



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 19.09.2024
Kabul Tarihi : 03.12.2024

Received Date : 19.09.2024
Accepted Date : 03.12.2024

ÜRETİMDE DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN BAŞARISINI DEĞERLENDİRMEK İÇİN PERFORMANS ÖLÇMEYE YÖNELİK BİR YAKLAŞIM

A PERFORMANCE MEASUREMENT APPROACH FOR EVALUATING THE SUCCESS OF DIGITAL TRANSFORMATION IN MANUFACTURING

Gökçen SARAY¹ (ORCID: 0009-0000-7185-9910)
Bilal ERVURAL^{1*} (ORCID: 0000-0002-5206-7632)

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Bilal ERVURAL, bervural@erbakan.edu.tr

ÖZET

Dijital Dönüşüm, dijital teknolojilerin kullanımıyla yeni iş modelleri ve stratejiler geliştirme sürecini ifade eder. İşletmelerin rekabet avantajı elde etmeleri ve kurumsal verimliliklerini artırmaları için dijitalleşme süreçlerine uyum sağlamaları kritik bir öneme sahiptir. Bu dönüşüme yanıt verebilmek için, işletmelerin dijital dönüşüm etkinliklerini ölçmeleri ve dijital dönüşüm yol haritalarını çizmeleri gerekmektedir. Bu çalışma, üretim sektöründeki işletmelerin dijital dönüşüm performanslarını belirlemeye yönelik bir performans ölçüm sistemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0 uygulamaları için gerekli kriterler, nesnelar, insanlar ve sistemler arasındaki etkileşimler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Belirlenen kriterler, yalnızca otomasyon, robotik, nesneların interneti, yapay zekâ ve büyük veri analitiği gibi ileri teknolojilerden değil; aynı zamanda organizasyonel faktörler ve değişime olan istek gibi insan odaklı unsurlardan da yararlanarak tanımlanmıştır. Kriterler kapsamlı bir literatür taraması sonucunda oluşturulmuş ve açıklanmıştır. Uzman görüşleri alınarak, bu kriterlerin önem derecelerini gösteren ağırlıklar hesaplanmış ve SWARA yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Dijital dönüşüm performansının ölçümünde ise Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen model, örnek bir vaka üzerinde test edilmiş ve firma performansları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Performans ölçüm, dijital dönüşüm, endüstri 4.0, akıllı fabrikalar, otomasyon.

ABSTRACT

Digital Transformation refers to the process of developing new business models and strategies through the use of digital technologies. For businesses to gain a competitive advantage and enhance corporate efficiency, it is crucial to adapt to digitalization processes. Companies must measure their digital transformation activities and chart their digital transformation roadmaps to respond to this transformation. This study aims to develop a performance measurement system for identifying the digital transformation performance of companies in the manufacturing sector. In this context, the necessary criteria for implementing digital transformation and Industry 4.0 applications have been determined by considering the interactions between objects, people, and systems. The identified criteria are defined not only by utilizing advanced technologies such as automation, robotics, the Internet of Things, artificial intelligence, and big data analytics but also by incorporating human-centered factors such as organizational aspects and the willingness to change. The criteria were established and explained through a comprehensive literature review. By obtaining expert opinions, the importance weights of these criteria were calculated and weighted using the SWARA method. Grey Relational Analysis (GRA) was used to measure digital transformation performance. The developed model was tested on a case study, and company performances were compared.

Keywords: Performance measurement, digital transformation, industry 4.0, smart factories, automation.

ToCite: SARAY, G., & ERVURAL, B., (2025). ÜRETİMDE DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN BAŞARISINI DEĞERLENDİRMEK İÇİN PERFORMANS ÖLÇMEYE YÖNELİK BİR YAKLAŞIM. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 266-284.

