerçeve ile iyi şekilde analiz edilebileceğini öne sürmektedirler. Bir organizasyonu en genel hali ile iki veya daha çok kişinin bir amaç uğruna koordine edilmiş etkinlikleri ve güçleri olarak tanımlamak (Barnard,1938) mümkün olduğundan bir ülkeyi organizasyon olarak ele almak da mümkündür. Çalışma kapsamında gelişmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın benimsenmesine etki eden teknolojik, organizasyonel ve çevresel faktörler aşağıda paylaşılan şekilde tespit edilmiş ve Şekil-1'deki kavramsal model oluşturulmuştur.



Şekil 1- Önerilen kavramsal model.

#### 4.1. Teknolojik Faktörler

**Sürdürülebilirliğin Sağlanması Konusunda Algılanan Teknolojik Fayda:** Gelişmekte olan ülkelerde, Endüstri 4.0'a geçiş, yeni teknolojilerin kabulü ile oldukça bağlantılıdır. Endüstri 4.0'ın temel unsurları, dördüncü sanayi devrimini mümkün kılan yıkıcı teknolojilerdir. Bununla birlikte, bu yeni teknolojilerin benimsenmesi her zaman kolay değildir. Yeni teknolojilerin benimsenmesine etki eden iki temel faktörden biri teknolojinin sağladığı faydadır (Davis, 1989).

Sürdürülebilirliğin sağlanması teknoloji ile yakından ilgilidir. Birleşmiş Milletlerin sürdürülebilirlik ile ilgili

olarak hazırladığı eylem planı sürdürülebilirliğin ekonomik, sosyal ve çevresel tüm boyutlarını kapsamaktadır (Birleşmiş Milletler, 2015). Dijital dönüşüm bu planda doğrudan bir madde olarak yer alamasa da ortaya konulan hedeflerin sağlanması konusunda önemli bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır (Voza ve diğerleri, 2022).

Endüstri 4.0'ı sosyo-teknik bir kavram olarak kabul etmek mümkündür. Endüstri 4.0'ın sanayiye getirdiği dijital dönüşüm sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin uyumunu sağlayan bir platform işlevi görerek sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada toplumu ve sanayiye destekleyebilir (Podgórska, 2022).

Çevreye verilen zararı azaltabilmek için ülkeler karbondioksit emisyonlarını azaltmaya çalışmaktadırlar. Bunu sağlayabilmek için de çeşitli yeni teknolojilere ve temiz enerji kaynaklarına ihtiyaç duymaktadırlar (Gajdzik ve diğerleri, 2023). Sanayi firmaları sürdürülebilirlikle ilgili olarak çevresel gereksinimlere daha iyi uyum sağlamayı hedeflemektedirler. Bu bakımdan çevre yönetimi işletme yönetiminin temel bir unsurunu oluşturmaktadır (Gajdzik ve diğerleri, 2023). Yapılan çalışmalar Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanılmasının kullanılan enerji yoğunluğunu düşürdüğünü göstermişlerdir (Gajdzik ve diğerleri, 2023).

Bu sebeple;

*Önerme 1: Sürdürülebilirliğin sağlanması konusunda algılanan teknolojik fayda geliştirmekte olan ülkelerin Endüstri 4.0'ı benimsemesi üzerinde etkilidir.*

**Döngüsel Ekonominin Sağlanması Konusunda Algılanan Teknolojik Fayda:** Sanayide, üretim süreçleri boyunca büyük miktarda ham madde ve enerji tüketilir. Bu süreçlerin sonunda ortaya çıkan atıklar çevreyi olumsuz etkiler. Ayrıca, tedarik ve pazarlama aşamalarında kullanılan araçlar emisyon gazları salarak çevreyi kirletir (Khan ve diğerleri, 2022).

Firmaların dijitalleşmesi, karbon emisyonlarını azaltırken, artan enerji kullanımı nedeniyle sürdürülebilirlik açısından tehdit oluşturabilir. Bu olumsuz etkileri azaltmak için döngüsel ekonomi uygulamaları gereklidir (Voza ve diğerleri, 2022). Döngüsel ekonomi, sürdürülebilirliği artırarak lineer ekonomi süreçlerini dönüştürür. Endüstri 4.0 uygulamaları, döngüsel ekonomiye güç katar (Dongfang ve diğerleri, 2022).

Dijitalleşme, kaynak verimliliğini artırarak ve malzeme döngülerini daraltarak sürdürülebilir bir döngüsel ekonomiye geçişi hızlandırır. Bu süreç, dijitalleşme olmadan daha yavaş ilerler ve döngüsel iş modellerinin sayısı azalır. Bu da döngüsel ekonominin iklim hedefleri üzerindeki etkisini azaltır (Kurniawan ve diğerleri, 2022).

Endüstri 4.0'ın sunduğu ileri teknolojiler, kaynakları daha verimli kullanan döngüsel bir ekonomiye geçişi destekler. Pratikte, Endüstri 4.0 ve döngüsel ekonomi birbirlerini olumlu yönde etkiler (Abdul-Hamid ve diğerleri, 2021).

