



Research Article

TÜRKİYE'DE ENDÜSTRİ 4.0'IN BENİMSENMESİNİN ÖNÜNDEKİ ENGELLERİN YORUMLAYICI YAPISAL MODELLEME (ISM) VE MICMAC İLE ANALİZİ

ANALYSIS OF THE BARRIERS TO INDUSTRY 4.0 ADOPTION IN THE REPUBLIC OF TURKEY WITH INTERPRETATIONAL STRUCTURAL MODELING (ISM) AND MICMAC

Adnan KARABULUT^{1*} | Mehmet BARAN²

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye, ORCID: 0000-0002-0643-098X

² Doç. Dr., Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6674-7308

Article Info:

Received : Dec 7, 2022

Revised : Jan 31, 2024

Accepted : Jul 1, 2024

Keywords:

Industry 4.0

Artificial Intelligence

Data

Sensor

Structural Modelling

Micmac Analysis

Anahtar Kelimeler:

Endüstri 4.0

Yapay Zeka

Veri

Sensör

Yapısal Modelleme

Micmac Analizi

DOI: 10.46238/jobda.1215803

ABSTRACT

Nowadays, Industry 4.0 has gained importance with digital technologies and Artificial Intelligence and reduces costs by enabling customized production, including three-dimensional production. It increases quality, ensures customer satisfaction and protects the environment. Industry 4.0 also transforms occupational health and safety, changing safety approaches. Despite all these positive advantages, there are still barriers in front of the applications of Industry 4.0. This study aimed to identify and analyze the potential barriers that will complicate the implementation of Industry 4.0 in the Republic of Türkiye. In this article, the word "Turkey" means the Republic of Turkey. After a comprehensive literature review, the opinions of industry experts were also taken and barriers were identified. These barriers were identified as production infrastructure, cost of installation, digital data protection, security procedures, data usage challenges, uncertain values of products, uncertainty of profit, lack of experienced workforce, production interruptions, resistance to change, government support, increased dependence on machinery, legislation and government policy. Interpretive structural modeling (ISM) and MICMAC analyzes were used to develop a hierarchical structure among the identified barriers. In addition, suggestions are made for businesses that will transition to Industry 4.0 in Turkey.

Öz

Günümüzde dijital teknolojiler ve Yapay Zeka ile önem kazanan Endüstri 4.0, üç boyutlu üretim de dahil olmak üzere kişiye özel üretimi mümkün kılarak maliyetleri düşürmektedir. Kalite arttırmakta, müşteri memnuniyetini sağlamak ve çevre korumaktadır. Endüstri 4.0 iş sağlığı ve güvenliğinde de dönüşümü sağlayarak güvenlik yaklaşımlarını değiştirmektedir. Tüm bu olumlu avantajlarına rağmen, günümüzde halen Endüstri 4.0'ın uygulamalarının önünde engeller bulunmaktadır. Bu çalışma, Türkiye Cumhuriyeti'nde Endüstri 4.0'ın uygulanmasını zorlaştıracak potansiyel engelleri tespit etmeyi ve analiz etmeyi amaçlamıştır. Bu makalede, "Türkiye" kelimesi, Türkiye Cumhuriyeti anlamına gelmektedir. Kapsamlı literatür taramasının ardından sektör uzmanlarının görüşleri de alınarak engeller belirlenmiştir. Bu engeller üretim altyapısı, kurulum maliyeti, dijital veri koruması, güvenlik prosedürleri, veri kullanım zorlukları, ürünlerin belirsiz değerleri, kâr belirsizliği, deneyimli işgücü eksikliği, üretim kesintileri, değişime direnç, devlet desteği, makinelere artan bağımlılık, mevzuat ve hükümet politikası olarak tespit edilmiştir. Tanımlanan engeller arasında hiyerarşik bir yapı geliştirmek için yorumlayıcı yapısal modelleme (ISM) ve MICMAC analizi kullanılmıştır. Ayrıca, Türkiye'de Endüstri 4.0'a geçiş yapacak işletmeler için önerilerde bulunulmuştur.

© 2024 JOBDA All rights reserved

*Corresponding Author,

E-mail: adnan.karabulut@hotmail.com

1 | GİRİŞ

Günümüzde artan rekabet sonucunda çevreye en az zarar veren ürün ve hizmetleri en iyi kalite ve minimum fiyatla tüketiciye sunmak bir zorunluluk haline gelmiştir. Doğal olarak, üretim sistemleri değişikliklere ayak uydurabilmek için esnek olmalıdır. Ancak esnek üretim için verinin hızlı toplanıp değerlendirilmesi gibi zorluklar bulunmaktadır. Dijital gelişim ile gündeme gelen Endüstri 4.0 söz konusu zorluklar için bir çözümdür ancak işletmelerin ve kamu kurumlarının çoğunda farkındalık düşük düzeydedir. Endüstri 4.0 ile kişiye özel üretim dahil seri üretim yapabilmek dijitalleşmeyi gerektirmektedir (Vaidya vd., 2018). Dijitalleşme ile üretim verileri daima güvende tutulmakta, hatalı ürün oranı azaltılmakta ve daha etkili tasarım yapılarak müşteri memnuniyeti artırılmaktadır. Nesnelerin internetiyle (IoT), kablolu veya kablosuz tüm üretim araçları birbirine bağlanarak insan emeği en aza indirilmektedir. Otonom robotlar sayesinde tehlikeli işler çalışanlar tarafından yapılmamakta, sanal ve artırılmış gerçeklik ile üç boyutlu üretim yapılabilen, tehlikeler öngörülebilir.

Endüstri 4.0'da kullanılan teknolojiler, fiziksel dünyayı dijital dünya ile birleştirmektedir (Kamble vd., 2018). Endüstriyel süreçlerin dijitalleştirilmesiyle üretim aşamaları ve proses verileri tamamen dijital ortamda takip edildiğinden, işveren ve müşteri arasında karşılıklı veri paylaşımı ve iletişimi hızlanmaktadır. Endüstri 4.0 akıllı fabrikalarda üretim maliyetlerini düşürülmektedir (Mouef vd., 2019). Akıllı fabrikalar, Endüstri 4.0 ile sağlanacak olup, yoğun şekilde dijitalleşmeyi içerecektir ancak müşteri ile iletişim tamamen kesilmemeli ve tüketiciler için güven sağlanmalıdır. Akıllı fabrikalarla daha iyi entegrasyon sağlanacağından, sürdürülebilirlik yeteneği artacaktır. Akıllı fabrikaların temelinde akıllı olarak nitelenen nesnelere, ağlar, sayaçlar ve sensörler olduğundan gerçek zamanlı veri takibiyle üretim maliyetleri düşürülmekte, iş kazaları ve meslek hastalıkları önlenmektedir.

Endüstri 4.0, şirketlerin araştırma ve geliştirme hususları başta olmak üzere üretim ve idari karar alma biçimlerini değiştirmiştir (Kagermann vd., 2013). Rekabetin fazla olduğu günümüzde, işletmelerin çevik bir yapıda olmaları gerekmektedir. Bu çeviklik değişimlere ani ve esnek şekilde cevap vermeyi sağlayacaktır. Endüstri 4.0, siber-fiziksel sistemleri (SFS) kullanmaktadır. SFS'ler, fiziksel bir mekanizmanın bilgisayar tabanlı algoritmalar tarafından kontrolüdür. Akıllı sistemler olan telefonlar, sensörler, şebekeler, otonom sistemler, tıbbi izleme, proses kontrol sistemleri, robotik ve otomatik pilot sistemleri SFS örnekleridir. Büyük veri teknolojileri Endüstri 4.0 için önemli bir husustur (Frank vd., 2019). Dijital ortamda üretilen veriler bir çığ gibi büyümektedir.

Büyük veri, internete girilen veriler, sensör ve kameralardan toplanan veriler, internette yapılan beğeniler ve anketler ile elde edilmektedir. Bulut bilişim, IoT ve SFS'ler veri toplamayı hızlandırmaktadır. Çağımız büyük veri çağıdır. Yatırımcılar, teknoloji girişimcileri, medya ve danışmanlık şirketleri son yıllarda büyük veriye yatırımlar yapmaktadır. Endüstri 4.0 ile artırılmış gerçeklik uygulamaları önem kazanmıştır (Rejeb vd., 2021). Birçok uluslararası marka, son yıllarda artırılmış gerçekliğe yatırım yaparak ürünlerinin tanıtımını, interaktif bir şekilde yapmaktadır. Simülasyon, Endüstri 4.0'da ürün tasarımı için çok önemlidir (Wang vd., 2016). Üreticiler simülasyon yazılımı ile ürünleri gerçeğe en yakın şekilde tasarlayabilirler. İşletmelerin, rekabet için, Endüstri 4.0 dönüşümünü gerçekleştirmeleri önemlidir. İşletmeler, üretim süreçleri kapsamında Endüstri 4.0'a dönüşümlerinde, finansal kaynaklara, yetişmiş işgücüne ve dijital teknolojilere ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca Yapay Zekâ (YZ), dijital teknolojiler için önemli hale gelmiştir.

1.1. Yapay Zekâ ve Endüstri 4.0

YZ, Endüstri 4.0'ın bir bileşenidir. Endüstri 4.0 ile hedeflenen hızlı ve seri üretim ancak YZ dahil dijitalleşme ile mümkündür. Otonom sistemler olmadan bu dönüşümü sağlamak mümkün değildir. YZ, Endüstri 4.0'da yeni anlayışlar sunmaktadır (Sahu vd., 2021). Ses, görüntü ve metin verileri YZ ile işlenebilmektedir. YZ, kullanıcılara önerilerde bulunmakta, çeviri ve tahmin çalışmaları yapmaktadır. Üretim süreçlerindeki iş kazaları ve meslek hastalıkları YZ ile önlenmektedir. Ancak üretimdeki dijital teknolojiler henüz olgunlaşmadığından üreticiler için zorluklar bulunmaktadır. Bu nedenle entegrasyon önemlidir ve Endüstri 4.0 tartışmalarının merkezinde yer almaktadır (Kiraz vd., 2020). Entegrasyonun kolay ve hızlı bir şekilde aşılabilmesi için Endüstri 4.0 engellerinin bilinmesi önemlidir. Standardizasyon, siber güvenlik (Kiel vd., 2017), eğitim (Sony;Subhash,2020) ve değişime direnç (Karadayi; Usta., 2019) çözülmesi gereken diğer konulardır.

Endüstri 4.0'ın önündeki engelleri ampirik bir yaklaşımla analiz eden çalışmalar önemlidir. Literatürde SWOT analizi ile engellerin olumlu ve olumsuz etkilerini belirleyen çalışmalar bulunmaktadır (Calabrese vd., 2021). Ancak her ülkenin koşulları farklı olduğu için ortak temaların bulunması uzun zaman almaktadır. Günümüzde YZ ve Endüstri 4.0 iç içe geçmiş durumdadır. YZ teknolojileri sağlık, eğitim ve lojistik başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Sektörlerde kullanılan YZ teknolojileri ile Endüstri 4.0'a geçiş kolaylaşmıştır. Standartların eksikliği ve hükümet düzenlemeleri gibi uzun vadeli engellere rağmen işletmeler Endüstri 4.0'a geçişe dikkat etmelidir (Raj vd., 2020). Bu geçişte,

işletmelerin mümkün olduğunca YZ teknolojilerinden faydalanması gerekmektedir. Literatürde bu geçiş kapsamında çalışmalar yapılmaktadır. Bir çalışmada engellerin önem sırası belirlenmiştir (Singh; Bhanot, 2019). Başka bir çalışmada ise blockchain teknolojisi gibi konular özel olarak ele alınmaktadır (Mathivathanan vd., 2021). Endüstri 4.0, sadece iş teknolojilerini (Flatt vd., 2016) değil aynı zamanda iş organizasyonlarını da değiştirmektedir (Ghadge vd., 2020).

