

Geliş Tarihi:

20.02.2022

Kabul Tarihi:

27.05.2022


Yayımlanma Tarihi:

15.06.2022

Kaynakça Gösterimi: Eşiyok, S., & Demircioğlu, M. (2022). OECD ülkelerinin endüstri 4.0 düzeylerinin Critic ve Codas yöntemleri ile değerlendirilmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 21(43), 377-398. doi: 10.46928/iticusbe.1076484


OECD ÜLKELERİNİN ENDÜSTRİ 4.0 DÜZEYLERİNİN CRITIC VE CODAS YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Araştırma

Sevgi Eşiyok 

Sorumlu Yazar (Correspondence)

sevgiesiyok@gmail.com

Mert Demircioğlu 

Çukurova Üniversitesi

mdemircioglu@cu.edu.tr

Sevgi Eşiyok, 2013 Endüstri Mühendisliği mezunudur. Çukurova Üniversitesi İşletme Bölümü Sayısal Yöntemler Ana Bilim Dalı'nda doktora öğrencisidir. Sayısal yöntemler ve yöneylem araştırması alanlarında araştırmaları bulunmaktadır.

Mert Demircioğlu, Çukurova Üniversitesi İşletme Bölümü Sayısal Yöntemler Ana Bilim Dalı'nda doktor öğretim üyesidir. İstatistik ve yöneylem araştırması alanında ders vermekte ve bu alanlarda araştırmaları bulunmaktadır.

OECD ÜLKELERİNİN ENDÜSTRİ 4.0 DÜZEYLERİNİN CRITIC VE CODAS YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Sevgi Eşiyok
sevgiesiyok@gmail.com
Mert Demircioğlu
mdemircioglu@cu.edu.tr

Özet

Endüstri 4.0, tüm dünya ülkeleri için sürdürülebilir ekonomik büyüme için büyük bir önem arz etmektedir. Özellikle de Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler açısından gelişmiş ülkelerle rekabet edebilme yeteneğine sahip olma açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, ülkeler bu dönüşüm için gerekli tüm yönetim şekli, altyapı, süreç ve teknolojilere uyum sağlamak zorundadır.

Amaç: Araştırmada, ülkelerin 2019 yılına ait Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm göstergelerinin çok kriterli karar verme teknikleri ile değerlendirilmesi ve ülke performanslarının belirlenip karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu araştırmada ülke performansları değerlendirilirken patent başvuruları, Ar-Ge'ye yapılan gayri safi yurtiçi harcamalar (GSYİH'nın yüzdesi), toplam araştırmacı sayısı, sabit geniş bant abonelikleri, güvenli internet sunucuları, bilgisayar, iletişim ve diğer hizmetler (ticari hizmet ihracatının yüzdesi), imalat endüstrisinde robot yoğunluğu, küresel rekabet endeksi, kişi başına GSYİH, iş yapma kolaylığı, küresel inovasyon endeksi, hükümet yapay zekâ hazırlık endeksi, ağ hazırlığı endeksi, UNCTAD B2C E-Ticaret endeksi gibi birçok farklı kriter kullanılmıştır. Her ülkenin Endüstri 4.0 ve dijitalleşme ile ilişkili kriterlerinin ağırlıklandırılması çok kriterli karar verme tekniklerinden CRITIC yöntemi ile, ülkelerin sıralaması ise CODAS yöntemi ile yapılmıştır.

Bulgular: Araştırma sonucunda ekonomik ve teknolojik olarak gelişmiş olan ülkelerden ABD, Japonya, Güney Kore ve Almanya gibi ülkeler Endüstri 4.0 ve dijitalleşme göstergelerine göre üst sıralarda yer almıştır. Danimarka, İsveç, Fransa, İsviçre, Finlandiya, İngiltere gibi Avrupa'nın önde gelen ülkeleri ise ortalama seviyelerde yer almışlardır. Sıralamada 20 ülke arasında Slovenya, İspanya, Slovakya, Türkiye ve Meksika son sıralarda yer almıştır.

Özgünlük: Bu çalışmada ülkelerin Endüstri 4.0 ve dijitalleşme performansları çok kriterli karar verme yöntemi ile sıralanmıştır. Araştırma ile ilgili literatür geniş çaplı irdelenmiş ve ülkelerin Endüstri 4.0 performanslarının araştırıldığı çalışmaların özellikle Türkiye'de oldukça az olduğu sonucuna varılmıştır. Performans ölçümünde kullanılan kriterler bu çalışmalar doğrultusunda belirlenmiştir. Bu sayede kriterlerin çeşitliliği açısından bu alanda yapılan en kapsamlı çalışmalardan biridir.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, Dijital Dönüşüm, CRITIC, CODAS

JEL Sınıflandırması: C38, O14, O57

EVALUATION OF INDUSTRY 4.0 LEVELS OF OECD COUNTRIES WITH CRITIC AND CODAS METHODS

Abstract

Industry 4.0 is critical for long-term economic success for all countries around the world. It is crucial, especially for developing countries like Turkey, in terms of being able to compete with developed countries. As a result, countries must adapt to all forms of management, infrastructure, procedures, and technology that are required to complete this change.

Purpose: The goal of the study is to use multi-criteria decision-making methodologies to analyze the countries' Industry 4.0 and digital transformation indicators for 2019, as well as to determine and compare country performance.

Method: In this research, while evaluating country performances, many different criteria such as patent applications, gross domestic spending on R&D (% of GDP), total number of researchers, fixed broadband subscriptions, secure internet servers, computers, communication and other services (% of commercial service exports), robot density in the manufacturing industry, global competitiveness index, GDP per capita, ease of doing business, global innovation index, government artificial intelligence readiness index, network readiness index, UNCTAD B2C E-Commerce index were used. The weighting of each country's criteria related to Industry 4.0 and digitalization was made by the CRITIC method, one of the multi-criteria decision-making techniques, and the ranking of the countries was made by the CODAS method.

Findings: According to the findings, economically and technologically developed countries such as the United States, Japan, South Korea, and Germany ranked first in terms of Industry 4.0 and digitalization metrics. Leading European countries such as Denmark, Sweden, France, Switzerland, Finland, and the United Kingdom were all above average. Slovenia, Spain, Slovakia, Turkey, and Mexico were ranked last out of twenty countries.

Originality: In this study, the countries' Industry 4.0 and digitalization performances are sorted out, along with the decision-making approach for a variety of criteria. The research literature has been thoroughly analyzed, and it has been found that studies analyzing the performance of countries in Industry 4.0 are limited, particularly in Turkey. The performance measuring standards were developed based on the findings of these investigations. As a result, it is one of the most extensive studies in this topic in terms of criteria diversity.

Keywords: Industry 4.0, Digital Transformation, CRITIC, CODAS

JEL Classification: C38, O14, O57

GİRİŞ

Küreselleşme ile artan rekabete uyum sağlamak ve hızla değişen tüketici talep ve isteklerine zamanında cevap vermek kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu, üretim faaliyetlerinin belki de tüm süreçlerini yeniden değerlendirmeyi gerekli kılmaktadır (Dombrowski vd., 2017). Endüstri 4.0 bağlamında iş süreçleri ve faaliyetlerindeki önemli, radikal değişiklikleri yönetmek ve bunlarla başa çıkmak için kuruluşların ve ülkelerin hızlı tepki verme yeteneğine sahip olmaları gerekmektedir. Bu gereklilik, mevcut dijitalleşme ve yenilikçi trendlerle uyumlu olması gereken ve bunları yansıtabilen performans ölçüm sistemi ile karşılanabilir (Kloviene ve Uosyte, 2019).

“Yeni sanayi devrimi”, “Dördüncü Sanayi Devrimi” ve “Endüstri 4.0” gibi terimler son zamanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Her sanayi devrimi, sosyoekonomik statü için avantajlar ve yeni zorluklar getirir ve bu durum, Endüstri 4.0 teriminin önemli bir rol oynadığı Dördüncü Sanayi Devrimi için de farklı değildir (Hejduková vd., 2020). Bu devrimler, özellikle üretim süreçlerinde işgücü faktörü ihtiyacını azaltmayı ve üretim süreçlerini otonom hale getirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca rekabet gücünü artırması, maliyetleri düşürmesi, kaynakları etkin kullanması, üretim ve operasyon süreçlerinde insan kaynaklı hataları azaltması beklenmektedir. Tüm bu nedenlerle kurumların ve ülkelerin dijital bir dönüşüm olan Endüstri 4.0'a entegrasyonu özellikle önemlidir. Endüstri 4.0, aşağıdaki üç ilerleme işaretinin bir sonucu olarak endüstrinin dönüşümü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir:

-Üretim ve bilgi sistemlerinin dijitalleşmesi

-Sistemlerin otomasyonu

-Otomatik veri alışverişi (Hejduková vd., 2020).