Buna dayanarak;

*Önerme 2: Döngüsel ekonominin sağlanması konusunda algılanan teknolojik fayda geliştirmekte olan ülkelerin Endüstri 4.0'ı benimsemesi üzerinde etkilidir.*

**Tedarik Zinciri Performansı Konusunda Algılanan Teknolojik Fayda:** İmalatın dijitalleşmesi ileri bilgi teknolojileri kullanılarak ürün, süreç ve kaynaklara ilişkin bilgilerin hızlı bir şekilde toplanmasını, analiz edilmesini, planlanmasını ve yeniden düzenlenmesini içerir. Bu sayede Endüstri 4.0, tüm tedarik zincirinin daha akıllı hale gelmesini sağlayarak, müşteri ihtiyaçlarına hızlı cevap verebilmeyi mümkün kılar (Yu ve diğerleri, 2021).

Tedarik zincirleri, ek maliyetleri en aza indirirken belirsizlikler ve değişikliklerle başa çıkabilmek için Endüstri 4.0'ın sağladığı çeviklik ve esneklik gibi özelliklerden yararlanmalıdır (Han ve diğerleri, 2021). Yatay ve dikey

entegrasyonlarla tedarik zincirleri içinde dijital bilgi paylaşımı, Endüstri 4.0'ın temel ön koşullarından biridir (Müller ve diğerleri, 2020). Özellikle COVID-19 salgını gibi olağanüstü dönemlerde, tedarik zincirlerinde yaşanan bozulmalara karşı Endüstri 4.0, perakendecilerin zorluklarla başa çıkmalarına yardımcı olacak önemli bir faktör olarak öne çıkar (Kumar, ve diğerleri, 2020). Dijitalleştirilmiş çözümler, firmalara iş operasyonlarında karar alma süreçlerinde yardımcı olurken, aynı zamanda iç ve dış değişikliklerle başa çıkmalarına ve rekabet ortamında başarılı olmalarına destek sağlar (Han ve diğerleri, 2021).

*Önerme 3: Tedarik zinciri performansı konusunda algılanan teknolojik fayda geliştirmekte olan ülkelerin Endüstri 4.0'ı benimsemesi üzerinde etkilidir.*

#### 4.2. Organizasyonel Faktörler

**Olgunluk ve Hazırlık Seviyesi:** Endüstri 4.0 bağlamında "hazır bulunurluk" terimi, bir organizasyonun bu dönüşüme ne kadar hazır olduğunu ifade eder (Ali ve diğerleri, 2022). Olgunluk modelleri, bir organizasyonun mevcut durumunu değerlendiren ve hedeflere ulaşmak için gereken adımları yapılandırılmış bir şekilde gösteren araçlardır (Bohórquez ve Herrera, 2022; Brodny ve Tutak, 2023; Stawiarska ve diğerleri, 2021).

Endüstri 4.0 gibi karmaşık kavramları benimsemeden önce, organizasyonlar kendi hazır olma düzeylerini ve mevcut olgunluk seviyelerini tespit etmelidir (Rahamaddulla ve diğerleri, 2021). Dijital dönüşüm sürecinde, uygun politikaları geliştirmek ve uygulamak için ülkenin dijital dönüşüm seviyesinin analiz edilmesi kritik önem taşır (Brodny ve Tutak, 2023).

Bu nedenlerle:

*Önerme 4: Gelişmekte olan ülkelerde işletmelerin, sektörlerin ve ülkelerin olgunluk ve hazırlık seviyelerinin tespit edilmesi Endüstri 4.0'ın benimsenmesine etki eder.*

**Yenilik:** 4. Endüstri Devrimi'nin yaşandığı günümüzde, ürün yaşam döngülerinin kısalması, yenilik temposunun hızlanmasını gerektirmektedir (Mubarak ve Petraite, 2020). Müşterilerin yeni ve özelleşmiş ürün talepleri, firmalar için pazar koşullarını zorlaştırmaktadır. Bu talepleri karşılamak amacıyla, firmalar üretim sistemlerinde yenilikçi yaklaşımlar benimseyerek kapasitelerini ve esnekliklerini artırabilirler. Öte yandan, kısa ürün yaşam döngülerinde yeniliklerin kalıcı olmayacağı düşünüldüğünde, yenilik süreçlerinin rutin hale getirilmesi ve tekrarlanabilir olması önemlidir. Yenilik, firmaların üretim süreçlerinde karşılaşılabilecekleri ani sorunların çözümünde önemli bir araçtır ve performanslarını iyileştirmek için yenilik yeteneklerini artırmalıdır. Ayrıca, yenilik ekonomik eşitsizliğin çözümüne katkıda bulunarak istihdamı destekler ve ekonomik gelişimin önünü açar (Rehman ve diğerleri, 2022).

Endüstri 4.0'ın temelini oluşturan yapay zeka gibi yıkıcı teknolojiler, işletmelere yenilik desteği sunarak yeni iş fırsatları yaratmalarına ve müşteri taleplerini karşılamada çeviklik kazanmalarına olanak tanır (Rehman ve diğerleri, 2022). Bir firmanın yalnızca iç kaynaklarına dayanarak yenilik performansını artırması zordur; bu nedenle firmalar, dış paydaşlarla iş birliği yapmaya ve açık yenilik stratejisi uygulamaya yönelmektedir (Mubarak ve Petraite, 2020). Süreçlerin hızla yeniden yapılandırılması, işletmelerin değişen piyasa koşullarına uyum sağlamasını kolaylaştıran açık işletme ve yenilik modellerinin oluşturulması ve tanıtılması gereklidir (Grabowska ve Saniuk, 2022).