1.2. Endüstri 4.0'da İş Organizasyonu

Endüstri 1.0'da (su ve buhar kullanımı), Endüstri 2.0'da (elektrik kullanımı) ve Endüstri 3.0'da (dijitalizasyon) iş organizasyonları değiştiği gibi, Endüstri 4.0'da da değişecektir. Bu nedenle, Endüstri 4.0'ın iletişim ve işletme yönetimi tanımlarını değiştirmesiyle, sürdürülebilir iş organizasyonları önem kazanmıştır. Son yıllarda Endüstri 4.0 kavramı ile birlikte iş modelleri de değişmiştir (Cozmiuc vd., 2018). Endüstri 4.0, üretimde dijitalleşmeyi getirdiği için SFS ile çalışan akıllı fabrikaların sayısı artacaktır. %100 dijital üretim mümkün olmasa da el emeği azalmakta ve dijital okuryazarlığın önemi artmaktadır. Endüstri 4.0, hammadde tedarikinden, ürün teslimatına kadar tüm işlemleri değiştirmektedir. Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmelerin bu değişimi hızlandırması beklenmektedir ki lietartürde bu konuya değinen çalışmalar (Liu vd., 2021; Fuller vd., 2020; Yun vd., 2020; Ren vd., 2018; Moghaddam vd., 2018; Errandonea vd., 2020) bulunmaktadır. Daha yüksek kalite ve kişiye özel üç boyutlu üretimi başarmak için Endüstri 4.0 kapsamında sağlıklı bir veri sistemi ve en uygun YZ teknolojilerinin seçilmesi gerekecektir.

1.3. Endüstri 4.0'da Dijital İkiz

Endüstri 4.0, dijital ürünler anlamına gelir ve Dijital İkiz, Endüstri 4.0'ın merkezidir. Kaliteli bir ürün için dijital ortamda tasarım önemlidir. Ürünün fiziksel olarak üretilmeden önce dijital olarak kopyalanmasına Dijital İkiz denir. Akıllı ve IoT sensörlerinden gelen verilerin, Dijital İkiz'de üretim için kullanımı kapsamında Literatürde çalışmalar (Rojek vd., 2020; Ho, vd., 2021; Hsu vd, 2019; Negri vd., 2017; Mandolla, vd., 2019; Opoku, vd., 2021; Rasheed vd., 2020; Kritzinger vd., 2018) bulunmaktadır. Dijital ikiz terimi, 2002 yılında Michigan Üniversitesi'nde ortaya çıkmıştır. Otomotiv, meteoroloji, havacılık, inşaat, sağlık gibi birçok sektörde kullanılan Dijital İkiz, eğitim ve akıllı şehir tasarımı da kullanılmaktadır.

Dijital ikiz sürdürülebilir üretim sağlamaktadır. Veri toplama ve bilgiye dönüştürme süreci olan simülasyon, dijital ikiz için önemlidir. Simülasyon teknikleri, havacılık, inşaat, otomotiv ve petrol endüstrileri gibi birçok endüstride onlarca yıldır kullanılmaktadır (Spalart ve Venkatakrishnan, 2016; AbouRizk, 2010; Rodriguez vd., 2021; LAGrange, 2019). Dijital ikiz,

gerçek zamanlı simülasyon, bakım tahmini, sanal devreye alma, proses endüstrisi gibi uygulamalarda da kullanılmaktadır (Fotland vd., 2020; Scheifele vd., 2019; Lee vd., 2019; Braaksma vd., 2011). Dijital ikizlerin kullanımı son yıllarda kimya, çelik, tekstil gibi proses endüstrilerinde de yaygınlaşmaktadır (Zhou vd., 2019; Kockmann, 2019; Pfeiffer vd., 2019; Uhlemann vd., 2017). Nisan 2018'de Almanya'da düzenlenen ProcessNet Sempozyumu'nda, proses endüstrisinin dijitalleşmesi tartışılmış ve sonuçlar on iki tezde açıklanmıştır. Tezlerde büyük veri ve YZ'nin dijital ikiz için önemi vurgulanmıştır.

Dijital İkiz kavramı Endüstri 4.0 üretiminin temelini oluşturmaktadır (Barreto vd., 2017). SFS'ler, fiziksel bir mekanizmanın bilgisayar tabanlı algoritmalar tarafından otonom kontrolüdür ve sensörlere dayanmaktadır. Fabrikalarda ve hizmet işletmelerinde sensörler tarafından toplanan veriler, IoT ile SFS'lere aktarılmaktadır. SFS'ler, üretimde dijital ve fiziksel dünyayı bütünleştirmektedir (Pereira ve Romera, 2017). Nihayetinde Endüstri 4.0, büyük veri, IoT ve YZ'yi bir arada kullanarak ekonomik ve sosyal faydaları maksimize etmektedir (Tjahjono vd., 2017; Kagermann vd., 2013).

1.4. Mevcut Çalışmanın İçeriği

Bu çalışmada, Türkiye'deki üreticiler için Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde oluşabilecek engellerin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma, Türkiye imalat sanayi için Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesinin önündeki engellerin önem sırasına göre seviyelendirmesini içermekte ve literatür boşluğunu doldurması beklenmektedir. 18 Eylül 2019 tarihli Türkiye Sanayi ve Teknoloji Strateji Belgesinde, Endüstri 4.0'ın önemi vurgulanmıştır. Bu nedenle karşılaşılabilecek engellerin, zorluklarına göre seviyelendirilmesi önemlidir. Engeller arasındaki ilişkilerin analizi için Yorumlayıcı Yapısal Modelleme (ISM - Interpretive Structural Modeling) ve Çapraz Çarpmanın Matris Etkisi (MICMAC- Matrix Effect of Cross Multiplication) analizleri kullanılmıştır.

Bu analizler ile yöneticilere ve politika yapıcılara engelleri aşmaları için önerilerde bulunmak amaçlanmıştır. Bu çalışmanın literatüre katkısı, Türkiye'nin önündeki Endüstri 4.0 engellerini önem sırasına göre belirlemek ve aralarındaki hiyerarşik ilişkileri saptamak olacaktır. Türkiye'deki sanayiciler, üretimlerini Endüstri 4.0'a uyarlamak için belirli stratejiler belirlemelidir.

Bu stratejilerin belirlenmesi ise Endüstri 4.0'ın uygulanmasının önündeki engellerin aralarındaki ilişkilerin analiz edilmesi ile mümkündür.

Endüstri 4.0 engellerinin tespiti için yapılan literatür taramasının sonuçları bu çalışmanın ikinci bölümünde verilmiştir. 3. bölümde, araştırma yöntemi (metodolojisi) açıklandıktan sonra değerlendirici bilgileri verilmiş ve ardından ISM ve MICMAC analiz sonuçları açıklanmıştır. 4. bölüm bulgulara, 5. Bölüm sonuç ve önerilere ayrılmıştır.

2 | LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmanın giriş bölümünde Endüstri 4.0 kapsamında YZ ve gerekli iş organizasyonu ile üretim tasarımı adı verilen Dijital İkiz hakkında bilgiler verilmiştir. Endüstri 4.0'daki temel amaç, dijital dönüşüm ile akıllı fabrikalar oluşturmak ve üretim maliyetlerini azaltmaktır. Kullanılan gerçek zamanlı veri takibi ve üretim hattına gömülü SFS'ler sayesinde, insan müdahalesi azalmaktadır (Ghobakhloo, 2020). Böylece iş kazaları ve meslek hastalıkları azalmakta, çevre daha az kirlenmekte ve düşük maliyetle kaliteli üretim sağlanmaktadır. Endüstri 4.0'ın akıllı fabrikaları, üretimde otonom robotlar kullanmaktadır. Simülasyon, entegre sistemler, IoT, siber güvenlik, bulut bilişim, katmanlı üretim, artırılmış gerçeklik ve büyük veri kullanımı sayesinde ürün kalitesinde ve çevre korumada şeffaflık daha da artacaktır. Bu nedenle Endüstri 4.0 konseptinde geri bildirim, yasal düzenlemeler ve kontrol faaliyetleri önem kazanmaktadır (Dalmarco; Barros, 2018).

Literatürde, Endüstri 4.0'ın olgunluğunu değerlendirmeye yönelik ampirik çalışmaların yanı sıra, Endüstri 4.0'a geçişte bilgi ve dijital teknolojilerin modellenmesi ve uygulanmasındaki zorluklarla ilgili çalışmalar bulunmaktadır (Dalenogare vd., 2018; Schumacher vd., 2016; Ghobakhloo, 2020; Frank vd., 2019). İşletmelerin, Endüstri 4.0'a geçiş kapsamında, teknik uygunluk çalışmalarının yanı sıra iş ilişkilerini inceleyen çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, IBA Global İstihdam Enstitüsü 2017 çalışmasında, YZ'ının küresel işgücü piyasası üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada, Endüstri 4.0 kapsamında çalışma saatlerinin ücretlere ve çalışma ortamına etkileri, yeni istihdam biçimleri ile çalışma ilişkileri incelenmiştir (Wisskirchen vd., 2017).

Tedarik zinciri yönetiminde, büyük verinin önemi (Wang vd., 2016) ve IoT kullanımının sınırları (Ben-Daya vd., 2019) Endüstri 4.0 geçişinde teknik uyum kapsamında önemli hususlardır. Çünkü tedarik zinciri, hammadde tedarikinden ürünün tüketiciye ulaştırılmasına kadar olan tüm süreçleri içermektedir. Endüstri 4.0 sistemi verileri otonom olarak kullandığından, üretim süreçleri ve ürün özellikleri ile ilgili tüm bilgilerin makine hafızalarında olması gerekmektedir. SFS'ler akıllı fabrikalarda otonom çalışmayı sağlamaktadır (Tjahjono vd., 2017). Endüstri 4.0, Radyo Frekanslı Tanımlama (RFID), Kurumsal Kaynak Planlama (ERP), IoT ve bulut tabanlı üretim gibi birçok teknolojiyi içermektedir (Lu, 2017). Endüstri 4.0'da işçiler ve robotlar birbirine bağlı ağlar

ve gömülü SFS üzerinden çalıştıkça verimlilik artar, çevre korunur, iş kazaları ve meslek hastalıkları önlenir. Günümüzde çok çok az kullanılan üç boyutlu baskı üretimi de mümkün olacaktır (Rengier vd., 2010).

Endüstri 4.0'a başarılı bir geçiş için ayrıntılı bir stratejik yol haritası önemlidir (Ghobakhloo, 2018). Ancak bu stratejik yol haritasında her aşama ve ilgili maliyetler sürdürülebilirlik etrafında belirlenmelidir. Endüstri 4.0 ve ilgili kavramlar son zamanlarda tartışılmaktadır (Frederico vd., 2019). Şirketlerin, başarılı bir Endüstri 4.0 geçiş planı yapabilmeleri için, iç ve dış pazar kapsamında olgunlaşmaları gerekmektedir. Ayrıca tedarik zincirlerinde Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesi gerekmektedir (Dalmarco ve Barros, 2018). Öncelikle, tedarik zincirindeki tüm tarafların IoT ve bulut bilişim yoluyla bilgilerini paylaşması gerekmektedir. Çünkü ekonomik döngüde eksik bilgi her zaman tedarik zincirindeki taraflara zarar verecektir. Türkiye'deki sanayiciler, yeni paradigma olan Endüstri 4.0'a geçişteki zorlukların farkında olmalı ve bu zorlukları aşabilecek kapasiteye ulaşmalıdır (Suresh vd., 2018).