GİRİŞ

Günümüzün hızla dijitalleşen dünyasında, işletmelerin sürdürülebilir bir rekabet avantajı elde edebilmesi için dijital dönüşüm süreçlerine uyum sağlamları kritik hale gelmiştir (Kraus vd., 2021). Üretim süreçlerinin daha akıllı, bağımsız ve otomatik hale gelmesi, dijital teknolojilerin iş süreçlerine entegre edilmesini zorunlu kılmaktadır (Adem vd., 2022). Dijital dönüşüm, yalnızca maliyetleri düşürme ve operasyonel verimliliği artırma potansiyeli ile değil, aynı zamanda stratejik değer yaratma ve iş modellerini yeniden yapılandırma kapasitesi ile de öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, üretimdeki dijitalleşme süreçleri, Endüstri 4.0 olarak adlandırılan dördüncü sanayi devriminin bir parçası olarak değerlendirilmektedir (Gülseren ve Sağbaş, 2019).

Endüstri 4.0, işletmelerin üretim süreçlerinde dijitalleşmeyi sağlamak amacıyla siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, büyük veri analitiği, yapay zeka ve robotik gibi teknolojilerden yararlanmaktadır. Bu dönüşüm, makineler ve insanlar arasında sürekli bağlantı sağlayarak süreçlerin kesintisiz, otomatik ve daha esnek bir şekilde yönetilmesine olanak tanımaktadır (Ryalat vd., 2023). Ancak dijital dönüşüm süreçleri her işletme için farklı aşamalarda gerçekleşmekte ve işletmelerin dijital olgunluk düzeyine göre değişiklik göstermektedir (Ivancic vd., 2019). Bu nedenle, işletmelerin dijital dönüşüm kapasitelerini belirlemeleri ve uygun stratejiler geliştirmeleri için kapsamlı bir performans ölçüm sistemi geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma, üretim sektöründeki işletmeler için dijital dönüşüm performansını ölçmeye yönelik entegre bir model ortaya koymaktadır. Çalışmanın özgün yönlerinden ilki, dijital dönüşüm süreçlerinin karmaşıklığını daha iyi yansıtabilmek için hem ileri teknolojilere hem de organizasyon ve insan faktörlerine dayalı çok boyutlu bir kriter seti belirlenmesidir. Literatürdeki mevcut çalışmaların büyük çoğunluğu, dijital dönüşüm sürecinde insan faktörünü ve organizasyonel uyum gibi yumuşak unsurları yeterince dikkate almamaktadır. Bu çalışmada, dijital dönüşüm performansını ölçmek için toplamda 3 boyut, 6 ana kriter ve bu ana kriterlerin altında 26 alt kriter belirlenmiş ve bu kapsamda geniş bir çerçeve oluşturulmuştur. Geliştirilen modelin özgünlüğünü oluşturan bir diğer unsur, SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) ve Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemlerinin bir araya getirilmesiyle entegre bir performans ölçüm modeli geliştirilmesidir. SWARA yöntemi, uzman görüşlerine dayalı olarak kriterlerin önem derecelerini belirlemekte, böylece dijital dönüşüm performansının objektif ve çok boyutlu bir perspektifle değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Performans ölçüm aşamasında ise GİA yöntemi kullanılarak işletmelerin dijital dönüşüm performansları karşılaştırılmaktadır. Geliştirilen modelin etkinliği, otomotiv yan sanayi sektöründen elde edilen verilerle test edilmiştir. Bu yaklaşım, dijital dönüşüm sürecinin farklı yönlerini entegre bir çerçevede değerlendirerek stratejik karar alıcılar için kapsamlı bir araç sunmaktadır.

Bu çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 1, dijital dönüşüm kavramı ve Endüstri 4.0 uygulamalarına genel bir bakış sunmaktadır. Bölüm 2'de, dijital dönüşüm ile ilgili literatür özetlenmiştir. Bölüm 3'te ise dijital dönüşüm sürecinde dikkate alınması gereken ana ve alt kriterler ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bölüm 4, çalışmanın metodolojisini açıklamakta olup, SWARA ve GİA yöntemlerinin nasıl uygulandığı anlatılmaktadır. Bölüm 5'te örnek bir uygulama gerçekleştirilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Son olarak, Bölüm 6'da, çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve dijital dönüşüm stratejileri için önerilerde bulunulmuştur.