Açık yeniliğin uygulanmasında karşılıklı güvenin sağlanması konusunda Endüstri 4.0'ın teknolojileri kritik önem taşır (Mubarak ve Petraite, 2020). Endüstri 4.0, imalat sürecinde tüm değer zinciri boyunca çözüm önerileri sunar. Bu gelişmiş teknolojilerin açık yenilikle birlikte kullanımı, firmalara üretim süreçlerini müşteri ihtiyaçlarına



göre uyarlarken düşük maliyet, yüksek kalite ve verimlilikten ödün vermeme imkânı tanır (Grabowska ve Saniuk, 2022). Mubarak ve diğerleri (2021), Endüstri 4.0'ın yeşil yenilik davranışını teşvik eden açık yeniliğe olumlu etkisini ortaya koymuştur.

*Önerme 5: Gelişmekte olan ülkelerde yenilik ve Endüstri 4.0'ın benimsenmesi arasında bir ilişki vardır.*

**Farkındalık:** Endüstri 4.0, müşterilerin sipariş ettiği çok özel ürünlerden, değer zincirlerine kadar üretimin her aşamasında ileri teknoloji BT çözümlerinin kullanılmasını destekler. Bu teknoloji bileşenlerinin kullanımı, karlılık, satış, üretim miktarı, kişi başına üretim, kapasite kullanım oranı, üretim hızı ve ürün kalitesi gibi kurumsal performans kriterlerini artırırken, üretim maliyetlerinde de önemli düşüşler sağlamaktadır (Duman ve Akdemir, 2021). Küresel ekonomideki dinamik değişimlere uyum sağlamak, Endüstri 4.0'ın sunduğu fikirlerin uygulanması ile doğrudan ilişkilidir. Bu dijital dönüşüme ayak uydurmak, küresel pazardaki rekabeti karşılayabilmek için ülkelerin hızla adapte olmalarını gerektirir (Brodny ve Tutak, 2023).

Gelişmekte olan ülkelerin endüstrileri de rekabet gücünü artırmak için zamanında dönüşüm geçirmeli ve gelişmelidir. Bu amaçla, yeni teknolojileri kabul etmek ve yenilik yapmak endüstri yapısını dönüştürebilir ve teknik seviyeyi yükseltebilir (Miao, 2022). Endüstri 4.0 teknolojisi sayesinde üretimin modernleştirilmesi, temel üretim ve kontrol süreçlerini optimize etmek, otomatikleştirmek, donanım verimliliğini artırmak, hammadde tüketimini ve üretim planlamasını iyileştirmek mümkündür (Makarov ve Khorosheva, 2019).

Siber fiziksel sistemler (CPS) ve Büyük Veri gibi Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanılması, şirketlere daha yüksek düzeyde lojistik hizmetler, ortaklarla daha verimli süreçler, geliştirilmiş iş birliği, daha iyi pazar ve finansal performans ile rekabetçilik gibi avantajlar sağlamaktadır. Verimli üretim süreçlerinin uygulanması ve artan üretkenlik, ekonomik sürdürülebilirlikle ilişkilendirilmektedir (Nagy ve diğerleri, 2018).

Ślusarczyk ve diğerleri (2020)'ne göre, üretimde verimlilik, ülkenin ekonomik durumundan bağımsız olarak ekonomik büyümenin önemli bir parçasıdır. Araştırma, üretim verimliliğindeki iyileşmenin ekonomik büyümenin bir sonucu olduğunu kısmen doğrulamıştır. Endüstri 4.0 konusundaki sınırlı bilgi, işletmelerin performansını farklı ekonomilerde önemli ölçüde etkilemektedir.

Dijitalleşmeyi benimsemek, kolay olmayan karmaşık bir görevdir (Rahamaddulla ve diğerleri, 2021). Firmaların, Endüstri 4.0'ın yenilikleri ile bu kavramın avantaj ve dezavantajlarından haberdar olmaları, dijitalleşme seviyesine ulaşmaları için gereklidir.

Rogers (1995)'a göre yenilikleri benimseme süreci daima farkındalık ve bilgi sahibi olma ile başlamaktadır. Bu durum Endüstri 4.0'ın getirdiği yenilikler için de farklı değildir.