Literatürde, Endüstri 4.0'ın uygulama alanlarının önündeki engellerin analizi için DEMATEL, ISM, AHP, BWM gibi çok kriterli karar verme teknikleri kullanılmaktadır (Raj vd., 2020; Moktadir vd., 2018). Endüstri 4.0 engellerini analiz eden birçok çalışma bulunmaktadır. Bir çalışmada, bu engellerin zayıf değer zinciri, siber güvenlik, ekonomik belirsizlik, deneyimli işgücü eksikliği, yüksek yatırım maliyeti, altyapı eksikliği, iş kesintileri, veri yönetimi zorlukları, standartlar ve değişime direnç olduğu tespit edilmiştir (Raj vd., 2020). Bir başka çalışmada ise bu engeller yüksek uygulama maliyeti, sistemler hakkında bilgi eksikliği, siber güvenlik, veri gizliliği sorunları, vasıfsız işgücü, süreçle birlikte organizasyonel değişiklikler ve istihdam kesintileri olarak belirlenmiştir (Kamble vd., 2018). Her ne kadar ortak engeller olsa da, literatür araştırmalarında farklı engellerin de olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların nedeni, her ülkenin sanayileşme sürecinin farklı olmasıdır. Mevcut çalışmada, Türkiye'nin koşulları dikkate alınarak, Türkiye'de Endüstri 4.0'ın uygulanmasının önündeki engellerin belirlenmesi için literatür sistematik olarak gözden geçirilmiş ve çeşitli sektörlerden uzmanlarla görüşülmüştür.

2.1. Endüstri 4.0 Uygulama Engelleri

Endüstri 4.0 ile ilgili engeller kapsamında literatür incelendiğinde, engellerin teknik ve diğer engeller olarak ikiye ayrıldığı görülmektedir. Maliyet, deneyimli işgücü, dijital altyapı, güvenlik ve veri konuları teknik kapsamda değerlendirilirken, değişime direnç, kâr ve değer belirsizliği, yasal düzenlemeler ve devlet politikaları diğer engeller kapsamında kalmaktadır. Literatürdeki engelleri analiz eden çalışmalarda (Kamble vd., 2018; Raj vd., 2020) ortak engeller yanında farklı engellerin olmasının nedenleri,

sanayileşme süreci, mevcut koşullar, yöneticiler için deneyim ve algı düzeyleridir.

Mevcut çalışmada, literatürde Endüstri 4.0 ile ilgili en uygun 32 makale gözden geçirilmiştir. Türkiye'de farklı sektörlerden uzmanların görüşleri de alınarak ondört engel belirlenmiştir (Tablo-1). Tablo 1 incelendiğinde, dijital altyapı (B1), yatırım maliyeti (B2), dijital veri koruma (B3), siber güvenlik (B4), dijital veri kullanım zorlukları (B5), deneyimli iş gücü (B8) ve değişime

direnç (B10) literatür çalışmalarında ortak engeller olarak tespit edilmiştir.

Diğer engeller de literatürde görülen engellerdir. Bunlar, değer ve kâr belirsizliği, üretim kesintileri, devlet desteği, makinelere bağımlılık, mevzuat ve devlet politikası olup B6, B7, B9, B11, B12, B13, B14 ve B15 olarak kodlanmıştır. Tespit edilen ondört engelin literatür kaynağı Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Endüstri 4.0'ün Benimsenmesinin Önündeki Engeller

Bariyer (B) kodu	Bariyer ismi	Literatür desteği
B1	Altyapı	(Kamble vd., 2018); (Schröder. 2016); (Kumar, 2021);(Moktadir vd., 2018);(Glass vd., 2018);(Müller, 2019);(Chauhan vd., 2021);(Wankhede vd., 2021);(Mjumdar vd., 2021);(Cugno vd., 2021);(Elhussiny vd., 2022)
B2	Maliyet	(Kamble vd., 2018);(Yadav vd., 2017); (Schröder. 2016); (Kumar, 2021);(Khan vd., 2016);(Glass vd., 2018);(Müller, 2019);(Horvath vd., 2019);(Wankhede vd., 2021);(Mjumdar vd., 2021);(Cugno vd., 2021);(Elhussiny vd., 2022)
B3	Verilerin korunması	(Kamble vd., 2018); (Moeuf vd., 2020);(Raj vd., 2020);(Aggarwal vd., 2019);(Thoben vd., 2017);(Wang vd., 2016);(Horváth vd., 2019);(Mjumdar vd., 2021);(Cugno vd., 2021);(Kumar vd., 2021);(Elhussiny vd., 2022)
B4	Güvenlik prosedürleri	(Raj vd., 2020);(Thoben vd., 2017);(Schröder. 2016);(Glass vd., 2018);(Horváth vd., 2019);(Müller, 2019);(Wankhede vd., 2021);(Cugno vd., 2021);(Kumar vd., 2021)
B5	Veri kullanım zorlukları	(Khan vd., 2016);(Glass vd., 2018);(Müller, 2019);(Horvath vd., 2019);(Wankhede vd., 2021);(Cugno vd., 2021);(Sarkar vd., 2021);(Elhussiny vd., 2022)
B6	Değer belirsizliği	(Kamble vd., 2018);(Suresh vd., 2018);(Raj vd., 2020);(Suresh vd., 2018);(Zhou vd., 2015);(Xu vd., 2018);(Glass vd., 2018);(Müller, 2019);(Horvath vd., 2019);(Cugno vd., 2021)
B7	Kâr belirsizliği	(Kamble vd., 2018);(Raj vd., 2020);(Schröder vd., 2016);(Glass vd., 2018);(Horvath vd., 2019);(Cugno vd., 2021);(Kumar vd., 2021)
B8	Deneyimli işgücü eksikliği	(Kamble vd., 2018);(Machado vd., 2019);(Schröder. 2016);(Kamble vd., 2019);(Glass vd., 2018); (Horvarthvd., 2019);(Kumar vd., 2021);(Wankhede vd., 2021);(Mjumdar vd., 2021);(Cugno vd., 2021);(Sarkar vd., 2021)(Elhussiny vd., 2022)
B9	Üretim kesintileri	(Kamble vd., 2018);(Raj vd., 2020);(Moktadir vd., 2018);(Kergroach. 2017);(Mjumdar vd., 2021);(Kumar vd., 2021)
B10	Değişime direnç	(Aggarwal vd., 2019);(Thoben vd., 2017);(Khan vd., 2015);(Müller, 2019);(Horvath vd., 2019);(Kumar, 2021);(Cugno vd., 2021);(Elhussiny vd., 2022)
B11	Devlet desteği	(Glass vd., 2018);(Müller, 2019);(Horváth vd., 2019);(Kumar vd., 2021);(Wankhede vd., 2021);(Mjumdar vd., 2021);(Cugno vd., 2021);(Elhussiny vd., 2022)
B12	Makinelere bağımlılık	(Müller, 2019);(Wankhede vd., 2021)
B13	Mevzuat	(Chauhan vd., 2021);(Kumar vd., 2021);(Mjumdar vd., 2021);(Cugno vd., 2021)
B14	Hükümet politikası	(Cugno vd., 2021);(Kumar vd., 2021)

2.2. Engellerin Açıklamaları

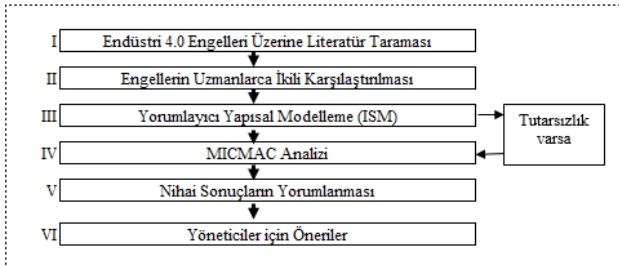
Tablo 1'de belirlenen engellerin açıklamaları, Tablo 2'de verilmiştir. Bu açıklamalar, uzmanlara engellerin ikili karşılaştırmasında yardımcı olmak amacıyla hazırlanmıştır. Engellerin açıklamaları hazırlanırken, olabildiğince kısa, net ve anlaşılır olması sağlanmıştır. Engeller, tecrübeye göre farklı önem seviyelerinde algılandığından, literatür dikkate alınarak açıklamalar hazırlanmıştır. Literatür taramasında elde edilen on dört engelin açıklamaları tespit edilirken, çalışmaya katılacak her sektörden uzman ve tecrübe seviyeleri dikkate alınmıştır.

Tablo 2. Endüstri 4.0'ün Benimsenmesinin Önündeki Engellerin Açıklamaları

Bariyer kodu	Bariyer açıklaması
B1	Endüstri 4.0'a uygun dijital üretim ve bant altyapısı ile enerji temini
B2	Endüstri 4.0 üretim sistemlerinin tesis kurulum ve know how maliyetleri
B3	İnternet üzerinden üretim, tasarım ve personel bilgilerinin paylaşılması
B4	Üretimin dijitalleşmesiyle güvenlik kurallarındaki eksiklikler
B5	Dijital veri kaynaklı, hatalı veri, yanlış veri vb aksaklıklar
B6	İnsan emeğinin azalmasıyla ürünlerin değersizleşmesi
B7	Zayıf değer zinciri ile istenilen kârlara ulaşmada belirsizlik
B8	Donanım ve yazılımda tecrübeli tecrübeli işçi eksikliği
B9	Dijital veri, enerji, patent, veri madenciliği kaynaklı aksamlar
B10	Çalışanların işsiz kalacak olması ve yöneticilerin karar mekanizmasında yetkilerinin azalması nedeniyle oluşacak direnç
B11	Hükümet ve kamu şirketlerinin desteği
B12	Etik olarak insanların makinelere bağımlı hale gelmesi
B13	Dijital stratejiyi belirten karar ve yönetmelikler
B14	Endüstri 4.0 konusunda hükümet politikaları

3 | YÖNTEM

Türkiye'de Endüstri 4.0 uygulamasının önündeki engellerin belirlenmesi analizinde kullanılan yöntem, Şekil 1'de gösterildiği gibi altı aşamadan (I –VI) oluşmaktadır. Literatür taraması sonucunda elde edilen on dört engel (Aşama I), ikili karşılaştırmalar için uzman görüşlerine sunulmuştur (Aşama II). Elde edilen ikili karşılaştırma bilgileri ,Yorumlayıcı Yapısal Modelleme analizinde (ISM) kullanılarak engeller bir hiyerarşik modele yerleştirilmiştir (Aşama III). MICMAC analizinde ISM tekniğinden elde edilen engellerin sürüş ve bağımlılık puanları kullanılmış ve engeller dört gruba ayrılarak görselleştirilmiştir (Aşama IV). Literatürde ISM ve MICMAC analizini bir arada kullanan birçok çalışma bulunmaktadır (Dubey vd., 2015, Piltan vd., 2016; Sachin vd., 2018; Pramod vd., 2021; Pedro vd., 2022). Yöntemin son iki aşamasında sonuçlar yorumlanmış (Aşama V) ve önerilerde bulunulmuştur (Aşama VI).