Üretim süreçlerinde sürekli artan zorluklarla başa çıkmak için Endüstri 4.0 yaklaşımı ilk kez 2011'de Hannover Messe'de sunulmuştur. Endüstri 4.0, “iş süreçlerinin ve değer yaratan ağların yönetimi için insanların, ekipmanların ve nesnelerin gerçek zamanlı, akıllı ve dijital ağları” olarak tanımlanabilir. Bu, ürün geliştirme sürecinin tüm katılımcılarının ve diğer paydaşların birbirleriyle iletişim kurmasını, verileri tanımlanmış algoritmalara göre analiz etmesini ve üretim akışlarının kontrol etmesini ve müşterilerin potansiyel sürekli iyileştirme faaliyetlerini başlatmasını sağlar (Dombrowski vd., 2017).

Endüstri 4.0 uygulamalarını etkin bir şekilde uygulayan kurumlar ve ülkeler, rekabet avantajlarını, işgücü piyasasını ve operasyonel süreçlerini iyileştirebilir. Üretimdeki bu gelişmeler ekonomik büyümeyi de beraberinde getirecektir (Mahdiraji vd., 2020). Bu amaçla yakın zamanda birçok ülke Endüstri 4.0 teknolojilerinin geliştirilmesini ve benimsenmesini artırmak için yerel programlar oluşturmuştur. Bu bağlamda Endüstri 4.0 kavramının doğduğu yer olan Almanya'da "Yüksek Teknoloji Stratejisi 2020", Amerika Birleşik Devletleri'nde "Gelişmiş Üretim Ortaklığı", Çin'de "Made in China 2025" ve Fransa'da "La Nouvelle France Industrielle" kurulmuştur. Hem gelişmiş

hem de gelişmekte olan ÷lkelerdeki tüm bu programlar, Endüstri 4.0 kavramlarını ve teknolojilerini yerel firmalarda yaygınlaştırmayı amaçlamaktadır. Dünyadaki ve gelişmiş ÷lkelerdeki bu gelişmeler ışığında, Türkiye’de de yeni sanayi devrimindeki konumun güçlendirilmesi ve sanayide dijital dönüşümün hızlandırılması amacıyla Şubat 2016’da gerçekleştirilen Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu’nun kararı ile Yürütme, Uygulama ve İzleme Modeli (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı), Hedef Odaklı Ar-Ge Çalışmaları (TUBİTAK), Teşvik ve Destek Mekanizmaları (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı) kurulmuştur (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu [TÜBİTAK], 2016). Yine de gelişmiş teknolojilerin benimsenmesinin gelişmekte olan ÷lkeler için daha zor olabileceği bilinmektedir.

Bu çalışmada, öncelikle incelenen literatür çalışmaları doğrultusunda ÷lkelerin Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm için sahip olması gereken kriterler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kriterler çok kriterli karar verme teknikleri aracılığıyla değerlendirilerek ÷lkelerin Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm düzeyleri belirlenmiştir. ÷lkeler değerlendirilirken patent başvuruları, Ar-Ge harcamalarının GSYİH’deki payı, toplam araştırmacı sayısı, sabit geniş bant abonelikleri, güvenli internet sunucuları, bilgisayar, iletişim ve diğer hizmetler, mevcut endüstriyel robot sayıları, küresel rekabet endeksi, GSYİH, iş yapma kolaylığı, küresel inovasyon endeksi, hükümet yapay zeka hazırlık endeksi, ağ hazırlığı endeksi, UNCTAD B2C E-Ticaret endeksi gibi birçok alandaki farklı kriterleri kullanılmıştır. Öncelikle her ÷lkenin Endüstri 4.0 ile ilişkili kriterleri CRITIC yöntemi ile ağırlıklandırılmış, ağırlıklandırılan kriterlere göre ÷lkeler CODAS yöntemi ile sıralanmıştır.

KAVRAMSAL ÇERÇEVE

İlk olarak 2011 yılında Almanya Hannover Fuarı’nda tanıtılan Endüstri 4.0 devrimi, yeni bir kavram olmasının yanında son zamanlarda büyük ilgi görmeye başlamıştır. Akademik alandaki birçok çalışmada Endüstri 4.0 kavramına ve beraberinde getirdiği yeniliklere yer verilmektedir. Farklı teknolojik altyapı ve entegrasyon zorlukları barındıran Endüstri 4.0 teknolojileri için literatürde farklı çerçeveler çizilmiş ve karşılaşılan problemler organizasyonlar ve ÷lkeler bazında tartışılmıştır.

Bilgen 2021’de ÷lkelerin Endüstri 4.0’a ulaşması için başarı faktörlerinin araştırılmasını amaçlamıştır. İlk olarak, sanayi devrimleri ve dönem değişimleri ile ilişkisini belirlemek için Kondratieff dalgaları incelenmiştir. İkinci olarak, birleşik bir gösterge oluşturularak ÷lkelerin küresel konumlarına yönelik istatistiksel bir analiz yapılmıştır. 217 ÷lke için 18 değişken seçilmiş ve verilerin uygunluğunu sağlamak için istatistiksel yöntemler kullanılarak değişken sayısı 9 ve ÷lke sayısı 65 olarak bulunmuştur.

Hejduková vd. 2020’de “Endüstri 4.0 görelisi performans endeksi” ismini verdikleri kendi göstergelerini oluşturmuşlardır. Bu Endeks, Dünya Ekonomik Forumu’nun metodolojisi kullanılarak hesaplanmıştır. Kendi bileşik göstergelerinin hesaplanması, Endüstri 4.0 performansının zaman içindeki gelişimini kaydetmeyi ve böylece üye devletlerin göreceli konumlarını değerlendirmeyi mümkün kılmıştır. Araştırmada 2011 ve 2019 yılları için küme analizi yapılmış ve çalışmanın verileri

Eurostat ve Worldbank istatistiklerinden çıkarılmıştır. Endüstri 4.0 görelî performans endeksi açısından bakıldığında, liderler İrlanda, Danimarka ve Finlandiya olmuştur. 2011 yılında İsveç birinci sırayı almış ancak bu pozisyonu koruyamamış ve 7. sıraya düşmüştür. Litvanya'nın yenilikçi işletmelerin oranındaki büyüme ile ilerlemiş olan küresel bir dijital ekonomi olarak konumunu hızla geliştirdiği görülmüştür.

Mahdiraji vd. 2020'deki çalışmalarında Endüstri 4.0'ın uygulanmasına yönelik stratejileri belirlemeyi ve önceliklendirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla öncelikle stratejilerin değerlendirme özellikleri ve Endüstri 4.0'ı uygulamaya koyma stratejilerini tanıtmışlar, ardından BWM yöntemini kullanarak nitelikleri uzmanların görüşüne göre ağırlıklandırmışlardır. Ardından, bir vaka çalışması olarak Fara Sanat Company'de Endüstri 4.0'ı uygulama stratejileri, TODIM yönteminin Interval Valued Intuitionistic Fuzzy (IVIF) temel alınarak sıralanmıştır. Elde edilen sonuçlar, 'Teknoloji', 'Kalite' ve 'İşlem' niteliklerinin sırasıyla en yüksek öneme sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca “yeni iş modelleri geliştirme”, “bilgi sistemlerini iyileştirme” ve “insan kaynakları yönetimi” stratejileri de üst sıralarda yer almıştır. Çalışmanın sonucunda, bazı araştırma ve yönetici tavsiyeleri sunulmuştur. Endüstri 4.0'ı uygulamak için stratejilere sahip olmanın çok önemli bir çözüm olduğu vurgulanmış, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinin uygun stratejileri benimsemek ve seçmek için yararlı bir araç olduğu savunulmuştur. Araştırmada, IVIF bilgisi altında BWM-TODIM'in yeni ve hibrit bir kombinasyonu sunulmuştur.

Yakut 2020'de OECD ülkelerinin BİT gelişmişliklerini 2017-2019 dönemine ait kriterlerle değerlendirmiştir. Ülkelerin BİT gelişmişlikleri araştırılırken ele alınan kriterler Entropi yöntemiyle ağırlıklandırılmış, MOORA ve WASPAS yöntemleriyle sıralanmıştır. Yapılan analiz sonucunda MOORA ve WASPAS yöntemlerinin sıralama sonuçları Copeland yönteminin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak her iki yöntemin sonucu da Copeland yönteminin sıralaması ile yüksek oranda benzer çıkmıştır.