LİTERATÜR TARAMASI

Dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0 kavramları, işletmelerin modern teknolojiye adaptasyonu ve rekabet avantajı elde etme süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu doğrultuda dijital dönüşüm literatürü, işletmelerin dijitalleşme sürecindeki zorlukları, gerekli yetkinlikleri ve performans değerlendirme metodlarını inceleyen çok sayıda çalışma içermektedir. Dijital dönüşüm performansını ölçme konusunda yapılan çalışmalarda, kriterlerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle Endüstri 4.0 teknolojilerinin etkili bir şekilde uygulanabilmesi için gerekli olan altyapı, beceri ve organizasyonel değişiklikler, dijital dönüşümün temel boyutları olarak ele alınmaktadır.

Bu alanda yapılan çalışmalar, dijital dönüşümün başarısında teknolojik altyapının yanı sıra, işletme kültürü ve insan kaynaklarının da önemli rol oynadığını vurgulamaktadır. Dijital dönüşüm performansını değerlendirirken işletmelerin süreçlerine, ölçeklerine ve sektörel farklılıklarına göre özelleştirilebilir kriterlerin seçilmesi önerilmektedir. Örneğin, öncelikli olarak ERP yazılımları, veri altyapısı ve IoT gibi teknolojilerin önemi literatürde sıklıkla vurgulanmıştır (Kocaoğlu ve Kırmızı, 2024; Keskinlikç ve İpkin, 2023). Bu teknolojilerin dijital dönüşüm performansı üzerindeki etkileri, performans ölçümünde dikkate alınması gereken kritik faktörler olarak belirlenmiştir.

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinin dijital dönüşüm değerlendirme süreçlerinde kullanımına dair de birçok çalışma bulunmaktadır. Bunun nedeni, dijital dönüşümün işletme ve tedarik zinciri içinde çeşitli düzeylerde karar vermeyi gerektirmesidir (Lo ve Siao, 2023). Bu süreç genellikle maliyet, fayda, sosyal ve çevresel etkiler ve risk gibi çeşitli faktörleri kapsamaktadır. Organizasyonlar, ÇKKV tekniklerini kullanarak bu karmaşık karar verme prosedürlerini daha etkin bir şekilde yönetebilir ve modernize edebilir, böylece kararlarının hem hassasiyetini hem de etkinliğini artırabilir. Örneğin, ÇKKV dijital dönüşüme yönelik farklı stratejileri değerlendirme ve karşılaştırma amacıyla uygulanabilir. Bunun sonucunda işletme, hedeflerine ve gereksinimlerine en uygun stratejiyi seçebilir (Abdallah vd., 2022; Uslu vd., 2019). Ayrıca ÇKKV, dijital dönüşüm yolculuğu boyunca çeşitli paydaşların farklı ihtiyaç ve çıkarlarını uzlaştırma konusunda kuruluşlara yardımcı olabilir (Liu vd., 2024). Dijital dönüşüm risklerinin belirlenmesi ve önceliklendirilmesi amacıyla ÇKKV tekniklerinden yararlanılmaktadır (Hasani vd., 2024).

Endüstri 4.0'a yönelik olgunluk modelleri üzerine yürütülen güncel çalışmalarda, genellikle ağırlıklandırma ve değerlendirme süreçlerine yönelik çeşitli yöntem ve modeller geliştirilmiştir. Angreani vd., (2023), Endüstri 4.0 olgunluk seviyelerinin belirlenmesi için bulanık TOPSIS ve DEMATEL yöntemlerini kullanarak dijital dönüşüm süreçlerini çok boyutlu bir yaklaşımla ele almışlardır. Benzer şekilde, Chang vd., (2021), küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ) dijital dönüşüm kapasitelerini analiz etmek için DEMATEL ve VIKOR yöntemlerinden yararlanarak, teknoloji uygulamalarının işletmeler üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Örneğin, Elibal vd. (2024) tarafından geliştirilen ERP tabanlı Endüstri 4.0 olgunluk modeli, KOBİ'lerin dijital dönüşüm sürecine entegrasyonunu kolaylaştırmak amacıyla ERP işlevlerine dayalı bir değerlendirme sunmaktadır. Tuş vd., (2023) dijital dönüşüm endeksinin hesaplanması için Bayesian BWM tekniğinden yararlanmışlardır. Demirel vd., (2024) AHP, TOPSIS ve PROMETHEE yöntemlerini kullanarak Türk savunma sanayiindeki firmaların dijital olgunluk seviyelerini analiz eden bir metodolojik yaklaşım sunmaktadırlar.