Bu nedenlerle:

*Önerme 6: Gelişmekte olan ülkelerde farkındalık ve Endüstri 4.0'ın benimsenmesi arasında bir ilişki vardır.*

**Kalite Yönetimi:** Endüstri 4.0, işletmelerin teknolojilerinden ürettikleri ürün ve hizmetlere kadar iş yapış biçimlerini köklü bir şekilde değiştirmektedir. Bu nedenle, organizasyonlarda kalite yönetiminden sorumlu kişilerin bu dönüşümün dışında kalmaları mümkün değildir. Kalite profesyonellerinin, Endüstri 4.0'ın temel yönlerine hakim olmaları gerekmektedir ki bu sayede akıllı fabrikalardaki üretim ve genişletilmiş tedarik zincirlerinde kalite yönetimi etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Endüstri 4.0 çağında 5G, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve büyük veri analitiği gibi yıkıcı teknolojiler sayesinde kalite profesyonelleri, ihtiyaç duydukları verilere büyük miktarda ve gerçek zamanlı olarak erişebilirler. Bu

profesyonellerden beklenen, bu büyük veriyi kullanarak yenilikleri teşvik etmek ve kaliteyi artırmaktır (Ganjavi ve Fazlollahtabar, 2021). Bu görevlerini yerine getirebilmeleri için kalite profesyonellerinin büyük veri yorumlama, artırılmış gerçeklik araçlarını kullanma ve siber güvenlik riskleri konusunda bilgi sahibi olmaları gerekmektedir.

Ayrıca, sorunların kaynağını belirlemek için büyük veriyi kullanma, güvenilir veriye ulaşma ve karmaşık problemleri etkili bir şekilde çözmek için yeni araçları kullanabilme gibi metodolojik yetkinlikler de yeni kalite yönetimi anlayışında önem taşır. Gelişmiş tedarik ve satış zincirlerinde, tedarikçiler ve müşterilerle sanal ve merkezi olmayan bir ortamda iletişim kurarken gerekli liderlik becerileri de kritik öneme sahiptir. Bunun yanı sıra, esnek çalışma ortamlarına uyum sağlamak ve iş ile ilgili değişikliklere kolayca adapte olabilmek gibi kişisel yetenekler de kalite profesyonellerinin sahip olması gereken özelliklerdir (Kannan ve Garad, 2020).

Bu nedenlerle:

*Önerme 7: Gelişmekte olan ülkelerde kalite yönetimi ve Endüstri 4.0'ın benimsenmesi arasında bir ilişki vardır.*

### 4.3. Çevresel Faktörler

**Eğitim Sistemi:** Endüstri 4.0 kavramı, gelişmekte olan ülkelere ekonomilerini yenilik odaklı hale getirmeleri için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu süreçte gençler lokomotif rolü üstlenmektedir. Ancak, Tayland gibi ülkelerde genç işsizlik oranları yüksektir. Gençlerin, Endüstri 4.0 ile ilgili bilgi, iletişim teknolojileri ve yenilikçi yetkinliklerle donatılması gerekmektedir (Puriwat ve Tripopsakul, 2020). Eğitim sistemleri, bilim ve teknolojinin hızla ilerlemesiyle ortaya çıkan ekonomik ve sosyal değişimlere uyum sağlamalıdır (Sethakul ve Utakrit, 2019).

Endüstri 4.0'ın eğitim sektörü üzerinde de etkileri kaçınılmazdır. Yükseköğrenim, işgücüne bu yeni dönemin yetkinliklerini kazandırmada önemli bir platformdur (Kowang ve diğerleri, 2020). İşverenler, yeni mezunların Endüstri 4.0 ile ilgili tüm yetkinliklere üst seviyede sahip olmasını beklemektedir (Pattanapairoj ve diğerleri, 2021). Yükseköğrenim dışında, meslek okulları da bu sürece katkı sağlamaktadır. Meslek okulları ve üniversitelerdeki öğretmenlerin Endüstri 4.0 yetkinliğine sahip olmaları, eğitim hedeflerinin başarısı için kritiktir (Ana ve diğerleri, 2020; Ahuett-Garza ve diğerleri, 2022).

Bu ülkelerde üniversitelerden beklenen, Endüstri 4.0 ortamında çalışabilecek, dijital dönüşümü yönlendirecek becerilerle donanmış mezunlar yetiştirmektir (Mokhtar ve Noordin, 2019). Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde, yüksek nitelikli teknik personel ihtiyacı giderek artmaktadır. Çok disiplinli ekiplerde yer alacak lisans öğrencilerinin becerileri derinleştirilmeli ve güçlendirilmelidir (Salah ve diğerleri, 2020).

Yeniçağa ayak uydurmuş üniversitelerden mezun olanlar, güçlü temel kavramlara, teknik uzmanlığa, karmaşık problem çözme yeteneklerine, sosyal becerilere ve etik değerlere sahip, geniş bir bakış açısına sahip bireyler olmalıdır (Mokhtar ve Noordin, 2019).

Bu nedenlerle:

*Önerme 8: Gelişmekte olan ülkelerde eğitim sistemi ve Endüstri 4.0'ın benimsenmesi arasında bir ilişki vardır.*

**Yetkinlikler:** Endüstri 4.0, yalnızca yıkıcı teknolojilerle değil, aynı zamanda iş yaşamı ve çalışanlardan beklenen niteliklerdeki değişimle de ilgilidir (Plawgo ve Ertman, 2021). Bu kapsamda, sanayide gelişmiş robotların kullanımı gibi dönüşümler, iş gücü talebini doğrudan etkilemektedir (Węgrzyn, 2020). Dördüncü sanayi devrimi, çalışma ortamını ve iş profillerini dönüştürmekte, çalışanların yeni yetkinlikler kazanmalarını gerektirmektedir (Santoso ve diğerleri, 2021).