Silva vd. 2020'de ülkelerin, Avrupa Küresel İnovasyon Göstergelerinin (GII) çok kriterli karar verme yöntemleri ile analizine göre sıralamada nasıl yer aldığını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Ülke performanslarının sıralanması için TOPSIS ve PROMETHEE yönteminden yararlanmışlardır.

Yıldız vd. 2020'de OECD ülkelerinin Endüstri 4.0 performanslarının karşılaştırmalı bir analizini gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır. Araştırmada verileri bulunan 25 OECD ülkesinin Endüstri 4.0 göstergeleri kullanılarak 2013, 2014, 2015 yılları için Veri Zarflama Analizi, Bootstrap Veri Zarflama Analizi ve Malmquist Toplam Faktör Verimliliği Endeksi yöntemleri kullanılmıştır. 25 OECD ülkesinin Endüstri 4.0 performanslarının verimliliğini hesaplamak için üç girdi ve iki çıktı değişkeni kullanılmıştır. İhracatta yüksek teknoloji ürün oranı, mal ihracatında bilgi ve teknoloji malları ihracatının oranı ve araştırma ve geliştirmede araştırmacı sayısı girdi değişkeni, patent başvuru sayısı (ülkede yerleşik ve yerleşik olmayanların toplamı) ve araştırma ve geliştirme harcamalarının GSYİH içindeki oranı ise çıktı değişkeni olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda Avusturya, Belçika,

Çekya, Danimarka, Fransa, Almanya, Japonya, G. Kore ve İsveç genel olarak etkili olurken ve zaman içinde verimlilik puanlarında genel bir iyileşme olmazken Kanada, Letonya, Slovakya, Estonya ve İsveç gibi bazı ülkeler zamanla etkinliklerini artırmışlardır.

Yıldızbaşı ve Ünlü 2020'de akıllı fabrikalarda kullanılan teknolojileri detaylı olarak incelemişler, Endüstri 4.0 teknolojilerini kullanan işletmeler arasında belirlenen teknolojilerin uygulama ve kullanım oranları üzerinde karşılaştırma yapmışlardır. Çalışmada, literatürde sıklıkla kullanılan, kriterleri ve önem ağırlıklarını belirleyen Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Araştırma pilot uygulama olarak Ankara'da bulunan üç kimyasal üretim fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Belirlenen kriterler ve karar vericiler yardımıyla Endüstri 4.0'a en iyi uyum sağlayan firmalar tespit edilmiştir. Kriter ağırlıkları Fuzzy AHP'den alınmış, karşılaştırma ise Fuzzy TOPSIS yönteminin ağırlıkları kullanılarak yapılmıştır.

Anuşlu ve Fırat 2019'daki çalışmalarında Küresel İnovasyon Endeksi, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri Endeksi, Lojistik Performans Endeksi ve Çevresel Performans Endeksi'ni kullanarak Endüstri 4.0'ın önemli etki alanları kapsamındaki ülkeleri kümeleme analizi ile gruplamışlardır. Veri seti 2018 yılı raporlarında ortak olan 116 ülkenin GII, SDGI, LPI ve EPI endekslerinden seçilen 11 değişken ve 116 gözlemden oluşmaktadır. Veri ön işleme aşamasında eksik olan veriler Random Forest yöntemi kullanılarak tamamlanmıştır. Seçilen endekslerin Endüstri 4.0 ile ilgili olup olmadığını test etmek amacı ile korelasyon katsayıları hesaplanmış ve %5 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Kümeleme analizi sonucunda ülkeler üç kümeye ayrılmıştır. Küme 1'de (yüksek performanslı) 28, küme 2'de (orta performanslı) 59 ülke ve küme 3'te (düşük performanslı) 29 ülke tespit edilmiştir

Castelo-Branco vd. 2019'da Eurostat tarafından kurumsal sektörün BİT kullanımı ve dijitalleştirilmesi hakkında yayınlanan kapsamlı bilgi setini kullanarak AB ülkelerindeki imalat firmalarında Endüstri 4.0'ın benimsenme derecesinin ölçülmesi amaçlamışlardır.

Klincewicz 2019'da Endüstri 4.0 dönüşümünü destekleyen kilit teknolojik alan olan robotik alanında patent alma durumunu analiz etmiştir. Polonya'daki robotik icatların çeşitli yönlerini ortaya çıkaran ve Polonya'daki durumu robotik patentlemedeki küresel eğilimlerle karşılaştıran altı ayrıntılı araştırma sorusu yanıtlanmıştır. Araştırma bibliyometrik tekniklere ve Polonya Patent Ofisi ve Derwent İnovasyon İndeksi veri tabanlarından gelen patent başvurularıyla ilgili veri kümelerinin kullanımına dayanmaktadır.

Kohnová vd. 2019'da Endüstri 4.0'a hazırlık bağlamında Slovakya, Çekya, Avusturya, Almanya ve İsviçre'den şirketlerin karşılaştırmasına odaklanmışlardır. Endüstri 4.0'dan gelen iş dönüşümü ve teknoloji dönüşümü ile yakından bağlantılı 7 alan bazında seçilmiş ülkelere şirketler, 2015-2016 dönemine göre analiz edilmiştir. Analiz edilen ana sorular, çevredeki radikal değişikliklerden en fazla etkilenecek olan çalışan eğitimi ve öğretimi, organizasyon kültürü, strateji veya organizasyon süreçleridir.

Oralhan ve Büyüktürk 2019'daki çalışmalarında Türkiye'nin inovasyon performansının Avrupa Birliği ülkeleri ile karşılaştırılması için çok kriterli karar verme yöntemlerinden yararlanmışlardır. Araştırmada Avrupa İnovasyon Endeksi hesaplamasında yer alan insan kaynakları, araştırma sistemleri, yenilikçi ortam, finansman ve destek, yenilikçiler, bağlantılar, entelektüel varlıklar, istihdam etkileri ve satış etkileri göstergeleri ele alınmıştır. Değerlendirmede inovasyon performansları incelenmesi için Avrupa Birliği'ne üye olan 28 ülke, Türkiye'nin de aralarında bulunduğu 3 aday ülke ve 5 adet komşu ülkenin göstergeleri ele alınmıştır. 2018 yılı Avrupa İnovasyon Endeksi raporundan elde edilen kriterlerin değerleri, TOPSIS ve MOORA metotları ile değerlendirilmiştir. Sonuçların birçoğu birbirine yakın olmasına rağmen bazı ülkelerin sıralamalarında değişiklikler gözlemlenmiştir. Araştırma sonucunda inovasyon performanslarına göre ilk üç sırada İsveç, İsveç ve Danimarka yer almıştır.

Öztürk ve Alaşahan 2019'daki çalışmalarında Küresel İnovasyon Endeksi'nde Türkiye'nin de dahil olduğu dokuz ülkeyi kapsayan bir örneklem için Endüstri 4.0'ı ülkeler arasında Panel veri analizi yöntemiyle karşılaştırmıştır. Çalışmada GSYİH, Küresel İnovasyon Endeksi, yüksek teknoloji ürün ihracı, patent başvuru sayısı ve Ar-Ge harcamaları gibi değişkenler kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, Türkiye'nin Endüstri 4.0'da bir güç olabilmek için daha fazla teknoloji ihraç etmesi ve yüksek teknoloji üretim yapması gerektiğine dikkat çekilmiştir. Ayrıca bulgular, Türkiye'nin bu alanda eğitime ve Ar-Ge çalışmalarına daha fazla önem vermesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Ünlü ve Atik 2018'deki çalışmalarında Endüstri 4.0'a geçiş konusunda ampirik analizlerde Türkiye ve Avrupa Birliği ülkelerindeki firmaları karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışmada, Avrupa Komisyonu tarafından işletmeler için kriter olarak yayınlanan Dijital Ekonomi ve Toplumun İzlenmesi 2016-2021 başlıklı rapordan on farklı kriter seçilmiştir. Çalışmanın sonuçları faktör analizi ve küme analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Atik ve Ünlü 2020'deki bir diğer çalışmalarında 2016 yılı için Endüstri 4.0 göstergelerini kullanarak Avrupa Birliği üye ülkeleri için bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada, Endüstri 4.0 ile ilgili sayısal uçurum, temel bileşen analizi ve çok boyutlu ölçekleme analizi gibi çok değişkenli istatistiksel tekniklerle belirlenmiştir. Analiz için 11 değişken kullanılmıştır. Büyük veri, bulut bilişim ve radyo frekansı hizmetleri ile ilgili göstergeler analize dahil edilmiştir. Araştırma sonucunda Finlandiya, İngiltere ve Almanya gibi ekonomik açıdan gelişmiş ülkeler Endüstri 4.0 açısından yüksek performansa sahip çıkarken; G. Kıbrıs, Bulgaristan ve Romanya gibi ülkeler AB ortalamasının altında performans sergilemiştir.