Şekil 1. Araştırma Yöntemi

3.1. Değerlendirici Bilgileri

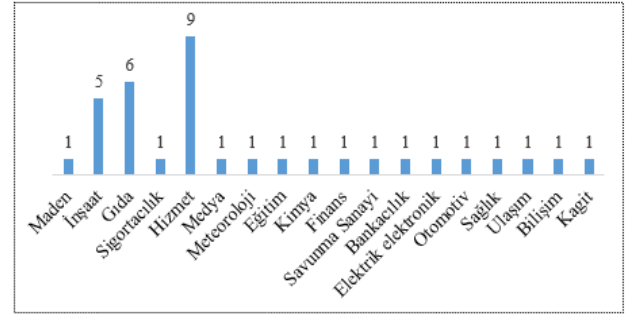
Literatür taramasından elde edilen engeller, belirli bir sektörde deneyime sahip otuz beş uzman tarafından değerlendirilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3: Değerlendirici Bilgileri

Anket Katılımcı no	Sektör	Deneyim (yıl)	Ünvan
1	Maden	>=21	Mühendis
2	İnşaat	0-5	Mühendis
3	Gıda	0-5	Mühendis
4	Sığirta	6-11	Dosya Y.
5	Hizmet	11-20	Mühendis
6	Hizmet	0-5	Avukat
7	Medya	6-11	Finans U.
8	Hizmet	11-20	Muh. Y.
9	Hizmet	0-5	İş Y.
10	İnşaat	6-11	Mühendis
11	Gıda	11-20	Muh. U.
12	Meteoroloji	11-20	BT. U.
13	İnşaat	6-11	İş Y.
14	İnşaat	11-20	İş U.
15	İnşaat	0-5	Mühendis
16	Eğitim	6-11	Fakülte Y.
17	Hizmet	11-20	Mühendis
18	Hizmet	0-5	Mühendis
19	Hizmet	0-5	Mühendis
20	Kimya	6-11	İş Y.
21	Gıda	0-5	Mühendis
22	Gıda	0-5	İş Y.
23	Gıda	>=21	Sorumlu Y.
24	Finans	6-11	Müdür
25	Savunma S.	0-5	Mühendis
26	Bankacılık	11-20	Güvenlik M.
27	Elektronik	0-5	Yönetici A.
28	Otomotiv	0-5	İnsan Kaynakları Y.
29	Sağlık	11-20	Pazarlama U.
30	Lojistik	11-20	İdari Y.
31	Hizmet	0-5	Pazarlama Y.
32	Gıda	0-5	Mühendis
33	Hizmet	0-5	Bankac. Y.
34	BT	0-5	İş Y.
35	Kağıt	0-5	Mühendis

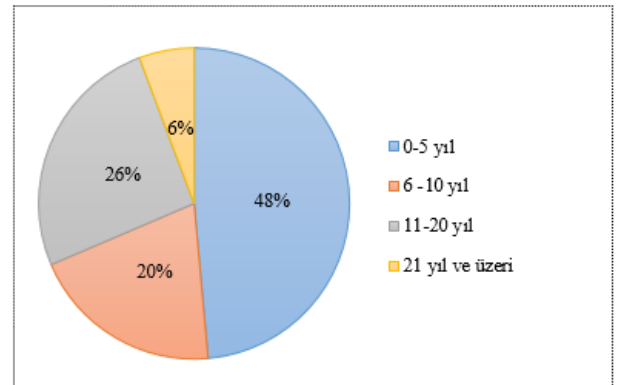
Y.Yönetici U:Uzmanı Muh:Muhasibe S:Sanayi, BT: Bilişim Teknolojileri A:Asistan M:Müdür

Değerlendiriciler on sekiz sektörde, on dört farklı pozisyondan seçilmiştir. Covid-19 Pandemisi nedeniyle veriler online olarak toplanmıştır. Şekil-2'de verilmiştir.



Şekil 2. Değerlendirici Uzmanların Sektör Dağılımı

Değerlendiricilerin, deneyim yıllarına göre homojen dağılımı hedeflenmiştir. Dolayısıyla, Şekil-3'de görüldüğü gibi ankete katılan otuzbeş uzmanın tecrübe dağılımı grafiği elde edilmiştir.



Şekil 3. Değerlendirici Uzmanların Tecrübe Dağılımı

3.2. Yorumlayıcı Yapısal Modelleme

Bağımlı ve bağımsız değişkenlerin yatay ve dikey ilişkilerini inceleyen Yorumlayıcı Yapısal Modelleme (ISM: Interpretive structural modeling), 1974 yılında Warfield tarafından geliştirilmiştir. Literatürde ISM analizine atıfta bulunan birçok çalışma bulunmaktadır [92, 93]. Bu çalışmada, ISM tekniği, literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda belirlenen on dört engele beş adımda uygulanmıştır. İlk olarak, Yapısal Etkileşim Matrisi (SIM: Structural Interaction Matrix) oluşturulmuştur. Daha sonra, SIM matrisinden İlk Erişilebilirlik Matrisi (IRM: Initial Reachability Matrix) elde edilmiştir. Geçişlilik kontrolü uygulandıktan sonra Nihai Erişilebilirlik Matrisine (FRM: Final Reachability Matrix) ulaşılmıştır. Engellerin seviye hiyerarşisi erişilebilirlik, öncül ve kesişim kümeleri kullanılarak elde edilmiştir.

3.2.1. Yapısal Etkileşim Matrisi

ISM analizinin ilk adımı, Yapısal Etkileşim Matrisinin oluşturulmasıdır. Literatürde uzman seçiminin önemini vurgulayan bazı çalışmalarda, farklı sektörlerden uzmanların seçilmesi önerilmektedir (Hertzum, 2014; Azevedo vd., 2019; Fathi ve Ghobakhloo, 2020). Literatür taraması ile elde edilen on dört engel, ikili karşılaştırma için uzmanlara sunulmuştur. Bu çalışmaya on sekiz farklı sektörden on dört farklı pozisyondaki otuz beş uzman katılmıştır. Her uzman, ikili biçimde on dört engel için toplam 91 karşılaştırma yapmış ve sonuçta Tablo 4'deki Yapısal Etkileşim Matrisi (Structural Interaction Matrix-SIM) elde edilmiştir. Karşılaştırılacak herhangi iki engel, literatür araştırmalarında olduğu gibi, i ve j olarak kodlanmıştır (Tablo 4).

Karşılaştırma matrislerinde i kodu satırı ve j kodu sütunu temsil etmektedir. Tablo 4'de V harfi, i engelini (bariyerinin) j engelini (bariyerini) etkilediğini, A harfi, i engelini j engelinden etkilediğini göstermektedir. X harfi i ve j engellerinin birbirini etkilediğini gösterirken O harfi ise i ve j engellerinin birbirini etkilemediğini göstermektedir.

Tablo 4. Endüstri 4.0 Engellerinin Yapısal Etkileşim Matrisi

i (satır) j (sütun)	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
B1	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
B2	-	-	X	X	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X
B3	-	-	-	X	X	X	O	X	X	O	O	X	A	X
B4	-	-	-	-	X	X	O	X	X	X	X	X	X	X
B5	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	O
B6	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	O	X	X	X
B7	-	-	-	-	-	-	-	A	X	A	A	X	X	X
B8	-	-	-	-	-	-	-	-	V	X	X	X	X	O
B9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	O
B10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X
B11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V	X	X
B12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
B13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2.2. İlk Erişilebilirlik Matrisi

Tablo 5'de bulunan, 0 ve 1 kodlarını içeren İlk Erişilebilirlik Matrisi (Initial Reachability Matrix- IRM), Tablo 4'teki V, A, X ve O sembollerinin dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Bu dönüşüm yapılırken dört kurala uyulmuştur. 1-(i,j) çifti V ise (i,j) değeri 1 ve (j,i) değeri 0 olur. 2-(i,j) çifti A ise (i,j) değeri 0 ve (j,i) değeri 1 olur. 3-(i,j) çifti X ise (i,j) ve (j,i) değerleri 1 olur. 4-(i,j) çifti O ise (i,j) ve (j,i) değerleri 0 olur.

Tablo 5. Endüstri 4.0 Engellerinin İlk Erişilebilirlik Matrisi

j (sütun) i (satır)	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
B1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
B3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1
B4	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
B5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
B6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
B7	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
B8	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
B9	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
B10	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B11	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
B12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
B13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B14	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1

3.2.3. Nihai Ulaşılabilirlik Matrisi

Literatürde, ilk ulaşılabilirlik matrisine geçişlilik kuralı uygulanarak nihai ulaşılabilirlik matrisinin elde edildiği bilinmektedir (Cherrafi vd., 2017). Tablo 5'teki 0 ve 1 rakamlarının anlamları önemlidir. 1 sayısı, satırdaki engelin sütundaki engeli etkilediğini gösterir. 0 sayısı, satırdaki engelin sütundaki engeli etkilemediğini gösterir. Tablo 5'teki ilk ulaşılabilirlik matrisine geçişlilik kuralı uygulandı. Geçişliliğin uygulanmasında, öncelikle Tablo 5'in her sütununda 0 olan değerler belirlendi. Daha sonra elde edilen Tablo 6'daki nihai ulaşılabilirlik matrisinde (Final Reachability Matrix-FRM) 1 olan bu sıfır değerleri Tablo 6'da (*) ile işaretlenmiştir. Ayrıntılar, mevcut çalışmanın ekindeki bulunan Tablo A1'de gösterilmektedir. Tablo 6'da bulunan Bağımlılık Gücü (BG) sütunların, Sürüş Gücü (SG) ise satırların toplamını göstermektedir.

Tablo 6. Endüstri 4.0 Engellerinin Nihai Erişilebilirlik Matrisi

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	DiP	R
B1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	1
B2	1	1	1	1	1	1	1	1*	1	1	1	1	1	1	14	1
B3	1	1	1	1	1	1	1*	1	1*	1*	1	1*	1	1	14	1
B4	1	1	1	1	1	1	1*	1	1	1	1	1	1	1	14	1
B5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1*	14	1
B6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1*	1	1	1	14	1
B7	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1*	1*	1	1	1	11	4
B8	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1*	13	2
B9	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1*	13	2
B10	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	2
B11	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	12	3
B12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1*	13	2
B13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	1
B14	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	10	5
DeP	14	13	11	13	13	13	14	11	13	14	13	13	14	14		
R	1	2	3	2	2	2	1	3	2	1	2	2	1	1		

* Geçişliliği belirtir

DeP: Dependency Power (Bağımlılık Gücü) DiP: Driving Power (Etkileme Gücü) R: Rank (Sıra)

3.2.4. Engellerin Seviye Bölümlemesi

Seviye bölümlemede amaç, literatür taramasıyla elde edilen ondört engelin zorluk ve öncelik derecesine göre kendi içinde gruplara ayrılmasıdır. Literatürde erişilebilirlik, öncül ve kesişim kümelerini kullanarak seviyelerin hiyerarşi modelini belirleyen çalışmalar bulunmaktadır (Hussain vd., 2016). Tablo 7'de görüldüğü gibi, erişilebilirlik seti (Tablo 7'deki A sütunu) engelin kendisinden ve etkilediği diğer engellerden oluşur. Öncül küme (Tablo 7'deki B sütunu) engelin kendisinden ve onu etkileyen diğer engellerden oluşur. Tablo 7'deki C sütunu (Kesişme kümesi) Tablo 7'deki A ve B sütunların kesişiminden elde edilmiştir. Seviye bölümlemede dört iterasyon yapılmış ve bu iterasyon adımları mevcut çalışmanın ekindeki Tablo A2'de detaylı olarak verilmiştir. Tablo A2 incelendiğinde, aynı ulaşılabilirlik ve kavşak setine sahip engeller B1,B7,B10,B11,B13 ve B14 birinci seviye engeller olarak çıkmıştır.