Endüstri 4.0'ın uygulanabilmesi için iş gücünün geleceğin nitelikleriyle donatılması önemlidir. Çalışanların gelişimi için hazırlanan planların, bu niteliklerin kazandırılmasına yönelik, uzun vadeli bir perspektifle oluşturulması gerekmektedir (Piwowar-Sulej, 2021).

Yeni yetkinliklere olan ihtiyaç, ancak yeni katılan bireylerin eğitilmesi ve mevcut iş gücünün becerilerinin güncellenmesiyle karşılanabilir. Endüstri 4.0'ın getirdiği değişim, özellikle düşük ve orta beceri gerektiren meslekleri etkilemektedir. Bu mesleklerde çalışan bireyler, yeni beceriler kazanmazlarsa işlerini kaybetme riskiyle karşı karşıya kalabilirler. Dolayısıyla, mevcut iş gücünün de yeni beceriler edinmesi son derece önemlidir (Avitia-Carlos ve diğerleri, 2022).

Günümüzün personelinin, uzmanlık alanlarının yanı sıra teknoloji, yenilik ve sürdürülebilir gelişim yeteneklerine de sahip olması gerekmektedir (Santoso ve diğerleri, 2021).

Endüstri 4.0 çağında, yöneticilerin de bazı liderlik yetkinliklerine sahip olmaları beklenmektedir. Temel gereklilik, bilgiyi organizasyonlarını başarıya taşıyacak şekilde birleştirmeleridir. Liderler, yıkıcı teknolojilerle uğraşırken dijital dünyada etkili bir şekilde gezinmelerini ve iletişim kurmalarını sağlayacak teknik ve dijital yeteneklere sahip olmalıdır (Kwiotkowska ve diğerleri, 2022).

Mevcut iş gücünün yetkinlikleri ile Endüstri 4.0'a uygun yetkinlikler arasındaki boşluk, gelişmekte olan ülkelerin ekonomik kalkınması için ciddi bir engel teşkil etmektedir. Bu boşluğun kapatılması, eğitim yoluyla mümkündür (Plawgo ve Ertman, 2021). İstenen yeteneklerin geliştirilmesi için aktörler arası iş birliğinin artırılması, ulusal sertifikasyon sistemlerinin hazırlanması veya mevcut olanların iyileştirilmesi ve çıraklık programlarına önem verilmesi etkili çözüm yolları olarak öne çıkmaktadır (Avitia-Carlos ve diğerleri, 2022).

Bu nedenle:

*Önerme 9: İş gücünün uygun niteliklerle donatılması geliştirmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın benimsenmesini etkiler.*

**Plan, Politika ve Strateji Çalışmaları:** Endüstri 4.0 ve yıkıcı teknolojiler, gelişmekte olan ülkelerin sanayi politikalarını yeniden değerlendirmelerini gerektirir (Romanova ve Kuzmin, 2020). İleri imalat pazarlarında ülkelerin konumlarını güçlendirmek veya optimize etmek, modern sanayi politikalarının temel zorluklarından biridir. Sanayinin sürekli gelişimi için kapsamlı bir sanayi politikası gereklidir (Simachev ve diğerleri, 2021).

Endüstri 4.0 programlarının, önemli endüstriyel sektörlerin küresel yapılarını köklü bir şekilde değiştirmesi beklenmektedir (Kuo ve diğerleri, 2019). Almanya gibi sanayisi Endüstri 3.0 seviyesinde olan ülkeler, Endüstri 4.0'a geçerken, sanayisi Endüstri 1.0-3.0 seviyesinde olan geliştirmekte olan ülkeler için bu geçiş daha karmaşık olabilir (Wang ve diğerleri, 2020).

Organizasyonların Endüstri 4.0'ı etkili bir şekilde uygulayabilmesi için, uygun hükümet politikalarına, yenilik modellerine ve stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır (Kuo ve diğerleri, 2019). Devletin rolü, yalnızca teknoloji sağlamakla sınırlı olmayıp, yenilik ve girişimcilik ekosistemlerinin gelişimini destekleyecek düzenlemeleri de içermelidir.

Devlet müdahalesi; bilginin yayılımını teşvik etmek, ekonominin işleyişini sürdürmek, çevrenin korunması ve kamu güvenliği gibi alanlarda kamu yararını gözetmek, ulusal ve uluslararası işbirliği ile ekonomik bütünleşmeyi teşvik etmek için gereklidir. Bu, adil rekabeti sağlamak amacıyla işbirlikçi rekabet mekanizmalarını da içerebilir.

Devletler, ekonomi, ticaret, sanayi, eğitim, işgücü ve yenilikçilik gibi alanlarda politikalar geliştirerek ve yeni

kurumlar oluşturarak bu hedeflere ulaşabilirler. Böylece, ulusal bilim ve teknoloji kaynaklarının bütünleşmesi ile Ar-Ge faaliyetleri güçlendirilir, endüstriyel rekabet gücü artırılır ve toplumsal ilerleme için bir itici güç oluşturulur (Kuo ve diğerleri, 2019).