Ataman 2018'deki çalışmasında tereddütlü AHP yöntemi ile savunma sanayinde Endüstri 4.0 düzeyini incelemiştir. Alanında uzman üç kişi ile beş ana kriter kullanılarak strateji, yönetim ve organizasyon, insan ve Ar-Ge kültürü, ürün ve teknoloji, operasyon ve on yedi alt kriter üzerinde anket yöntemi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda uzmanların değerlendirmesi ile strateji kriterinin diğerlerine göre daha önemli olduğu ortaya çıkmıştır.

Dalenogare vd. 2018’de Brezilya endüstrisindeki 2225 şirketi temsil eden 27 endüstriyel sektörden oluşan büyük ölçekli bir anketten elde edilen ikincil verilerin kullanımına dayanarak farklı Endüstri 4.0 teknolojilerinin benimsenmesinin ürün, operasyonlar ve yan etkiler açısından beklenen faydalarla nasıl ilişkilendirildiğini incelemişlerdir. Çalışmada Brezilya Endüstrisinin Endüstri 4.0 ile ilgili teknolojilerin faydaları hakkındaki algısını üç endüstriyel performans ölçütü için analiz edilmiştir: Ürün, operasyonlar ve yan etkiler. Analiz için regresyon analizinden yararlanılmıştır. Araştırma sonucunda bu teknolojilerin bazılarının beklenen endüstriyel faydalarla pozitif olarak ilişkili olduğu, diğerlerinin ise henüz benimsenmenin çok erken bir aşamasında olduğu ve bu nedenle, beklenen net faydaların olmadığı gösterilmiştir.

Kılıç ve Alkan 2018’de Dördüncü sanayi devriminin Türkiye ve dünyanın literatür taramasını çeşitli veriler eşliğinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada dünyanın ve Türkiye’nin robotik sektör verileri, Ar-Ge harcama verileri, üniversite bölümlerine göre iş gücü durumu verileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca 2022’de %6 olarak hedeflenen yüksek teknoloji ürün ihracatında Türkiye’nin gelişmiş ve yükselen ekonomiler arasındaki konumu analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda Ar-Ge harcamalarına ayrılan payların artırılması gerektiği, üniversite ve kurumlarda mühendislik alanlarına ve uygulama birimlerine yapılan yatırımın artırılması, nitelikli katma değer yaratan üretime daha fazla önem verilmesi gibi sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Kökümer 2018’de firmaların dijital dönüşüm düzeylerini ölçmeyi amaçlamıştır. Çalışmada beyaz eşya sektöründe hizmet veren 7 firmada dört ana kriter, yirmi üç alt kriterden oluşan bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir. MACHBETH ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak firmaların dijital dönüşüm yetkinlikleri ölçülmüştür. Çalışma sonucunda dönüşüm için gerekli olan yetkin personel alt yapısı açısından firmaların çoğu henüz pilot proje yapabilecek personel alt yapısına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Schumacher vd. 2016’da ayırık üretim alanındaki endüstriyel işletmelerin Endüstri 4.0 gelişmişliğini değerlendirmek için ampirik olarak temellendirilmiş yeni bir model geliştirmişler ve bunun uygulanmasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın temel amacı son zamanlarda geliştirilen modellerin hakim teknoloji odağını organizasyonel yönleri de dahil ederek genişletmektir. Genel olarak, Endüstri 4.0 gelişmişliğini değerlendirmek için 9 boyut tanımlanmış ve bunlara 62 madde atanmıştır. “Ürünler”, “Müşteriler”, “Operasyonlar” ve “Teknoloji” boyutlarına ek olarak “Strateji”, “Liderlik”, “Kültür” ve “İnsan” boyutları eklenerek değerlendirmeye organizasyonel boyutların dahil edilmesi sağlanmıştır. Daha sonra, model pratik bir araca dönüştürülmüş ve birkaç şirkette test edilmiştir.

YÖNTEM

Endüstri 4.0’ın ölçümüne yönelik göstergeler, araştırma ve bilimsel yayınlarda oldukça az sayıdadır (Hejduková vd., 2020). İncelenen literatür çalışmaları neticesinde ülkelerin ve organizasyonların Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm performanslarını ölçmek için sıklıkla başvurulan 14 kriter belirlenmiştir. Bu kriterlerin neleri ifade ettiği ve nasıl değerlendirildiği aşağıda ifade edilmiştir.

Patent başvuruları (K1): Bir şey yapmanın yeni bir yolunu sağlayan veya bir soruna yeni bir teknik çözüm sunan bir ürün veya süreç için yapılan başvurulardır. Öztürk ve Alaşahan 2019'daki çalışmalarında Türkiye'nin de dahil olduğu dokuz ülkeyi kapsayan bir örneklem için Endüstri 4.0'ı ülkeler arasında Panel veri analizi yöntemiyle karşılaştırırken patent başvuru sayısını değişken olarak kullanmıştır.

Ar-Ge harcamalarının GSYİH'daki payı (K2): Ar-Ge'ye yapılan gayri safi yurtiçi harcama, bir ülkedeki tüm yerleşik şirketler, araştırma enstitüleri, üniversite ve devlet laboratuvarları vb. tarafından yürütülen toplam Ar-Ge harcaması (cari ve sermaye) olarak tanımlanır. Ar-Ge ile ilgili bilgiler her zaman inovasyon kapasitesine sahip bilim ve teknolojiye ülke düzeyini belirlemek için kullanılır. Ar-Ge'nin somut faktör girdilerinin elde edilmesinde ve kullanılmasında rekabet avantajları sağlayarak firma performansına katkıda bulunduğu belirtilmektedir (Bilgen, 2021). Yıldız vd. 2020'de OECD ülkelerinin Endüstri 4.0 performanslarının karşılaştırmalı bir analizini gerçekleştirirken 2013, 2014, 2015 yılları için Veri Zarflama Analizi, Bootstrap Veri Zarflama Analizi ve Malmquist Toplam Faktör Verimliliği Endeksi yöntemleri kullanmıştır. 25 OECD ülkesinin Endüstri 4.0 performanslarının verimliliğini hesaplamak için araştırma ve geliştirme harcamalarının GSYİH içindeki oranını çıktı değişkeni olarak belirlemişlerdir. Çalışma, ülkelerin bu konudaki kapasitelerinin karşılaştırılmasını amaçlandığından Ar-Ge harcamaları seçilmiştir.

Toplam araştırmacı (K3): Araştırmacılar, ilgili projelerin yönetiminde olduğu kadar yeni bilgi, ürün, süreç, yöntem ve sistemlerin tasarlanması veya yaratılmasıyla uğraşan profesyonellerdir. Bu gösterge, çalışan 1000 kişi ve araştırmacı sayısı olarak ölçülmektedir. Yıldız vd. 2020'de OECD ülkelerinin Endüstri 4.0 performanslarının karşılaştırmalı bir analizini gerçekleştirirken araştırma ve geliştirmede araştırmacı sayısını girdi değişkeni olarak belirlemişlerdir.

Sabit geniş bant abonelikleri (K4): Sabit geniş bant abonelikleri, 256 kbit/s'ye eşit veya daha yüksek aşağı akış hızlarında, genel İnternet'e (bir TCP/IP bağlantısı) yüksek hızlı erişime yönelik sabit abonelikleri ifade eder. Buna kablo modem, DSL, eve/binaya kadar fiber, diğer sabit (kablolu) geniş bant abonelikleri, uydu geniş bant ve karasal sabit kablosuz geniş bant dahildir. Bu toplam, ödeme yönteminden bağımsız olarak ölçülür. Mobil-hücresele ağlar aracılığıyla veri iletişimine (İnternet dahil) erişimi olan abonelikleri içermez. Sabit WiMAX ve diğer sabit kablosuz teknolojileri içermelidir. Hem konut aboneliklerini hem de kuruluşlar için abonelikleri içerir. Her 100 kişi başına ifade edilir.

Güvenli internet sunucuları (K5): Netcraft Güvenli Sunucu Anketinde bulunan farklı, genel olarak güvenilen TLS/SSL sertifikalarının sayısıdır. 1 milyon kişi başına ifade edilir.