Tablo A2'deki satır ve sütunlardan birinci seviyedeki engeller kaldırılmış, aynı erişilebilirlik ve kavşak setine sahip olan B3,B4,B5,B6,B9 ve B12 ikinci seviye engeller olarak bulunmuştur. Aynı yöntem devam edilerek, üçüncü seviyede sekizinci engel (B8) ve dördüncü seviyede ikinci engel (B2) olarak tespit edilmiştir. Tespit edilen dört seviye, Tablo 7'nin D sütununda görülmektedir.

Tablo 7. Endüstri 4.0 Uygulanmasında Engellerin Seviye Bölünmesi

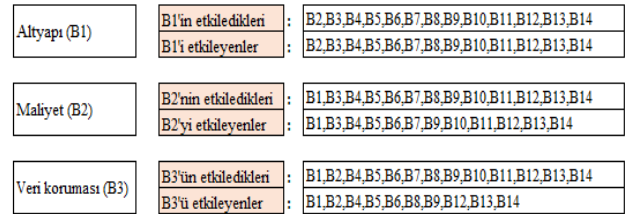
	Erişilebilirlik Seti (A)	Öncül Set (B)	Kesişim Seti (C)	Seviye (D)
B1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	I
B2	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	IV
B3	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,8,9,12,13,14	1,2,3,4,5,6,8,9,12,13,14	II
B4	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,8,9,10,11,12,13,14	II
B5	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	II
B6	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14	II
B7	1,2,5,6,7,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,5,6,7,9,10,11,12,13,14	I
B8	1,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,8,10,11,12,13	1,3,4,5,6,8,10,11,12,13	III
B9	1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12,13	II
B10	1,2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	I
B11	1,2,4,5,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,13,14	1,2,4,5,7,8,9,10,11,12,13,14	I
B12	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13	II
B13	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	I
B14	1,2,3,4,6,7,10,11,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,6,7,10,11,13,14	I

Tablo 7'de, bir nolu engelin (B1) kendisi ve etkilediği diğer engeller A sütununda görülmektedir ve bunlar için Tablo 8'de satıra 1 gelmektedir. B1 kendisi ve etkilediği diğer engeller B sütununda görülmektedir ve Tablo 8'de sütuna 1 gelmektedir. Tablo 7'de A ve B sütununda olmayan engeller için Tablo 8'de 0 konulmuştur. Bu şekilde ondört engel için (B1-B14) Tablo 7 kullanılarak, Tablo 8 elde edilmiştir. Tablo 8'deki 1 sayısı; satırdaki engelin sütundaki engeli etkilediğini, 0 ise etkilemediğini göstermektedir.

Tablo 8. Konik Matris

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
B1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B7	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
B8	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B9	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
B10	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B11	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
B12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
B13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B14	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1

Tablo 8 kullanılarak, altyapı (B1), maliyet (B2) ve veri koruma (B3) engellerinin; diğer engelleri etkileme ve diğer engellerden etkilenme durumları Şekil 4'teki gibi belirlenmiştir. Bu üç engelin, bir çok engelden etkilenip, aynı zamanda etkilendiği görülmektedir. Şekil 4 incelendiğinde, B1, B2 ve B3 engellerinin, kendisi dışında tüm engelleri, etkilediği görülmektedir. B1 engeli, diğer tüm engellerden etkilenmekte iken, B2 engeli sadece 8 nolu engelden (deneyimli iş gücü eksikliği) etkilenmemektedir. B3 engeli ise, sadece B7 (kâr belirsizliği), B10 (değişime direnç) ve B11 (devlet desteği) engellerinden etkilenmemektedir.



Şekil 4. Engeller Arası İlişkiler (Engel: 1-2-3)

Yine Tablo 8 kullanılarak, B4'den B14'e kadar olan engellerinin, diğer engelleri etkileme ve diğer engellerden etkilenme durumları Şekil 5'teki gibi belirlenmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, diğer engelleri en az etkileyen engelin hükümet desteği (B11) olduğu görülmektedir. Engellerin hemen çoğunun karşılıklı olarak hem birbirlerini etkileyip hem de etkilendikleri görülmektedir.

Güvenlik prosedürleri (B4)	B4'ün etkiledikleri B4'ü etkileyenler	: B1,B2,B3,B5,B6,B7,B8,B9,B10,B11,B12,B13,B14 : B1,B2,B3,B5,B6,B8,B9,B10,B11,B12,B13,B14
Veri kullanımı zorlukları (B5)	B5'in etkiledikleri B5'i etkileyenler	: B1,B2,B3,B4,B6,B7,B8,B9,B10,B11,B12,B13,B14 : B1,B2,B3,B4,B6,B8,B9,B10,B11,B12,B13
Değer belirsizliği (B6)	B6'nın etkiledikleri B6'yu etkileyenler	: B1,B2,B3,B4,B5,B7,B8,B9,B10,B11,B12,B13,B14 : B1,B2,B3,B4,B5,B7,B8,B9,B10,B12,B13,B14
Kâr belirsizliği (B7)	B7'nin etkiledikleri B7'yi etkileyenler	: B1,B2,B5,B6,B9,B10,B11,B12,B13,B14 : B1,B2,B3,B4,B5,B6,B8,B9,B10,B11,B12,B13,B14
Tecrübeli işgücü eksikliği (B8)	B8'in etkiledikleri B8'i etkileyenler	: B1,B3,B4,B5,B6,B7,B9,B10,B11,B12,B13,B14 : B1,B2,B3,B4,B5,B6,B10,B11,B12,B13
Üretim kesintileri (B9)	B9'un etkiledikleri B9'u etkileyenler	: B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B10,B11,B12,B13,B14 : B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B10,B11,B12,B13
Değişime direnç (B10)	B10'un etkiledikleri B10'u etkileyenler	: B1,B2,B4,B5,B6,B7,B8,B9,B11,B12,B13,B14 : B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B9,B11,B12,B13,B14
Hükümetin desteği (B11)	B11'in etkiledikleri B11'i etkileyenler	: B1,B2,B4,B5,B7,B8,B9,B10,B12,B13,B14 : B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B9,B10,B13,B14
Makinelere bağımlılık (B12)	B12'nin etkiledikleri B12'yi etkileyenler	: B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B9,B10,B13,B14 : B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B9,B10,B11,B13
Mevzuat (B13)	B13'ün etkiledikleri B13'ü etkileyenler	: B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B9,B10,B11,B12,B14 : B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B9,B10,B11,B12,B14
Hükümet politikası (B14)	B1'in etkiledikleri B1'i etkileyenler	: B1,B2,B3,B4,B6,B7,B10,B11,B12,B13 : B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7,B8,B9,B10,B11,B12,B13

Şekil 5. Engeller Arası İlişkiler (Engel: 4-5-6-7-8-9-10-11-12-13 ve 14)

3.2.5. ISM Tabanlı Model

Şekil 6'daki engellerin yapısal modeli, Tablo 7'de D sütunundaki seviye ayırımından elde edilmiştir. Seviyeleme çalışmasının detayları, bu çalışmanın sonunda bulunan Tablo A2'de görülmektedir. Tablo A2'deki dört yenilemeye göre, Şekil 6'da görüldüğü gibi dört yerleştirme düzeyi belirlenmiştir. Dördüncü seviye, Şekil 6'da görüldüğü gibi modelin en alt kısmında yer almaktadır. A, B'yi etkiliyor, B, C'yi etkiliyorsa A, C'yi etkiler kuralı, Şekil 6'da bulunan engellerin hiyerarşi modeli için için geçerlidir. Ancak Şekil 6'daki oklar, sadece dikey ve yatay yönde ardışık engeller arasındaki karşılıklı ilişkiyi göstermektedir. Bir engelden çıkan ok diğerini etkiliyor demektir. İstisnalar Şekil 6'da * / ** / *** / **** ile gösterilmiştir.

- Endüstri 4.0'a geçiş için, dijital alt yapı tesislerin kurulması gerekmektedir. İlk karşılaşılabilecek engel bu tesislerin kurulum maliyeti (B2)'dir (Şekil-6'teki Seviye-4'e bakınız).

- Maliyet sorunu aşılarak, dijital tabanlı Endüstri 4.0 tesisleri kurulduğunda, Endüstri 4.0 işletmelerinde çalışacak deneyimli işgücünün eksikliği (B8)

karşılaşılabilecek ikinci engel olacaktır (Şekil-6'teki Seviye-3'e bakınız).

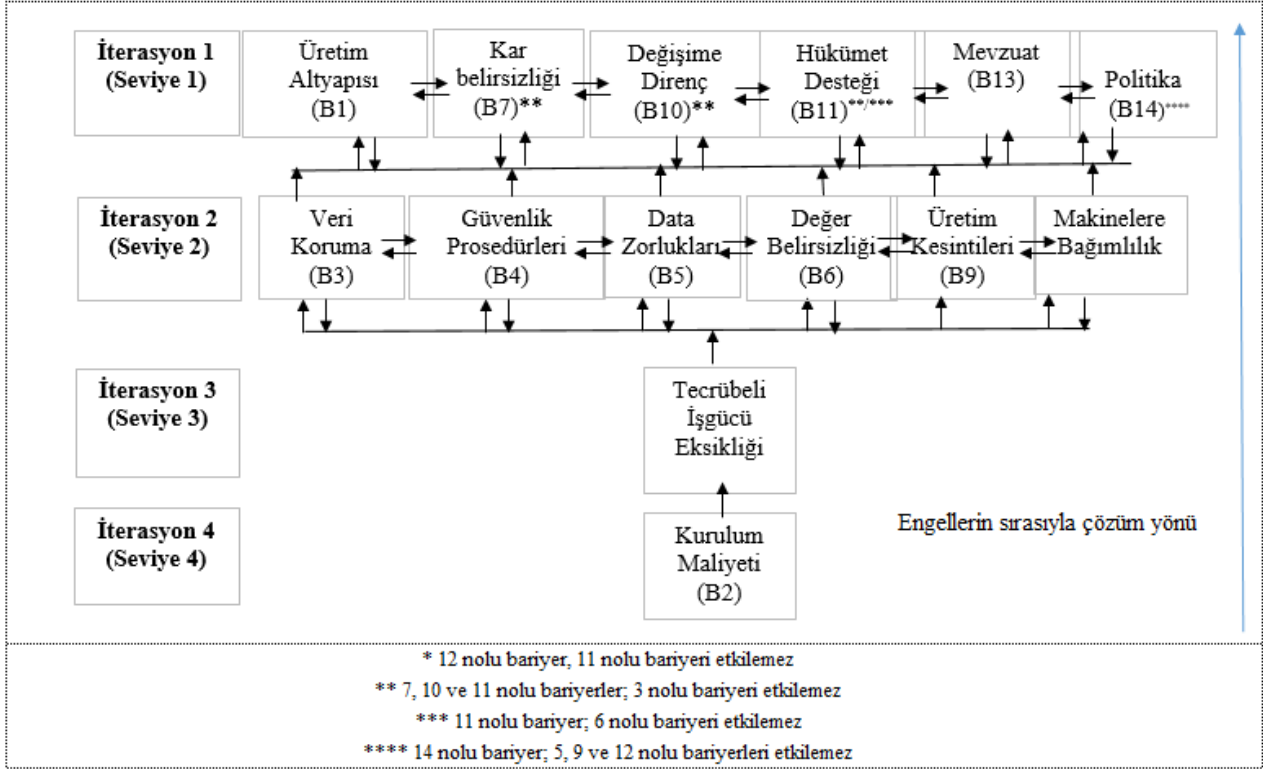
- Tesisler kurulup ve çalışacak işgücü engelleri aşıldığında, Endüstri 4.0'a uygun işletme sayısı zamanla artacaktır. Bu aşamada; dijital veri koruma (B3), güvenlik prosedürleri (B4), dijital veri sorunları (B5), değer belirsizliği (B6), üretim kesintileri (B9), makinelere bağımlılık (B12) engelleri ortaya çıkacaktır. Endüstri 4.0 girişimleri yaygınlaştıkça teknik engeller (B3,B4,B5,B9) nedeniyle üretim kesintileri meydana geldikçe, makinelere bağımlılık (B12) artacak ve ürünler için değer belirsizliği (B6) oluşacaktır (Şekil-6'teki Düzey-2'ye bakın).