Bu nedenlerle:

*Önerme 10: Plan, politika ve strateji çalışmaları geliştirmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın benimsenmesini etkiler.*

## 5. SONUÇ

Dördüncü endüstri devrimi başta gelişmiş ülkeler olmak üzere küresel düzeyde sanayiye her yönü ile değiştirmeye devam etmektedir. Her ne kadar temelinde gelişmiş teknolojilerin yarattığı değişim yatsa da Endüstri 4.0 adıyla anılan bu devrim sadece üretim teknolojileri ile sınırlı değildir. Üretim teknolojilerinin yanı sıra firmaların iş yapış biçimleri, tedarik ve üretim zincirleri de değişmektedir. Endüstri 4.0'ın devrimsel niteliği sadece sanayiye değil toplumu ve çevreyi de çeşitli yönlerden etkilemektedir.

Gelişmekte olan ülkeler rekabet güçlerini korumak ya da arttırmak için bu değişimi yakalamak zorundadırlar. Fakat geliştirmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın benimsenmesi ile ilgili dönüşüm sürecine özel sektör ve kamudaki yöneticilere iç görü sağlayacak yeterince çalışma bulunmamaktadır. Çalışmamızda bu boşluğu doldurmak amacı ile geliştirmekte olan ülkelerdeki Endüstri 4.0 yazını sistematik literatür taraması yöntemi ile taranmış ve geliştirmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesine etki eden faktörler Teknoloji-Organizasyon-Çevre kavramsal çerçevesi tabanında incelenmiştir.

Teknoloji-Organizasyon-Çevre kavramsal çerçevesi literatürde yeni teknolojilerin benimsenmesinin incelenmesi konusunda sıkça kullanılan kavramsal bir çerçevedir. Bu kavramsal çerçeveyi teknoloji, organizasyon ve çevre başlıklarının altına doldurarak genişletmek mümkündür.

Yapılan sistematik literatür taraması sonucu geliştirmekte olan ülkelerde Endüstri 4.0'ın benimsenmesine etki eden 10 faktör tespit edilmiştir. Bu faktörlerden “sürdürülebilirliğin sağlanması konusunda algılanan teknolojik fayda”, “döngüsel ekonominin sağlanması konusunda algılanan teknolojik fayda”, “tedarik zinciri performansı konusunda algılanan teknolojik fayda” teknolojik faktörler altında, “olgunluk ve hazırlık seviyelerinin belirlenmesi”, “yenilik”, “fatkıncılık”, “kalite yönetimi” organizasyonel faktörler altında, “eğitim sistemi”, “yetkinlikler”, “plan politika ve strateji çalışmaları” ise çevresel faktörler altında önerilen kavramsal modelde yer almıştır. Çalışmamızda önerdiğimiz kavramsal model geliştirmekte olan ülkeler kapsamında Endüstri 4.0 literatüründe bir ilktir. Çalışmanın kamu ve özel sektördeki yöneticiler açısından yön gösterici olması beklenmektedir.

Kavramsal modelin ampirik bir çalışma ile doğrulanmamış olması çalışmanın eksiği olarak görülebilir. Gelecekte yapılabilecek başka çalışmalarla modelin doğrulanması yapılabilir ya da tespit edilebilecek başka faktörlerle model daha da geliştirilebilir.

## ARAŞTIRMACILARIN KATKI ORANI BEYANI

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

## DESTEK VE TEŞEKKÜR BEYANI

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Ofisi tarafından desteklenmektedir. Proje numarası SDK-2023-11763'tür.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## KAYNAKÇA