Bilgisayar, iletişim ve diğer hizmetler (K6): Bilgisayar, iletişim ve diğer hizmetler uluslararası telekomünikasyon, posta ve kurye hizmetleri gibi faaliyetleri içerir. Ticari hizmet ihracatının yüzdesi olarak ifade edilir. Yakut 2020'de OECD ülkelerinin 2017-2019 dönemine ait BİT (bilgi ve iletişim

teknolojileri) gelişmişliklerini çok kriterli karar verme teknikleriyle karşılaştırırken bilgisayar kullanım ve internet bağlantısı erişimini değişken olarak belirlemiştir.

İmalat endüstrisinde robot yoğunluğu (K7): İmalatta kullanılan robot yoğunluğu, çalışan sayısına göre değerlendirilir ve 10.000 çalışan başına düşen sayı ile ifade edilir. Yeni nesil robotik ve bununla ilişkili teknolojiler, Endüstri 4.0 ve endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IoT) bağlamında işbirlikçi ve akıllı üretimin dinamik ihtiyaçlarını karşılamak için daha önemli bir rol oynayacaktır (Gao vd., 2020).

Küresel Rekabet Endeksi 4.0 (K8): Ülkelerin rekabetçilik puanları Dünya Ekonomik Forumu tarafından her yıl tekrar edilen kapsamlı bir çalışma olan Küresel Rekabet Endeksi, dünya ülkelerinin rekabetçilik puanlarına göre sıralanmış bir listesidir. Raporun düzenlenme amacı ülkelerin rekabet düzeylerini geliştirebilmeleri için güçlü ve zayıf yönlerinin belirlenerek yönetim ve kurumlara bir yol gösterebilmektir. 2018 yılında yayımlanan raporda ise özellikle Endüstri 4.0 ve küresel rekabetçilik başlığı ile dördüncü endüstri devrimine ayrıca önem verilmiştir. Rapor ülkelerin üretim yapısı değişimindeki farklılıklara da ayrıca bir tanımlama ve kılavuz etkisi yaratmıştır. Endeksin dört ana başlığı şu şekildedir: Beşeri sermaye, etkinleştirici çevre, piyasalar ve inovasyon ekosistemi.

Kişi başına GSYİH (K9): Kişi başına GSYİH, gayri safi yurtiçi hasılanın yıl ortası nüfusa bölümüdür. GSYİH, ekonomideki tüm yerleşik üreticiler tarafından eklenen brüt değer ile herhangi bir ürün vergileri ve ürünlerin değerine dahil edilmeyen tüm sübvansiyonların toplamıdır. GSYİH, bir ülkenin mal ve hizmetlerin toplam çıktısını gösterdiği ve ülkelerin ekonomik performansını karşılaştırmak için en önemli ekonomik göstergelerden biri olarak kabul edildiğinden değişken olarak seçilmiştir.

İş Yapma Kolaylığı (K10): İş yapmanın kolaylığı, her bir İş Yapma Kolaylığı göstergesinde en iyi düzenleyici performansa yakınlığı göstererek, düzenleyici en iyi uygulama açısından kıyaslama ekonomilerini puanlar. Bir ekonominin puanı, 0 ile 100 arasında bir ölçekte belirtilir; burada 0, en kötü düzenleme performansını ve 100 en iyi düzenleme performansını temsil eder.

Küresel İnovasyon Endeksi (K11): Gelişmiş ülkeler, üretim süreçlerinde aksamalara neden olmak için araştırma ve geliştirme uygulamalarını teşvik etmek, üretim zinciri boyunca değer katmak, üretim operasyonlarında ve hizmetlerinde sürdürülebilirliği teşvik etmek için rekabetçi stratejiler ve uygulamalar yoluyla inovasyon politikalarını teşvik etme eğilimindedir. Bu bağlamda, 1960'larda ortaya çıkan teoriler, ülkelerin sosyal ve ekonomik kalkınma olarak kabul edilmesi için yenilik ve fikri mülkiyet kavramında ülke gelişimini dikkate almak için farklı bakış açıları vardır. İnovasyon, güçlü ekonomik politikaların ve sistemlerin inşa edilmesinin yanı sıra sürekli yeniliği teşvik eder (Silva vd., 2020) Bu sebeple, ülkelerin inovasyon skorlarını belirlemek amacıyla Dünya Fikri Mülkiyet Örgütü (WIPO) tarafından yayımlanan Küresel inovasyon endeksi, iki alt endeksten oluşmaktadır. Bunlar inovasyon girdi alt endeksi ve inovasyon çıktı alt endeksidir. İnovasyon girdi alt endeksinde beş temel değişken, inovasyon çıktı alt endeksinde iki temel değişken bulunmaktadır. Toplam yedi değişkenin her biri de üç bileşenden oluşmaktadır. Araştırmada kullanılan veriler; kamu ve özel sektör kuruluşlarından elde edilen nicel veriler, alanında uzman kuruluşların yayınladıkları

diğer endekslerin verileri, Dünya Ekonomik Forumu yönetici anketi verileri kullanılarak elde edilmektedir (WIPO, 2012). Oralhan ve Büyüktürk 2019'daki çalışmalarında Türkiye'nin inovasyon performansının Avrupa Birliği ülkeleri ile karşılaştırılması için çok kriterli karar verme yöntemlerinden yararlanmışlardır. Değerlendirmede inovasyon performansları incelenmesi için Avrupa Birliği'ne üye olan 28 ülke, Türkiye'nin de aralarında bulunduğu 3 aday ülke ve 5 adet komşu ülkenin göstergeleri ele alınmıştır. 2018 yılı Avrupa İnovasyon Endeksi Puanlama tablosundan temin edilen göstergelerin değerleri analiz edilmiştir. Anuşlu ve Fırat'ın 2019'daki çalışmasında Küresel İnovasyon Endeksi, ülkelerin Endüstri 4.0'ın önemli etki alanları kapsamında kümeleme analizi ile gruplandırılması yapılırken kullanılmıştır.

Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi (K12): Hükümet yapay zekâ hazırlık endeksi (Government AI Readiness), herhangi bir hükümetin yapay zeka kullanmaya hazır olup olmadığına dair genel bir bakış sağlamak için tasarlanmış nicel bir araç takımıdır. Genel puan, dört üst düzey küme altında gruplandırılmış 11 girdi ölçütünden oluşur: Yönetim, altyapı ve veri, yetenekler ve eğitim, devlet ve kamu hizmetleri (Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi raporu, 2019). Yapay zeka hazırlık endeksi, hükümetlerin yapay zekadan faydalanma kapasitesi hakkında bilgi verir (Bilgen, 2021). Bilgen 2021'de ülkelerin Endüstri 4.0'a ulaşması için başarı faktörlerini araştırmayı amaçladığı çalışmasında hükümet yapay zekâ hazırlık endeksini değişken olarak tanımlamıştır.

Ağ Hazırlığı Endeksi (K13): Ağ hazırlığı endeksi (The network readiness index), INSEAD ile iş birliği içinde Dünya Ekonomik Forumu tarafından yıllık Küresel Bilgi Teknolojisi Raporlarının bir parçası olarak her yıl yayınlanan bir endekstir. Ülkelerin bilgi ve iletişim teknolojisinin sunduğu fırsatlardan yararlanmaya hazır olma derecesini ölçmeyi amaçlar. Ağ hazırlığı endeksi, bilgi ve iletişim teknolojilerinin uygulamasını ve kullanımını değerlendirir. Hejduková vd. 2020'de "Endüstri 4.0 görece performans endeksi" ismini verdikleri kendi göstergelerini oluşturdukları çalışmalarında Ağ hazırlığı endeksinin Endüstri 4.0 performansı ile ilişkisine değinmişlerdir.

UNCTAD B2C E-ticaret Endeksi (K14): UNCTAD B2C E-ticaret Endeksi (UNCTAD B2C E-commerce index), bir ekonominin çevrimiçi alışverişi desteklemeye hazır olup olmadığını ölçer. Endeks, çevrimiçi alışverişle oldukça ilişkili ve geniş bir ülke kapsamına sahip dört göstergeden oluşmaktadır. Bir finans kuruluşunda veya mobil para hizmeti sağlayıcısında hesap sahipliği, internet kullanan bireylerin yüzdesi, posta güvenilirlik endeksi ve 1 milyon kişi başına düşen güvenli internet sunucuları sayısı endekste ki kriterlerdir.

CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) Yöntemi

İlk olarak Diakoulaki vd. tarafından 1995 yılında yapılan bir çalışma ile CRITIC yöntemi literatürdeki yerini almıştır. CRITIC yöntemi, çok kriterli karar verme problemlerinde göreceli öneme sahip nesnel ağırlıkların belirlenmesini amaçlar. Elde edilen ağırlıklar, karar probleminin yapısında yer alan hem kontrast yoğunluğunu hem de çatışmayı içerir. Geliştirilen yöntem, değerlendirme kriterlerinde yer

alan tüm bilgilerin çıkarılması için değerlendirme matrisinin analitik incelemesine dayanmaktadır (Diakoulaki vd., 1995).

Bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran en önemli özellik, ağırlıklandırma yapılırken uzman görüşlerinden elde edilen sonuçların değil, kriterlere ait standart sapmaların ve korelasyonların göz önünde bulundurulmasıdır (Ayçin, 2020).

CRITIC yöntemi beş aşamadan oluşur ve yönteme ait adımlar aşağıdaki gibidir (Diakoulaki vd., 1995):

Adım 1: Karar Matrisinin Oluşturulması

Karar matrisi farklı alternatiflere karşılık gelen kriter değerlerini içerir. Denklem (1)'deki gibi oluşturulur.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

x_{ij} , i. alternatifin j. kriter değerini ifade eder.

Adım 2: Karar Matrisinin Normalizasyonu

Normalizasyon işleminde maksimizasyon yönlü kriterler için denklem (2), minimizasyon yönlü kriterler için denklem (3)'ten yararlanır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (3)$$

Adım 3: İlişki Katsayı Matrisinin Oluşturulması

Değerlendirme kriterleri arasındaki ilişkilerin derecesini ölçmek için kullanılan ilişki katsayıları (ρ_{jk}) denklem (4)'teki gibi hesaplanır.

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j) \cdot (r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \cdot \sum_{i=1}^m (r_{ik} - \bar{r}_k)^2}}$$

$$j, k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Adım 4: C_j Değerlerinin Hesaplanması

Her iki özelliği birleştiren ve j. kriterde bulunan toplam bilgiyi ifade eden C_j , normalize edilmiş karar matrisinin sütun değerlerinin standart sapması σ_j da kullanılarak hesaplanır. Bu işlemler için denklem (5) ve (6)'dan yararlanılabilir.

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}{m-1}} \quad (6)$$

Adım 5: Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

Kriterlere ait nesnel ağırlıklar denklem (7) yardımıyla hesaplanabilir.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^n C_k} \quad j, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Nesnel ağırlık değerleri büyükten küçüğe sıralanır. Ortaya çıkan en yüksek ağırlığa sahip kriterin daha önemli olduğu sonucuna ulaşılır.

CODAS (Combinative Distance-based Assessment) Yöntemi

CODAS, çok kriterli karar verme problemlerinin çözümü için ilk kez Ghorabae vd. tarafından 2016 yılında önerilen güncel bir yöntemdir. Yöntemde karar problemini oluşturan alternatiflerin performansları negatif-ideal çözüme uzaklıkları baz alınarak belirlenir. Uzaklıkların hesaplanmasında Öklidyen (Euclidean) ve Manhattan (Taxicab) uzaklığı yaklaşımları kullanılır (Bakır ve Alptekin, 2019).

CODAS yöntemi 8 adımdan oluşur (Ghorabae vd., 2016):

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

n alternatif, m kriterden oluşan karar matrisi denklem (8)'deki gibi oluşturulur.

$$X = [x_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Burada x_{ij} ($x_{ij} \geq 0$) i . alternatifin j .kriter üzerindeki performans değerini gösterir ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ve $j \in \{1, 2, \dots, m\}$).

Adım 2: Normalize matrisin hesaplanması

Bu adımda X matrisinin doğrusal normalizasyon işlemi denklem (9) yardımıyla yapılır.

$$n_{ij} = f(x) = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}, & j \in N_b \\ \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}}, & j \in N_c \end{cases} \quad (9)$$

Burada N_b ve N_c sırasıyla fayda ve maliyet kriterlerini temsil eder.

Adım 3: Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisini hesaplanması

Normalize edilen matris denklem (10)'daki gibi her sütun elemanları ilgili ağırlık katsayıları w_j ile çarpılır.

$$r_{ij} = w_j n_{ij} \quad (10)$$

Burada w_j ($0 < w_j < 1$) j . kriterin ağırlığını göstermektedir ve $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 'dir.

Adım 4: Negatif ideal çözümün bulunması

Negatif-ideal çözüm noktasının belirlenmesi için matrisin sütun değerlerinin minimumları seçilir. Negatif-ideal çözüm noktası belirlenirken denklem (11) ve (12)'den yararlanılır.

$$ns = [ns_j]_{1 \times m} \quad (11)$$

$$ns_j = \min_i r_{ij} \quad (12)$$

Adım 5: Alternatiflerin Negatif-ideal çözümden Öklid ve Taxicab uzaklıklarının hesaplanması

Negatif-ideal çözüm noktasından uzaklıklar belirlenirken Öklidyen ve Taxicab uzaklığı yaklaşımları kullanılır. Her alternatifin Öklidyen uzaklığı (E_i), denklem (13), Taxicab uzaklığı (T_i), denklem (14) yardımıyla hesaplanabilir.

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - ns_j)^2} \quad (13)$$

$$T_i = |(r_{ij} - ns_j)| \quad (14)$$

Adım 6: Karşılaştırmalı değerlendirme matrisinin oluşturulması

Her alternatifin diğer alternatiflere olan Öklidyen ve Taxicab uzaklığı denklem (15) ve (16) yardımıyla karşılaştırılır.

$$Ra = [h_{ik}]_{n \times n} \quad (15)$$

$$h_{ik} = (E_i - E_k) + (\psi(E_i - E_k) \times (T_i - T_k)) \quad (16)$$

Burada $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ve ψ , iki alternatifin Öklid mesafelerinin eşitliğini tanımak için bir eşik fonksiyonunu belirtir ve denklem (17)'deki gibi tanımlanır:

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & |x| \geq \tau \\ 0, & |x| < \tau \end{cases} \quad (17)$$

Bu fonksiyonda τ , karar verici tarafından ayarlanabilen eşik parametresidir. Bu parametrenin 0,01 ile 0,05 arasında bir değere ayarlanması önerilir (Ghorabae vd., 2016).

Adım 7: Değerlendirme skorlarının hesaplanması

Her alternatifin değerlendirme skoru denklem (18) yardımıyla hesaplanır.

$$H_{ik} = \sum_{k=1}^n h_{ik} \quad (18)$$

Adım 8: Son olarak alternatiflere ait H skorlarını büyükten küçüğe sıralanması ile alternatifler iyiden kötüye sıralanmış olur.

ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Çalışmada OECD'ye üye 20 ülke ve bu ülkelerin Endüstri 4.0 performanslarında etkili olduğu düşünülen 14 kritere ait karar matrisi Tablo 1' deki gibidir. Bu kriterlerden patent başvuruları, sabit geniş bant abonelikleri, güvenli internet sunucuları, kişi başına GSYİH, iş yapma kolaylığı ve bilgisayar, iletişim ve diğer hizmetler kriterlerinin değerleri Dünya Bankası'nın resmi internet sitesinden elde edilmiştir. Ar-Ge harcamalarının GSYİH'daki payı ve toplam araştırmacı sayısı OECD'nin resmi sitesinden alınırken imalat endüstrisinde robot yoğunluğu değeri Uluslararası Robotik Federasyonu (IFR-International Federation of Robotics)'nin sitesinden elde edilmiştir. Küresel Rekabet Endeksi 4.0 (GCI4) Dünya Ekonomik Forumu raporundan, Küresel İnovasyon Endeksi WIPO (World Intellectual Property Organization) raporundan, hükümet yapay zekâ hazırlık Endeksi Oxford Insights raporundan, ağ hazırlığı endeksi Ağ Hazırlığı Endeksi 2019 raporundan, UNCTAD B2C E-ticaret endeksi ise UNCTAD B2C E-ticaret endeksi 2019 raporundan alınmıştır.