- Teknik engeller aşıldıkça, işletmeler Endüstri 4.0 ürünleri üretmeye alıştıkça ve tüketiciler Endüstri 4.0 ürünlerine aşina oldukça, makinelere bağımlılık ve değer belirsizliği sorun olmaktan çıkacaktır. Ancak ülke genelinde Endüstri 4.0 üretimine uygun bir altyapı sorunu (B1) yaşanacak ve kâr belirsizliği (B7) zamanla değişime direnci (B10) oluşturacaktır. Bu ortamda, devlet desteği (B11) önem kazanır ve Endüstri 4.0 ile ilgili mevzuat (B13) ve politikanın (B14) ayarlanması gerekecektir. (Şekil-6'teki Seviye-1'e bakınız).

- Şekil 6'da görüldüğü gibi Türkiye'de işletmelerin Endüstri 4.0'a dönüşümünde çözülmesi gereken ilk sorun, modelin dördüncü seviyesinde yer alan maliyettir. Sonra üçüncü seviyedeki tecrübeli işgücü eksikliği giderilecektir. İkinci seviyedeki engeller çözüldükten sonra Endüstri 4.0'a dönüşümün tamamlanması için, birinci seviyedeki engellerin çözülmesi gerekecektir.
- İşletmelerin dönüşümü sürecinde, İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) teknolojilerinin Endüstri 4.0'a

uyarlanması ile iş kazaları ve meslek hastalıkları da azalacaktır.

- Şekil 6'da görüldüğü gibi, Modelin dördüncü ve üçüncü seviyesinde tek engel varken ikinci ve birinci seviyede birden fazla engel bulunmaktadır. İkinci ve birinci seviyelerdeki engelleri aşmak için zorunlu bir sıra yoktur, ancak işletmelerin zaman ve maliyetten kazanması için doğru sırayı belirlemesi gerekmektedir.

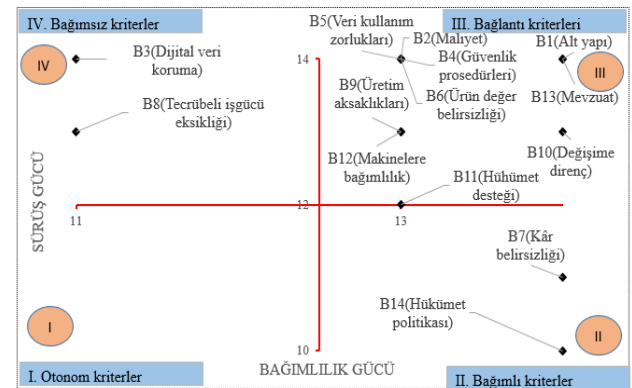


Şekil 6: Endüstri 4.0 Engellerinin ISM Tabanlı Modeli

3.3. MICMAC Analizi

Godet (1993) tarafından geliştirilen Sınıflandırmaya Uygulanan Çapraz Etki Matrisi (MICMAC) analizinde (Srivastava vd., 2014) bir sistemin bileşenleri; otonom, sürücü, bağlantı ve bağımlı olmak üzere dört kümeye ayrılmaktadır (Yang vd., 2020). MICMAC analizi, engellerin hiyerarşisi modelinde bulunan seviyeler ve aralarındaki ilişkilere bir katkıda bulunmaz ancak engellerin birbirlerine olan etkileme ve etkilenme gücü ile bağımlı ve bağımsız olma durumlarını tek bir grafikte görme imkanı sağlar. Literatürde tespit edilen on dört engel bir sistem kabul edilerek, ISM analizinde elde edilen engellerin sürüş ve bağımlılık gücü puanları kullanılarak, literatür taramasından elde edilen on dört engeli MICMAC analizi uygulanmış ve Şekil 7'eki MICMAC grafiği elde edilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, dört küme (I, II, III, IV) görülmektedir. Bu kümeler sırasıyla; Otonom kriterler, Bağımlı kriterler, Bağlantı kriterleri ve Bağımsız kriterlerdir. İlk kümede engel

bulunmamakla birlikte ikinci kümede iki engel (B7, B14) üçüncü kümede on engel (B1, B2, B4, B5, B6, B9, B10, B11, B12, B13) ve dördüncü kümede iki engel (B3, B8) bulunmaktadır.



Şekil 7: Engellerin MICMAC Analiz Grafiği

- İlk küme, zayıf sürüş ve zayıf bağımlılık gücüne sahip "otonom engelleri" içerir. Otonom engeller, sistemden izole edilemeyen engellerdir, çünkü her bir engelin mutlaka diğerleri üzerinde bir etkisi bulunmaktadır. Mevcut çalışmada böyle bir engel bulunmamaktadır (Şekil-7'de Bölge I' bakın). On dört engelin her biri en azından diğer bir engeli etkilemektedir.
- İkinci küme, zayıf sürüş ancak yüksek bağımlılık gücü gösteren bağımlı engelleri göstermektedir. Bu engeller, diğer engellerden etkilenmekte ancak onları etkileme kapasitesine sahip olmamaktadır. Bu kümedeki iki bağımlı engel, kâr belirsizliği (B7) ve hükümet politikalarıdır (B14) (Şekil-7'de Bölge II'ye bakın). Bir şirketin kârı (B7), satış ve giderlere bağlıdır. Diğer taraftan devlet politikaları (B14) toplumsal talep ile ekonomik ve teknolojik gelişmelere göre belirlenmektedir. Kısacası, bu iki engelin bağımlılığı yüksektir.
- Üçüncü küme hem güçlü sürüş hem de güçlü bağımlılık gücüne sahip "bağlantı engellerini" ifade etmektedir (Şekil-7'de Bölge III'e bakın). Bu engeller geçici olarak kabul edilir. Diğer engelleri büyük ölçüde etkiler ve onlardan etkilenirler. Bu engellerde değişiklik yapılması gerektiğinde dikkatli olunmalıdır. Üçüncü kümede on tane engel bulunmaktadır (B1: üretim altyapısı, B2: kurulum maliyeti, B4: güvenlik prosedürleri, B5: dijital veri sorunları, B6: değer belirsizliği, B9: üretim kesintileri, B10: değişime direnç, B11: devlet desteği, B12: makine bağımlılığı, B13: Endüstri 4.0 mevzuatı).
- Dördüncü küme, güçlü sürüş ve zayıf bağımlılık gücü olan "bağımsız engeller" içerir (Şekil-7'de Bölge IV'e bakın). Bu kümedeki engeller diğer engellerin çoğunu etkiler, ancak onlardan çok az etkilenir. Dolayısıyla bu engeller, Endüstri 4.0'ın benimsenmesinin önündeki ana engellerdir. Bu engellere sürücü engeller de denilmektedir. Bu kümede dijital veri koruma (B3) ve deneyimli işgücü eksikliği (B8) olarak adlandırılan iki engel bulunmaktadır. Dijital veri ve onu kullanacak dijital okuryazar iş gücü, Endüstri 4.0 üretiminin bel kemiğidir. Dolayısıyla, bu iki engelin bağımsız kriterler olması, ISM ve MICMAC analizlerinin sağlıklı yapıldığını göstermektedir.

4 | BULGULAR ve TESPİTLER

İlk çözülmesi gereken engel; kurulum maliyeti (B2) engelidir. Endüstri 4.0 üretimi dijital teknolojiye dayalı ve veri ağırlıklı olduğundan, ilk çözülmesi gereken engelin B2 (kurulum maliyeti) olması normal bir durumdur. Bu engel işverenlerin, Endüstri 4.0 getirilerini hükümetlere, yurt içi bankalara veya uluslararası kredi kuruluşlarına etkin bir şekilde anlatmasıyla çözülebilir.

Maliyet sorununun (B2) aşılmasıyla birlikte kurulacak Endüstri 4.0 işletmelerinde çalışacak deneyimli işgücünün (B8) olmaması; karşılaşılan ikinci engel

olacaktır. Bu engel Endüstri 4.0 tesislerinin kurulmaya başlanmadan önce, eğitim kuruluşlarına destek verilerek aşılabılır.

Deneyimli işgücü engeli (B8) aşıldıktan sonra, teknik engeller (B3:Verilerin korunması, B4:Güvenlik prosedürleri, B5:Veri kullanım zorlukları, B9: Üretim kesintileri) ve meydana getirdikleri sosyal engeller (B6: değer belirsizliği, B12: makinelere bağımlılık) oluşacaktır. Zamanla işverenler üretime aşına olundukça ve eğitim ile çalışanlar tecrübe kazandıkça, karşılaşılan teknik engeller (B3, B4, B5) aşılabılacağından üretim kesintileri de (B9) olmayacak ve sosyal engeller de (B6, B12) zamanla çözülecektir.

Türkiye'de Endüstri 4.0 girişimleri yaygınlaştıkça, sistemin tam verimli çalışabilmesi için en bağımlı ve en uzak olan son engellerin aşılması gerekecektir. Şöyle ki; Endüstri 4.0 işletmelerinin sayısı arttıkça Türkiye genelinde dijital üretime uygun genel bir altyapı sorunu (B1) oluşacaktır. Bu engel hükümet desteği ve tedarik zincirindeki tarafların birlikte çalışmasıyla aşılabılır. Alt yapı sorunu aşıldığında, üretim sürekliliği kazanç anlamına geldiğinden, kar belirsizliği (B7) olmayacağından değişime direnç (B10) engeli de aşılabılır. Engel hiyerarşi modelin en üstündeki B1, B7 ve B10 engelleri aşıldığında, Endüstri 4.0 ile ilgili mevzuat (B13) ve politika (B14) engelleri, Endüstri 4.0'ın getirilerini gören hükümet desteği (B11) ile çözülecektir.

Genelde hükümetlerin özelde işletmelerin, bu çalışmada belirlenen Engel Hiyerarşi Modelindeki çözüm sırasına uyarak, engellerin itici güçleri ve bağımlılık seviyelerine göre detaylı ve titiz bir planlama yapmaları faydalı olacaktır.