- Abdul-Hamid, A. Q., Ali, M. H., Osman, L. H., & Tseng, M. L. (2021). The drivers of industry 4.0 in a circular economy: The palm oil industry in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 324, 129216.
- Ahuett-Garza, H., Urbina Coronado, P. D., Noriega Velasco, J., Díaz de León López, E., Markert, B., & Kurfess, T. R. (2022). Train the trainers in industry 4.0: a model for the development of competencies in non-synchronous environments. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 16(2), 775-789.
- Ali, K., Johl, S. K., Muneer, A., Alwadain, A., & Ali, R. F. (2022). Soft and hard total quality management practices promote industry 4.0 readiness: a SEM-neural network approach. *Sustainability*, 14(19), 11917.
- Aligarh, F., Sutopo, B., & Widarjo, W. (2023). The antecedents of cloud computing adoption and its consequences for MSMEs' performance: A model based on the Technology-Organization-Environment (TOE) framework. *Cogent Business & Management*, 10(2), 2220190.
- Ana, A., Kustiawan, I., Ahman, E., Zakaria, S., Muktiarni, M., Dwiyantri, V., ... & Kahoerunnisa, I. (2020). Defining vocational teacher competencies in industry 4.0 from the perspective of policymakers. *Journal of Engineering Education Transformations*, 34(Special Issue).
- Ávila Bohórquez, J. H., & Gil Herrera, R. J. (2022). Proposal and validation of an industry 4.0 maturity model for SMEs.
- Avitia-Carlos, P., Candolfi-Arballo, N., Rodríguez-Verduzco, J. L., & Rodríguez-Tapia, B. (2022). Conditions for the Development and Certification of Industry 4.0 Technical Competencies. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 17(4), 336-342.
- Brodny, J., & Tutak, M. (2023). Assessing the level of digital maturity in the Three Seas Initiative countries. *Technological Forecasting and Social Change*, 190, 122462.
- Cordero, D., Altamirano, K. L., Parra, J. O., & Espinoza, W. S. (2023). Intention to adopt industry 4.0 by organizations in Colombia, Ecuador, Mexico, Panama, and Peru. *IEEE Access*, 11, 8362-8386.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 319-340.
- Dinçbaş, T., & Yiğitbaşıoğlu, M. H. (2017). Sanayi Sektörü İçin "Teknoloji-Örgüt-Çevre Modeli" Temelli Yeni Bir Temiz Teknoloji Edinim Modeli Önerisi. *Verimlilik Dergisi*, (2), 39-74.
- Dongfang, W., Ponce, P., Yu, Z., Ponce, K., & Tanveer, M. (2022). The future of industry 4.0 and the circular economy in Chinese supply chain: In the Era of post-COVID-19 pandemic. *Operations Management Research*, 15(1), 342-356.
- Duman, M. C., & Akdemir, B. (2021). A study to determine the effects of industry 4.0 technology components on organizational performance. *Technological Forecasting and Social Change*, 167, 120615.
- Effoduh J. O., The fourth industrial revolution by Klaus Schwab, *The Transnational Human Rights Review*. (2016) 3.
- Gadekar, R., Sarkar, B., & Gadekar, A. (2022). Investigating the relationship among Industry 4.0 drivers, adoption, risks reduction, and sustainable organizational performance in manufacturing industries: An empirical study. *Sustainable Production and Consumption*, 31, 670-692.
- Gajdzik, B., Wolniak, R., & Grebski, W. W. (2023). Electricity and heat demand in steel industry technological processes in Industry 4.0 conditions. *Energies*, 16(2), 787.
- Ganjavi, N., & Fazlollahtabar, H. (2021). Integrated sustainable production value measurement model based on lean and six sigma in industry 4.0 context. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(6), 2320-2333.
- Grabowska, S., & Saniuk, S. (2022). Development of business models in the fourth industrial revolution: Conditions in the context of empirical research on worldwide scope companies located in Poland. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(2), 86.
- Han, L., Hou, H., Bi, Z. M., Yang, J., & Zheng, X. (2021). Functional requirements and supply chain digitalization in industry 4.0. *Information Systems Frontiers*, 1-13.
- Hwang, B. N., Huang, C. Y., & Wu, C. H. (2016). A TOE approach to establish a green supply chain adoption decision model in the semiconductor industry. *Sustainability*, 8(2), 168.

- IMF. (2021, June). The future of emerging markets. Retrieved from <https://www.imf.org> (Accessed: February 22, 2024).
- Kannan, K. S. P., & Garad, A. (2020). Competencies of quality professionals in the era of industry 4.0: a case study of electronics manufacturer from Malaysia. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 38(3), 839-871.
- Khan, S. A. R., Umar, M., Asadov, A., Tanveer, M., & Yu, Z. (2022). Technological revolution and circular economy practices: a mechanism of green economy. *Sustainability* 14 (8): 4524.
- Kowang, T. O., Bakry, M. F., Hee, O. C., Fei, G. C., Yew, L. K., Saadon, M. S. I., & Long, C. S. (2020). Industry 4.0 Competencies among Lecturers of Higher Learning Institution in Malaysia. *International Journal of Evaluation and Research in Education*, 9(2), 303-310.
- Kumar, M. S., Raut, R. D., Narwane, V. S., & Narkhede, B. E. (2020). Applications of industry 4.0 to overcome the COVID-19 operational challenges. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 14(5), 1283-1289.
- Kuo, C. C., Shyu, J. Z., & Ding, K. (2019). Industrial revitalization via industry 4.0—A comparative policy analysis among China, Germany and the USA. *Global transitions*, 1, 3-14.
- Kurniawan, T. A., Liang, X., O'Callaghan, E., Goh, H., Othman, M. H. D., Avtar, R., & Kusworo, T. D. (2022). Transformation of solid waste management in China: Moving towards sustainability through digitalization-based circular economy. *Sustainability*, 14(4), 2374.
- Kwiotkowska, A., Wolniak, R., Gajdzik, B., & Gębczyńska, M. (2022). Configurational paths of leadership competency shortages and 4.0 leadership effectiveness: an fs/QCA study. *Sustainability*, 14(5), 2795.
- León García, O. A., & Baez Landeros, E. R. (2020). Analysis of the relationship between IT and Industry 4.0 technologies with internationalization and business performance. *Ingeniería e Investigación*, 40(3), 89-99.
- Makarov, R. I., & Khorosheva, E. R. (2019). Salient aspects of the implementation of digital economics in glass plants in Russia. *Glass and Ceramics*, 75, 438-440.
- Miao, Z. (2022). Industry 4.0: technology spillover impact on digital manufacturing industry. *Journal of Enterprise Information Management*, 35(4/5), 1251-1266.
- Mokhtar, M. A., & Noordin, N. (2019). An exploratory study of industry 4.0 in Malaysia: A case study of higher education institution in Malaysia. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 16(2), 978-987.
- Mubarak, M. F., & Petraite, M. (2020). Industry 4.0 technologies, digital trust and technological orientation: What matters in open innovation?. *Technological Forecasting and Social Change*, 161, 120332.
- Mubarak, M. F., Tiwari, S., Petraite, M., Mubarik, M., & Raja Mohd Rasi, R. Z. (2021). How Industry 4.0 technologies and open innovation can improve green innovation performance?. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 32(5), 1007-1022.
- Müller, J. M., Veile, J. W., & Voigt, K. I. (2020). Prerequisites and incentives for digital information sharing in Industry 4.0—An international comparison across data types. *Computers & industrial engineering*, 148, 106733.
- Nagy, J., Oláh, J., Erdei, E., Máté, D., & Popp, J. (2018). The role and impact of Industry 4.0 and the internet of things on the business strategy of the value chain—the case of Hungary. *Sustainability*, 10(10), 3491.
- Pattanapairoj, S., Nitisiri, K., & Sethanan, K. (2021). A gap study between employers' expectations in thailand and current competence of master's degree students in industrial engineering under industry 4.0. *Production Engineering Archives*, 27(1), 50-57.
- Piwowar-Sulej, K. (2021). Human resources development as an element of sustainable HRM—with the focus on production engineers. *Journal of cleaner production*, 278, 124008.
- Plawgo, B., & Ertman, A. (2021). Competency needs of industry 4.0 companies. *Central European Management Journal*, 29, 172-195.
- Podgórska, M. (2022). Challenges and perspectives in innovative projects focused on sustainable industry 4.0—A case study on polish project teams. *Sustainability*, 14(9), 5334.
- Puriwat, W., & Tripopsakul, S. (2020). Preparing for Industry 4.0--Will Youths Have Enough Essential Skills?: An Evidence from Thailand. *International Journal of Instruction*, 13(3), 89-104.
- Rahamaddulla, S. R. B., Leman, Z., Baharudin, B. H. T. B., & Ahmad, S. A. (2021). Conceptualizing smart manufacturing readiness-maturity model for small and medium enterprise (sme) in malaysia. *Sustainability*, 13(17), 9793.