Tablo 1. Karar Matrisi

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
ABD	285113	3,1	9,8	34,7	123980	48,9	228	83,7	65279,5	84	61,7	8,8	80,3	91,3
Almanya	46632	3,2	10	42,0	77970	56,6	346	81,8	46794,9	80	57,4	8,8	78,2	92,9
Avusturya	2066	3,1	11,6	28,1	26298	41,7	189	76,6	50114,4	79	50,9	7,5	74,4	89,7
Belçika	876	3,2	12,4	39,8	19655	62,0	214	76,4	46591,5	75	50,2	6,9	72,6	87,9
Çekya	765	1,9	7,8	35,0	56186	50,5	147	70,9	23660,1	76	49,4	6,7	65,1	85,3
Danimarka	1351	2,9	14,9	43,9	277330	34,3	243	81,2	59775,7	85	58,4	8,6	81,1	94,2
Finlandiya	1321	2,8	15	32,5	57692	73,8	149	80,2	48678,3	80	59,8	8,8	80,3	94,4
Fransa	14103	2,2	11	45,7	29313	53,9	177	78,8	40578,6	77	54,3	8,6	73,4	90,4
Güney Kore	171603	4,6	15,9	42,8	4544	49,7	868	79,6	31936,8	84	56,6	6,8	73,8	89,4
İngiltere	12061	1,8	9,7	39,8	35988	51,7	91	81,2	43070,5	84	61,3	9,1	77,7	94,4

İspanya	1288	1,3	7,1	33,4	17695	34,2	191	75,3	29555,3	78	47,9	6,3	68,0	82,4
İsveç	1802	3,4	15,1	40,2	25688	70,2	274	81,2	51939,4	82	63,7	8,7	82,7	89,6
İsviçre	1369	3,18	9,2	46,8	95783	51,7	161	82,3	85334,5	77	67,2	7,5	81,1	95,5
İtalya	9229	1,5	6,3	28,9	15313	39,9	212	71,5	33641,6	73	46,3	7,5	63,2	81,6
Japonya	245372	3,2	9,8	33,5	18701	56,6	364	82,3	40777,6	78	54,7	8,6	76,2	87,6
Kanada	4238	1,6	8,8	40,8	35896	49,3	165	79,6	46326,7	80	53,9	8,7	74,7	91,8
Meksika	1305	0,3	1,1	15,2	271	1,5	33	64,9	9950,5	72	36,1	6,7	51,4	47,5
Slovakya	206	0,8	6,9	29,3	20091	43,9	169	66,8	19303,5	76	42,1	5,9	62,0	85,3
Slovenya	255	2	10	30,2	42530	36,1	157	70,2	25942,9	77	45,3	6,2	66,9	82,7
Türkiye	7871	1,1	4,9	17,1	5438	11,1	29	62,1	9121,5	77	37,0	5,9	53,8	71,8

20 OECD ülkesinin Endüstri 4.0 performanslarının ölçülmesi için tespit edilen 14 kriter CRITIC yöntemiyle ağırlıklandırılmış, ülkeler CODAS yöntemi ile sıralanmıştır. Öncelikle 20 ülkenin 14 kriter değeri için oluşturulan karar matrisi normalize edilmiş ve normalize matrise göre 14 kriterin ilişki katsayısı matrisi oluşturulmuştur. Her iki özelliği birleştiren ve j. kriterde bulunan toplam bilgiyi ifade eden C_j değeri, normalize edilmiş karar matrisinin sütun değerlerinin standart sapması σ_j da kullanılarak hesaplanmıştır. Kriterlere ait nesnel ağırlıklar denklem (7) yardımıyla hesaplanmış ve nesnel ağırlık değerleri büyükten küçüğe sıralanmıştır. Ortaya çıkan en yüksek ağırlığa sahip kriterin daha önemli olduğu sonucuna ulaşılmış, kriter ağırlıkları Tablo 2' deki gibi gerçekleşmiştir. CRITIC yöntemine göre en yüksek ağırlığa sahip kriterler patent başvuruları, güvenli internet sunucuları ve endüstriyel robot sayıları olurken küresel rekabet endeksi ve ağ hazırlığı endeksi en düşük ağırlıklara sahip olmuştur.

Tablo 2. CRITIC Yöntemine Göre Kriter Ağırlıkları

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14
0,125	0,048	0,057	0,062	0,118	0,083	0,118	0,040	0,070	0,051	0,048	0,077	0,043	0,060

CRITIC yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak ülkeler, CODAS yöntemi ile sıralanmıştır. 20 ülke ve 14 kriter için oluşturulan karar matrisi doğrusal normalizasyon işlemi ile normalize edilmiştir. Normalize edilen matris, denklem (10) yardımıyla her sütun elemanları CRITIC yöntemi ile Tablo 2'de elde edilen ağırlık katsayıları w_j ile çarpılmıştır. Negatif-ideal çözüm noktasının belirlenmesi için matrisin sütun değerlerinin minimumları seçilmiş, denklem (11) ve (12)'den yararlanılarak Negatif-ideal çözüm noktası belirlenmiştir. Negatif-ideal çözüm noktasından uzaklıklar belirlenirken Öklidyen ve Taxicab uzaklığı yaklaşımları kullanılmıştır Her alternatifi Öklidyen uzaklığı (E_i), denklem (13), Taxicab uzaklığı (T_i), denklem (14) yardımıyla hesaplanmıştır.

Her alternatifin diğer alternatiflere olan Öklidyen ve Taxicab uzaklığı denklem (15) ve (16) yardımıyla karşılaştırılmış, $k \in \{1,2, \dots, n\}$ ve ψ , iki alternatifin Öklid mesafelerinin eşitliğini tanımak için bir eşik fonksiyonu denklem (17) yardımıyla tanımlanmıştır. Her alternatifin değerlendirme skoru denklem (18) yardımıyla hesaplanmış ve alternatiflere ait H skorları büyükten küçüğe sıralanması ile alternatifler iyiden kötüye Tablo 3'teki gibi sıralanmıştır.

Tablo 3. CODAS-CRITIC Yöntemi ile Sıralama

	Sıra
ABD	1
Japonya	2
Güney Kore	3
Almanya	4
Danimarka	5
İsveç	6
Fransa	7
İsviçre	8
Finlandiya	9
İngiltere	10
Belçika	11
Kanada	12
İtalya	13
Avusturya	14
Çekya	15
Slovenya	16
İspanya	17
Slovakya	18
Türkiye	19

SONUÇ

Bu çalışmada, incelenen literatür sonucunda belirlenen 14 kriter ile OECD'ye üye olan 20 ülke, 2019 yılına ait veriler ile Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm performanslarına göre kıyaslanmıştır. Ülkelerin değerlendirilmesinde patent başvuruları, Ar-Ge harcamalarının GSYİH'daki payı, toplam araştırmacı sayısı, sabit geniş bant abonelikleri, güvenli internet sunucuları, bilgisayar, iletişim ve diğer hizmetler, imalat endüstrisinde robot yoğunluğu, küresel rekabet endeksi, kişi başına GSYİH, iş yapma kolaylığı, küresel inovasyon endeksi, hükümet yapay zekâ hazırlık endeksi, ağ hazırlığı endeksi ve UNCTAD B2C E-ticaret endeksi kriterler olarak kullanılmıştır.

Analiz için Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden yararlanılmıştır. 14 kriterin ağırlıklandırılması için çok kriterli karar verme tekniklerinden CRITIC yönteminden yararlanılmıştır. Elde edilen ağırlıklar kullanılarak 20 ülke performanslarına göre CODAS yöntemi ile sıralanmış ve analiz edilmiştir. Ekonomik ve teknolojik olarak gelişmiş olan ülkelerden ABD, Japonya, Güney Kore ve Almanya ilk sıralarda yer almaktadır. Danimarka, İsveç, Fransa, İsviçre, Finlandiya, İngiltere gibi Avrupa'nın önde gelen ülkeleri ilk sırada yer alan ülkeleri takip etmektedirler. Sıralamada 20 ülke arasında Slovenya, İspanya, Slovakya, Türkiye ve Meksika son sıralarda yer almıştır.

Bu çalışmanın amacı, seçilen OECD üyesi 20 ülkenin Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm açısından birbirlerine göre konumlarını belirlemektir. CRITIC yöntemindeki ağırlıklara göre CODAS yönteminin kullanımını göz önünde bulundurarak gelecekteki çalışmalara daha iyi bir tanımlamanın teşvik edilmesi amaçlanmıştır. Ülkeler dijitalleşme hedeflerine ulaşmak için ekonomik kalkınma açısından gelişmiş ülkelerle mevcut farklılıklara odaklanmalıdır. Ekonomik gelişmişlik seviyesinin Endüstri 4.0 ve dijital toplum göstergeleri ile pozitif ilişkili olduğu açıkça görülmektedir. Ülkeler ve organizasyonlar farklı sayısal uçurum seviyelerine sahip ülkeler için farklı politikalar geliştirmelidir.