5 | SONUÇ ve ÖNERİLER

Sağlıklı işleyen bir Endüstri 4.0 sisteminin kurulması için finansal ve vasıflı işgücü önündeki engellerin aşılmasından sonra dijital verilere dayalı teknik sorunlar ve oluşturacağı sosyal engellerin aşılması gerekmektedir. Teknik engellerin aşılmasıyla üretim sürekliliği ve sürekli gelir sağlanacağından sosyal engeller olan değişime direnç ve makinelere bağımlılık sorun olmaktan çıkacaktır. Dolayısıyla Endüstri 4.0 üretime bakış açısı değişecektir. Bu aşamadan sonra, ülke genelinde sağlıklı bir Endüstri 4.0 altyapısının kurulması ve yasal mevzuatın oluşturulması devletin desteği ile mümkün olacaktır. Aşağıdaki öneriler, bu geçiş sürecinde işletmeler için faydalı olacak ve geçişi kolaylaştırırken maliyetleri de azaltacaktır.

- Hükümetler ve Bankalar Endüstri 4.0'ın faydalarını görmeden kredi sağlamayacaktır. Bu nedenle şirketler risk almak ve ilk yatırımları yapmak zorundadır. Endüstri 4.0'ın faydalarını devlete ve bankalara anlatarak işletmeler finansal risklerini azaltabilir ve geçişin başlarında destek alabilirler.
- Endüstri 4.0 üretiminde, dijital veri kaynaklı olası üretim kesintilerinin önüne geçebilmek için,

firmaların tesis kurmadan önce Ar-Ge çalışmaları yapmaları faydalı olacaktır. Endüstri 4.0'a geçiş ilerledikçe, dijital üretimde ilgili ekipmanları kullanacak yetişmiş işgücü gerekeceğinden, kodlama eğitimi ve dijital okuryazarlık düzeyinin artırılmasına yönelik hazırlıklar yapılmalıdır.

- Çalışanların ve şirket hissedarlarının Endüstri 4.0'ın faydaları hakkında bilgilendirilmesi ile değer belirsizliği ve makinelere bağımlılık algılarının önüne geçilebilir. Böylece başlayacak olan değişime direnç baştan durdurulabilir.
- Şirketler, Endüstri 4.0'ın faydaları kapsamında çalışanlarını, hissedarlarını ve kamuoyunu memnun edecek stratejiler geliştirirlerse bankalardan daha kolay kredi alabilirler.
- Şirketler Endüstri 4.0 ile ilgili politikaların oluşturulmasına aktif olarak katkıda bulunurlarsa, Endüstri 4.0 ile ilgili yasa ve yönetmeliklerin oluşturulmasına etki edebilirler.
- Endüstri 4.0 üretiminde olası kesintiler için acil durum prosedürleri oluşturulmalıdır.
- Üretim verilerinin korunması için özel çaba gösterilmelidir. Bu kapsamda, blockchain teknolojileri kullanılabilir.
- Endüstri 4.0 üretim sürekliliğini sağlamak için çalışanların ve veri mühendislerinin sürekli dijital okuryazarlık eğitimi almasını sağlayacak bir sistem kurulmalıdır.

Türkiye'deki işletmeler bu çalışmada belirlenen hiyerarşi modelini ve önerileri takip ederse, Endüstri 4.0'a geçişteki engelleri daha az maliyetle ve en hızlı şekilde aşacaktır. Ancak işletmelerin Endüstri 4.0'a geçişte bazı ilkeleri içselleştirmeleri gerekmektedir. Öncelikle, üretim dijital hale geldikçe çalışanlara daha fazla önem verilmeli ve işsizlik toplumsal bir sorun olarak görülmelidir. Öte yandan üretimi Yapay Zekâ'ya devretmek, Yapay Zekâ'nın tüm operasyonlarının doğru olacağı anlamında kabul edilmemelidir. Bu nedenle, üretim ve iş ilişkilerinde kararlar alınırken son kontrollerin yöneticiler tarafından yapılması ilkesi beimsenmelidir. Endüstri 4.0 kapsamında teknik alt yapı, mevzuat ve politikalar oluşturulurken, aşağıda belirtilen beş hususun dikkate alınmasında fayda bulunmaktadır. Söz konusu önerilerin dikkate alınmasıyla, geçiş süreci daha kısalcak ve maliyetler azalacaktır.

- Birincisi; mevzuat oluşturulurken ilgili kamu ve özel sektör yöneticilerinin görüşleri alınmalıdır.
- İkincisi, dijital üretim olacağından standardizasyon çalışmaları da mevzuat çalışması kapsamında değerlendirilmeli ve uluslararası düzenlemeler incelenmelidir.

- Üçüncüsü, Yapay Zekâ teknolojilerinin Endüstri 4.0 ile uyumluluğu kapsamında kurallar oluşturulmalıdır.
- Dördüncüsü, Endüstri 4.0'da iş sağlığı ve güvenliğini sağlamak için gerekli önlemler alınmalı ve kontroller tamamen Yapay Zekâya bırakılmamalıdır.
- Beşincisi Endüstri 4.0'dan kaynaklanacak işsizliğin önlenmesi için önlemler düşünülmelidir.

Bu çalışma literatüre dört katkı sağlamıştır. Öncelikle, Türkiye'de işverenler açısından Endüstri 4.0'a geçişin önündeki engeller belirlendi. İkinci olarak, belirlenen engellerin karşılıklı ilişkilerini açıklamak için bir hiyerarşi modeli geliştirildi. Üçüncüsü, Hiyerarşi modelindeki ilişkiler analiz edildi. Dördüncüsü, yapılan analizler doğrultusunda işverenlere ve kamu yöneticilerine Endüstri 4.0'a geçişin en hızlı ve en az maliyetli şekilde yapılması için önerilerde bulunuldu.

KAYNAKÇA

AbouRizk, S. (2010). Role of simulation in construction engineering and management. *Journal of construction engineering and management*, 136(10), 1140-1153.

Aggarwal, A., Gupta, S., & Ojha, M. K. (2019). Evaluation of key challenges to industry 4.0 in Indian context: a DEMATEL approach. In *Advances in Industrial and Production Engineering* (pp. 387-396). Springer, Singapore.

Azevedo, S. G., Sequeira, T., Santos, M., & Mendes, L. (2019). Biomass-related sustainability: A review of the literature and interpretive structural modeling. *Energy*, 171, 1107-1125.

Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia manufacturing*, 13, 1245-1252.

Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (2019). Internet of things and supply chain management: a literature review. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4719-4742.

Braaksma, A. J., Klingenberg, W. W., & van Exel, P. P. (2011). A review of the use of asset information standards for collaboration in the process industry. *Computers in industry*, 62(3), 337-350.

Calabrese, A., Levaldi Ghiron, N., & Tiburzi, L. (2021). 'Evolutions' and 'revolutions' in manufacturers' implementation of industry 4.0: a literature review, a multiple case study, and a conceptual framework. *Production Planning & Control*, 32(3), 213-227.

Chauhan, C., Singh, A., & Luthra, S. (2021). Barriers to industry 4.0 adoption and its performance implications: An empirical investigation of emerging economy. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124809.

- Cherrafi, A., Elfezazi, S., Garza-Reyes, J. A., Benhida, K., & Mokhlis, A. (2017). Barriers in Green Lean implementation: a combined systematic literature review and interpretive structural modelling approach. *Production Planning & Control*, 28(10), 829-842.
- Cozmiuc, D., & Petrisor, I. (2018). Industrie 4.0 by siemens: steps made next. *Journal of Cases on Information Technology (JCIT)*, 20(1), 31-45.
- Cugno, M., Castagnoli, R., & Büchi, G. (2021). Openness to Industry 4.0 and performance: The impact of barriers and incentives. *Technological Forecasting and Social Change*, 168, 120756.
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of production economics*, 204, 383-394.
- Dalmarco, G., & Barros, A. C. (2018). Adoption of Industry 4.0 technologies in supply chains. In *Innovation and Supply Chain Management* (pp. 303-319). Springer, Cham.
- Elhusseiny, H. M., & Crispim, J. (2022). SMEs, Barriers and Opportunities on adopting Industry 4.0: A Review. *Procedia Computer Science*, 196, 864-871.
- Errandonea, I., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2020). Digital Twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 123, 103316.
- Fathi, M., & Ghobakhloo, M. (2020). Enabling mass customization and manufacturing sustainability in industry 4.0 context: a novel heuristic algorithm for in-plant material supply optimization. *Sustainability*, 12(16), 6669.
- Flatt, H., Schriegel, S., Jasperneite, J., Trsek, H., & Adamczyk, H. (2016, September). Analysis of the Cyber-Security of industry 4.0 technologies based on RAMI 4.0 and identification of requirements. In *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-4). IEEE.
- Fotland, G., Haskins, C., & Rølvåg, T. (2020). Trade study to select best alternative for cable and pulley simulation for cranes on offshore vessels. *Systems Engineering*, 23(2), 177-188.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15-26.
- Frederico, G. F., Garza-Reyes, J. A., Anosike, A., & Kumar, V. (2019). Supply Chain 4.0: concepts, maturity and research agenda. *Supply Chain Management: An International Journal*.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE access*, 8, 108952-108971.
- Gardas, B. B., Raut, R. D., & Narkhede, B. (2019). Determinants of sustainable supply chain management: A case study from the oil and gas supply chain. *Sustainable Production and Consumption*, 17, 241-253.
- Ghadge, A., Kara, M. E., Moradlou, H., & Goswami, M. (2020). The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- Ghobakhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of manufacturing technology management*.
- Ghobakhloo, M. (2020). Determinants of information and digital technology implementation for smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(8), 2384-2405.
- Glass, R., Meissner, A., Gebauer, C., Stürmer, S., & Metternich, J. (2018). Identifying the barriers to Industrie 4.0. *Procedia Cirp*, 72, 985-988.
- Hertzum, M. (2014). Expertise seeking: A review. *Information processing & management*, 50(5), 775-795.
- Ho, G. T., Tang, Y. M., Tsang, K. Y., Tang, V., & Chau, K. Y. (2021). A blockchain-based system to enhance aircraft parts traceability and trackability for inventory management. *Expert Systems with Applications*, 179, 115101.
- Horváth, D., & Szabó, R. Z. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities?. *Technological forecasting and social change*, 146, 119-132.
- Hsu, Y., Chiu, J. M., & Liu, J. S. (2019, December). Digital twins for industry 4.0 and beyond. In *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 526-530). IEEE.
- Hussain, M., Awasthi, A., & Tiwari, M. K. (2016). Interpretive structural modeling-analytic network process integrated framework for evaluating sustainable supply chain management alternatives. *Applied Mathematical Modelling*, 40(5-6), 3671-3687.
- Kagermann, D., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, retrieved April 5, 2015.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). Recommendations for implementing the

- strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Sharma, R. (2018). Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt industry 4.0 in Indian manufacturing industry. *Computers in Industry*, 101, 107-119.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Parekh, H., & Joshi, S. (2019). Modeling the internet of things adoption barriers in food retail supply chains. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 48, 154-168.
- Karadayi-Usta, S. (2019). An Interpretive Structural Analysis for Industry 4.0 Adoption Challenges. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(3), 973–978.
- Kergroach, S. (2017). Industry 4.0: New challenges and opportunities for the labour market. *Форсайт*, 11(4 (eng)), 6-8.
- Khan, A., & Turowski, K. (2016). A survey of current challenges in manufacturing industry and preparation for industry 4.0. In *Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”(IITI’16)* (pp. 15-26). Springer, Cham.
- Khan, U., & Haleem, A. (2015). Improving to smart organization: an integrated ISM and fuzzy-MICMAC modelling of barriers. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- Kiel, D., Arnold, C., & Voigt, K. I. (2017). The influence of the Industrial Internet of Things on business models of established manufacturing companies—A business level perspective. *Technovation*, 68, 4–19.
- Kiraz, A., Canpolat, O., Ozkurt, C., & Tas, kın, H. (2020). Analysis of the factors affecting the Industry 4.0 tendency with the structural equation model and an application. *Computers & Industrial Engineering*, 150, Article 106911.
- Kockmann, N. (2019). Digital methods and tools for chemical equipment and plants. *Reaction Chemistry & Engineering*, 4(9), 1522-1529.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
- Kumar, P., Bhamu, J., & Sangwan, K. S. (2021). Analysis of barriers to Industry 4.0 adoption in manufacturing organizations: An ISM approach. *Procedia CIRP*, 98, 85-90.
- Kumar, P., Singh, R. K., & Kumar, V. (2021). Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105215.
- Kumar, S., Raut, R. D., Nayal, K., Kraus, S., Yadav, V. S., & Narkhede, B. E. (2021). To identify industry 4.0 and circular economy adoption barriers in the agriculture supply chain by using ISM-ANP. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126023.
- LaGrange, E. (2019, September). Developing a digital twin: The roadmap for oil and gas optimization. In *SPE Offshore Europe Conference and Exhibition*. OnePetro.
- Lee, J., Cameron, I., & Hassall, M. (2019). Improving process safety: What roles for Digitalization and Industry 4.0?. *Process safety and environmental protection*, 132, 325-339.
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration*, 6, 1-10.
- Machado, C. G., Winroth, M., Carlsson, D., Almström, P., Centerholt, V., & Hallin, M. (2019). Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers towards increased digitalization. *Procedia Cirp*, 81, 1113-1118.
- Majumdar, A., Garg, H., & Jain, R. (2021). Managing the barriers of Industry 4.0 adoption and implementation in textile and clothing industry: Interpretive structural model and triple helix framework. *Computers in Industry*, 125, 103372.
- Mandolla, C., Petruzzelli, A. M., Percoco, G., & Urbinati, A. (2019). Building a digital twin for additive manufacturing through the exploitation of blockchain: A case analysis of the aircraft industry. *Computers in industry*, 109, 134-152.
- Mathivathanan, D., Mathiyazhagan, K., Rana, N. P., Khorana, S., & Dwivedi, Y. K. (2021). Barriers to the adoption of blockchain technology in business supply chains: a total interpretive structural modelling (TISM) approach. *International Journal of Production Research*, 59(11), 3338-3359.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valencia, E., & Eburdy, R. (2020). Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1384-1400.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valencia, E., & Eburdy, R. (2020). Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1384-1400.
- Moghaddam, M., Cadavid, M. N., Kenley, C. R., & Deshmukh, A. V. (2018). Reference architectures for smart manufacturing: A critical review. *Journal of manufacturing systems*, 49, 215-225.

- Moktadir, M. A., Ali, S. M., Kusi-Sarpong, S., & Shaikh, M. A. A. (2018). Assessing challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection. *Process safety and environmental protection*, 117, 730-741.
- Müller, J. M. (2019). Assessing the barriers to Industry 4.0 implementation from a workers' perspective. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2189-2194.
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia manufacturing*, 11, 939-948.
- Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102726.
- Pereira, A. C., & Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206-1214.
- Pfeiffer, B. M., Oppelt, M., & Leingang, C. (2019, September). Evolution of a digital twin for a steam cracker. In *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 467-474). IEEE.
- Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics*, 224, 107546.
- Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics*, 224, 107546.
- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *Ieee Access*, 8, 21980-22012.
- Rejeb, A., Keogh, J. G., Leong, G. K., & Treiblmaier, H. (2021). Potentials and challenges of augmented reality smart glasses in logistics and supply chain management: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3747-3776.
- Ren, L., Sun, Y., Cui, J., & Zhang, L. (2018). Bearing remaining useful life prediction based on deep autoencoder and deep neural networks. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 71-77.
- Rengier, F., Mehndiratta, A., Von Tengg-Kobligk, H., Zechmann, C. M., Unterhinninghofen, R., Kauczor, H. U., & Giesel, F. L. (2010). 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 5(4), 335-341.
- Rodríguez, A. J., Pastorino, R., Carro-Lagoa, Á., Janssens, K., & Naya, M. Á. (2021). Hardware acceleration of multibody simulations for real-time embedded applications. *Multibody System Dynamics*, 51(4), 455-473.
- Rojek, I., Mikołajewski, D., & Dostatni, E. (2020). Digital twins in product lifecycle for sustainability in manufacturing and maintenance. *Applied Sciences*, 11(1), 31.
- Sahu, C. K., Young, C., & Rai, R. (2021). Artificial intelligence (AI) in augmented reality (AR)-assisted manufacturing applications: a review. *International Journal of Production Research*, 59(16), 4903-4959.
- Sarkar, B. D., & Shankar, R. (2021). Understanding the barriers of port logistics for effective operation in the Industry 4.0 era: Data-driven decision making. *International Journal of Information Management Data Insights*, 1(2), 100031.
- Scheifele, C., Verl, A., & Riedel, O. (2019). Real-time co-simulation for the virtual commissioning of production systems. *Procedia CIRP*, 79, 397-402.
- Schröder, C. (2016). The challenges of industry 4.0 for small and medium-sized enterprises. *Friedrich-Ebert-Stiftung: Bonn, Germany*.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia Cirp*, 52, 161-166.
- Singh, R., & Bhanot, N. (2020). An integrated DEMATEL-MMDE-ISM based approach for analysing the barriers of IoT implementation in the manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 58(8), 2454-2476.
- Singhal, D., Tripathy, S., & Jena, S. K. (2019). Sustainability through remanufacturing of e-waste: Examination of critical factors in the Indian context. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 128-139.
- Sony, M., & Naik, S. (2020). Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction. *Production Planning & Control*, 31(10), 799-815.
- Spalart, P. R., & Venkatakrisnan, V. (2016). On the role and challenges of CFD in the aerospace industry. *The Aeronautical Journal*, 120(1223), 209-232.
- Srivastava, S., & Dubey, R. (2014). Supply chain skill gap modelling using interpretive structural modelling and MICMAC analysis. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 20(1), 33-47.
- Suresh, N., Hemamala, K., & Ashok, N. (2018). Challenges in implementing industry revolution 4.0 in Indian manufacturing SMES: insights from five case studies. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.4), 136-139.

- Suresh, N., Hemamala, K., & Ashok, N. (2018). Challenges in implementing industry revolution 4.0 in INDIAN manufacturing SMES: insights from five case studies. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.4), 136-139.
- Thoben, K. D., Wiesner, S., & Wuest, T. (2017). "Industrie 4.0" and smart manufacturing-a review of research issues and application examples. *International journal of automation technology*, 11(1), 4-16.
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does industry 4.0 mean to supply chain?. *Procedia manufacturing*, 13, 1175-1182.
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does industry 4.0 mean to supply chain?. *Procedia manufacturing*, 13, 1175-1182
- Uhlemann, T. H. J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. *Procedia Cirp*, 61, 335-340.
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0–a glimpse. *Procedia manufacturing*, 20, 233-238.
- Wang, G., Gunasekaran, A., Ngai, E. W., & Papadopoulos, T. (2016). Big data analytics in logistics and supply chain management: Certain investigations for research and applications. *International journal of production economics*, 176, 98-110.
- Wang, G., Gunasekaran, A., Ngai, E. W., & Papadopoulos, T. (2016). Big data analytics in logistics and supply chain management: Certain investigations for research and applications. *International journal of production economics*, 176, 98-110.
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. *International journal of distributed sensor networks*, 12(1), 3159805.
- Wankhede, V. A., & Vinodh, S. (2021). Analysis of industry 4.0 challenges using best worst method: A case study. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107487.
- Wisskirchen, G., Biacabe, B., Bormann, U., Muntz, A., Niehaus, G., Soler, G., von Brauchitsch, B., et al. (2017). *Artificial Intelligence and Robotics and Their Impact on the Workplace*. IBA Global Employment Institute, 11(5), 49–67.
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International journal of production research*, 56(8), 2941-2962.
- Yadav, G., & Desai, T. N. (2017). Analyzing lean six sigma enablers: a hybrid ISM-fuzzy MICMAC approach. *The TQM Journal*.
- Yang, Z., & Lin, Y. (2020). The effects of supply chain collaboration on green innovation performance: An interpretive structural modeling analysis. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 1-10.
- Yun, J. P., Shin, W. C., Koo, G., Kim, M. S., Lee, C., & Lee, S. J. (2020). Automated defect inspection system for metal surfaces based on deep learning and data augmentation. *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 317-324.
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015, August). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In *2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)* (pp. 2147-2152). IEEE.
- Zhou, X., Eibeck, A., Lim, M. Q., Krdzavac, N. B., & Kraft, M. (2019). An agent composition framework for the J-Park Simulator-A knowledge graph for the process industry. *Computers & Chemical Engineering*, 130, 106577.

Ek - Tablo A1

İLK ULAŞILABİLİRLİK MATRİSİ														
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
B1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
B3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1
B4	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
B5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
B6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
B7	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
B8	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
B9	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
B10	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B11	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
B12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
B13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B14	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1

NİHAİ ULAŞILABİLİRLİK MATRİSİ														
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
B1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B2	1	1	1	1	1	1	1	1*	1	1	1	1	1	1
B3	1	1	1	1	1	1	1*	1	1	1*	1*	1	1*	1
B4	1	1	1	1	1	1	1*	1	1	1	1	1	1	1
B5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1*
B6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1*	1	1	1
B7	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1*	1*	1	1	1
B8	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1*
B9	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1*
B10	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B11	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
B12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1*
B13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B14	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1

Ek - Tablo A2

İTERASYON-1	Ulaşılabilirlik seti	Öncül set	Keşşim seti	Seviye
1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	I
2	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12,13,14	
3	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,8,9,12,13,14	1,2,3,4,5,6,8,9,12,13,14	
4	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,8,9,10,11,12,13,14	
5	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	
6	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14	
7	1,2,5,6,7,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,5,6,7,9,10,11,12,13,14	I
8	1,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,8,10,11,12,13	1,3,4,5,6,8,10,11,12,13	
9	1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12,13	
10	1,2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	I
11	1,2,4,5,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,13,14	1,2,4,5,7,8,9,10,11,12,13,14	I
12	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13	
13	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	I
14	1,2,3,4,6,7,10,11,13,14	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14	1,2,3,4,6,7,10,11,13,14	I
İTERASYON-2	Ulaşılabilirlik seti	Öncül set	Keşşim seti	Seviye
2	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,9,12	2,3,4,5,6,9,12	
3	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	II
4	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	II
5	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	II
6	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	II
8	3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,12	3,4,5,6,8,12	
9	2,3,4,5,6,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,9,12	II
12	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	2,3,4,5,6,8,9,12	II
İTERASYON-3	Ulaşılabilirlik seti	Öncül set	Keşşim seti	Seviye
2	2,8	2	2	
8	8	2,8	8	III
İTERASYON-4	Ulaşılabilirlik seti	Öncül set	Keşşim seti	Seviye
2	2	2	2	IV