- Ramos, L., Loures, E., Deschamps, F., & Venâncio, A. (2020). Systems evaluation methodology to attend the digital projects requirements for industry 4.0. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(4), 398-410.
- Rehman, H. M., Yong, H. N. A., & Choong, Y. O. (2022). Facilitating the Malaysian manufacturing sector in readiness for Industry 4.0: A mediating role of organization innovation. *International Journal of Asian Business and Information Management (IJABIM)*, 13(1), 1-23.
- Rogers, E. M. (1995). *Diffusion of Innovations*. Fourth Ed. New York, United States: Free Press.
- Romanova, O. A., & Kuzmin, E. A. (2020). Industrial policy strategy: A case of changing national priorities in Russia. *WSEAS Transactions on business and economics*, 17, 879-888.
- Salah, B., Khan, S., Ramadan, M., & Gjeldum, N. (2020). Integrating the concept of industry 4.0 by teaching methodology in industrial engineering curriculum. *Processes*, 8(9), 1007.
- Santoso, W., Sitorus, P. M., Batunanggar, S., Krisanti, F. T., Anggadwita, G., & Alamsyah, A. (2021). Talent mapping: a strategic approach toward digitalization initiatives in the banking and financial technology (FinTech) industry in Indonesia. *Journal of Science and Technology Policy Management*, 12(3), 399-420.
- Sethakul, P., & Utakrit, N. (2019). Challenges and future trends for Thai education: Conceptual framework into action.
- Simachev, Y., Fedyunina, A., Yurevich, M., Kuzyk, M., & Gorodny, N. (2021). New strategic approaches to gaining from emerging advanced manufacturing markets. *Форсайт*, 15(3 (eng)), 6-21.
- Ślusarczyk, B., Tvaronavičienė, M., Haque, A. U., & Oláh, J. (2020). Predictors of Industry 4.0 technologies affecting logistic enterprises' performance: International perspective from economic lens. *Technological and economic development of economy*, 26(6), 1263-1283.
- Sony, M., Antony, J., Mc Dermott, O., & Garza-Reyes, J. A. (2021). An empirical examination of benefits, challenges, and critical success factors of industry 4.0 in manufacturing and service sector. *Technology in Society*, 67, 101754.
- Tornatzky, L.G.; Fleischer, M.; Chakrabarti, A.K. *Processes of Technological Innovation*; Lexington Books: Lanham, MD, USA, 1990.
- Voza, D., Szewieczek, A., & Grabara, D. (2022). Environmental sustainability in digitalized SMEs: comparative study from Poland and Serbia. *Serbian Journal of Management*, 17(1), 15-31.
- Wang, J., Wu, H., & Chen, Y. (2020). Made in China 2025 and manufacturing strategy decisions with reverse QFD. *International Journal of Production Economics*, 224, 107539.
- Węgrzyn, G. (2020). Structural changes in the manufacturing sector as an effect of implementing the concept of Industry 4.0. *Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geograficznego*, 34(4), 114-125.
- Zhong, Y., & Moon, H. C. (2023). Investigating the impact of industry 4.0 technology through a TOE-based innovation model. *Systems*, 11(6), 277.
- Zhou, X., Song, M., & Cui, L. (2020). Driving force for China's economic development under Industry 4.0 and circular economy: Technological innovation or structural change?. *Journal of Cleaner Prod.*