Bilgi ve iletişim teknolojilerinin hızla gelişmesi ile sürekli değişip gelişen taleplere uygun mal ve hizmet üretimi büyük önem kazanmıştır. Endüstri 4.0 dönüşümü sayesinde tüm dünyada gelişen bu yeni üretim ve tüketim alışkanlıklarına cevap verebilme yeteneğinin optimum düzeyde sağlanabileceği düşünülmektedir. Ülkelerin ve kurumların gelişen yeni durum ve koşullara adapte olabilmeleri Endüstri 4.0'a dönüşüm için gerekli adımları atmaları ile sağlanabilecektir. Dolayısıyla, başta gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler olmak üzere tüm ülkeler için önem arz eden bu konu ülkelerin gelecek adımları için sanayi politikalarını şekillendirecektir.

KAYNAKÇA

- Anuşlu, M. D., & Firat, S. Ü. (2019). 3rd world conference on technology, innovation and entrepreneurship (wocline) clustering analysis application on Industry 4.0-driven global indexes. *Procedia Computer Science*, 158, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.037>.
- Ataman, A. C. (2018). *Savunma sanayinde Endüstri 4.0 olgunluk parametrelerinin tereddütlü bulanık AHP yöntemi ile önceliklendirilmesi*.
- Atik, H., & Ünlü, F. (2020). Industry 4.0-related digital divide in enterprises: an analysis for the European Union-28. *Sosyoekonomi*, 225–244. <https://doi.org/10.17233/sosyoekonomi.2020.03.13>
- Ayçin, E. (2020). Personel seçim sürecinde CRITIC ve MAIRCA yöntemlerinin kullanılması. *The Business Journal*, 2020(1), 1–12.
- Bakır, M., & Alptekin, N. (2019). Hizmet kalitesi ölçümüne yeni bir yaklaşım: CODAS yöntemi ile havayolu işletmeleri üzerine bir uygulama. *Business & Management Studies: An International Journal*, 6(4), 1336–1353. <https://doi.org/10.15295/bmij.v6i4.409>
- Bilgen, H. (2021). A global comparison methodology to determine critical requirements for achieving industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121036>
- Castelo-Branco, I., Cruz-Jesus, F., & Oliveira, T. (2019). Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union. *Computers in Industry*, 107, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.01.007>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method. In *Computers Ops Res* (Vol. 22).
- Dombrowski, U., Richter, T., & Krenkel, P. (2017). Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems: A Use Cases Analysis. *Procedia Manufacturing*, 11, 1061–1068. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.217>
- Gao, Z., Wanyama, T., Singh, I., Gadhri, A., & Schmidt, R. (2020). From industry 4.0 to robotics 4.0 - A conceptual framework for collaborative and intelligent robotic systems. *Procedia Manufacturing*, 46, 591–599. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.085>
- Ghorabae, M. K., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2016). *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*. 3.
- Hejduková, P., Kureková, L., & Krechovská, M. (2020). The measurement of industry 4.0: an empirical cluster analysis for EU countries. *International Journal of Economic Sciences*, IX(1). <https://doi.org/10.20472/es.2020.9.1.007>

- Kılıç, S., & Alkan, R. M. (2018). Dördüncü Sanayi Devrimi Endüstri 4.0: Dünya ve Türkiye değerlendirmeleri. *Girişimcilik İnovasyon ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi*, 2(3), 29–49. <https://doi.org/10.31006/gipad.417536>
- Klincewicz, K. (2019). Robotics in the Context of Industry 4.0: Patenting Activities in Poland and Their Comparison with Global Developments. *Problemy Zarzadzania*, 2/2019(82), 53–95. <https://doi.org/10.7172/1644-9584.82.3>
- Kloviene, L., & Uosyte, I. (2019). Development of performance measurement system in the context of industry 4.0: A case study. *Engineering Economics*, 30(4), 472–482. <https://doi.org/10.5755/j01.ee.30.4.21728>
- Kohnová, L., Papula, J., & Salajová, N. (2019). Internal factors supporting business and technological transformation in the context of industry 4.0. *Business: Theory and Practice*, 20, 137–145. <https://doi.org/10.3846/btp.2019.13>
- Köküner, Z. (2018). *Çok kriterli karar verme yöntemleri ile beyaz eşya sektöründe Endüstri 4.0 dijital dönüşüm yetkinlik analizi*.
- Mahdiraji, H. A., Zavadskas, E. K., Skare, M., Kafshgar, F. Z. R., & Arab, A. (2020). Evaluating strategies for implementing industry 4.0: a hybrid expert oriented approach of B.W.M. and interval valued intuitionistic fuzzy T.O.D.I.M. *Economic Research-Ekonomska Istrazivanja*, 33(1), 1600–1620. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2020.1753090>
- Oralhan, B., & Büyüktürk, M. A. (2019). Avrupa Birliği Ülkeleri ve Türkiye'nin inovasyon performansının çok kriterli karar verme yöntemleriyle kıyaslanması. *European Journal of Science and Technology*, 471–484. <https://doi.org/10.31590/ejosat.571284>
- Öztürk, S., & Alaşahan, Y. (2019). Türkiye’de Endüstri 4.0 uygulamalarının değerlendirilmesi: panel veri analizi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 61, 1–18. Retrieved from <http://dergipark.gov.tr/dpusbe>
- 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. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Silva, M. do C., Gavião, L. O., Gomes, C. F. S., & Lima, G. B. A. (2020). Global Innovation Indicators analysed by multicriteria decision. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 17(4). <https://doi.org/10.14488/bjopm.2020.040>
- TÜBİTAK (2016). *Yeni Sanayi Devrimi Akıllı Üretim Sistemleri Teknoloji Yol Haritası*. https://www.tubitak.gov.tr/sites/default/files/akilli_uretim_sistemleri_tyh_v27aralik2016.pdf
- Ünlü, F., & Atik, H. (2018). *Türkiye’deki işletmelerin Endüstri 4.0’a geçiş performansı: Avrupa Birliği ülkeleri ile karşılaştırmalı ampirik analiz* (Vol. 17).
- WIPO. (2012). *The Global Innovation Index*.

Yakut, E. (2020). *OECD ülkelerinin bilgi ve iletişim teknolojileri gelişmişliklerinin MOORA ve WASPAS yöntemiyle değerlendirilerek kullanılan yöntemlerin Copeland yöntemiyle karşılaştırılması*. Retrieved from <https://orcid.org/0000-0002-1978-0217>

Yıldız, M. S., Durak, İ., & Yıldırım, M. (2020). Industry 4.0 performances of OECD countries: a data envelope analysis. *Journal of Business Research- Turk*, 12(3), 2788–2798. <https://doi.org/10.20491/isarder.2020.1008>

Yıldızbaşı, A., & Ünlü, V. (2020). Performance evaluation of SMEs towards Industry 4.0 using fuzzy group decision making methods. *SN Applied Sciences*, 2(3).<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2085-9>

İnternet Kaynakları

Toplam araştırmacı sayısı veri seti. OECD. <https://data.oecd.org/> (Erişim tarihi: 01.12.2021)

Patent başvuruları, sabit geniş bant abonelikleri, güvenli internet sunucuları, kişi başına GSYİH, iş yapma kolaylığı ve bilgisayar, iletişim ve diğer hizmetler veri seti. Worldbank. <https://data.worldbank.org/indicator> (Erişim tarihi: 01.12.2021)

İmalat endüstrisinde robot yoğunluğu. IFR. <https://ifr.org/free-downloads/> (Erişim tarihi: 02.12.2021)

Küresel Rekabet Endeksi 4.0 (GCI4) veri seti. Dünya Ekonomik Forumu raporu. https://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf (Erişim tarihi: 07.02.2022)

Küresel İnovasyon Endeksi veri seti. Dünya Ekonomik Forumu raporu.https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_gii_2019.pdf (Erişim tarihi: 07.02.2022)

Hükümet Yapay Zekâ Hazırlık Endeksi veri seti. Oxford Insights raporu. https://africa.ai4d.ai/wp-content/uploads/2019/05/ai-gov-readiness-report_v08.pdf (Erişim tarihi: 08.02.2022)

Ağ Hazırlığı endeksi veri seti. Ağ Hazırlığı endeksi 2019 raporu.<https://networkreadinessindex.org/2019/wp-content/uploads/2020/03/The-Network-Readiness-Index-2019-New-version-March-2020-2.pdf> (Erişim tarihi: 08.02.2022)

UNCTAD B2C E-ticaret endeksi veri seti UNCTAD B2C E-ticaret endeksi 2019 raporu. https://unctad.org/system/files/official-document/tn_unctad_ict4d14_en.pdf (Erişim tarihi: 08.02.2022)