Dijital dönüşümün sektörel bazda etkilerini analiz eden araştırmalarda, özellikle tekstil ve beyaz eşya sektörlerinde yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Çevik Aka (2023), tekstil sektöründe Endüstri 4.0'ın işletmelerin çeviklik özelliklerine etkisini incelemiş ve FUCOM yöntemi ile en etkili çeviklik yeteneklerini belirlemiştir. Dermenci ve Sağbaş (2023) ise beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın dijital olgunluk seviyesini AHP ve TOPSIS yöntemleri ile değerlendirmiştir. Benzer şekilde, Akman ve Kokumer (2023), beyaz eşya sektöründe dijital dönüşüm sürecindeki başlangıç noktalarını belirlemek amacıyla bir model geliştirmiştir. Bu çalışma, firmaların dijital dönüşüm yetkinliklerini başlangıç aşamasında belirleyerek yol haritası oluşturmalarına katkı sağlamaktadır. Dijital dönüşüm stratejilerinin belirlenmesi konusunda Uslu vd., (2019), ÇKKV yöntemlerini kullanarak işletmelerin Endüstri 4.0 strateji seçimlerine yönelik çözümler sunmuşlardır. AHP ve TOPSIS gibi yaygın yöntemlerin kullanıldığı bu çalışma, dijital dönüşüm stratejilerinin çok boyutlu analizinin önemine dikkat çekmektedir. Sektörel bazda geliştirilen modellerden biri olan Görçün vd., (2024) çalışması, otomotiv sektöründe dijital dönüşüm stratejilerini sürdürülebilirlik açısından değerlendirerek sektöre özgü bir yöntem sunmaktadır. Ancak bu model, daha çok teknolojik stratejilere odaklanmakta ve geniş çapta uyarlanabilir bir yapı içermemektedir.

Buna karşılık, Erik ve Kuvvetli (2021) veri zarflama analizi ile işletmelerin Endüstri 4.0 uyum yeteneğini değerlendirmiş ve dijitalleşme süreçlerinde işletmelerin bilgi teknolojileri, ARGE faaliyetleri ve süreç iyileştirme gibi kriterler üzerinden nasıl farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Özdemir (2022) ise KOBİ'lerde Endüstri 4.0 performansını değerlendirmek için bulanık performans ölçüm modeli geliştirmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan metodolojiler, dijital dönüşümün farklı sektörlerdeki uygulanabilirliğine dair geniş bir bakış açısı sunmaktadır. Dijital dönüşümün önündeki engelleri inceleyen Sharma vd., (2022), KOBİ'lerde karşılaşılan yaygın engelleri bulanık AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile analiz ederek bu engellerin üstesinden gelmek için stratejik çözümler geliştirmiştir. Sriram ve Vinodh (2021) ise COPRAS yöntemi kullanarak KOBİ'lerde Endüstri 4.0 uygulamasına hazırlık faktörlerini analiz etmişlerdir. Bu çalışmalar, dijital dönüşüm sürecinin her işletmede farklı şekillerde ortaya çıkan zorluklara karşı stratejik bir yaklaşımla ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Literatürde SWARA-GİA yönteminin dijital dönüşüm alanında sınırlı olsa da diğer sektörlerdeki karar verme süreçlerinde yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Supçiller ve Bayramoğlu, 2020; Ghoushchi vd., 2020; Muneeb vd., 2024). Enerji sektöründe belirsizlikleri azaltmak amacıyla rüzgar santrali yer seçimi (Supçiller ve Bayramoğlu, 2020), lojistik sektöründe performans düşüşlerini önlemek için finansal analiz (Özbek ve Demirkol, 2018), üretim işletmelerinin finansal performans değerlendirmesi (Özdağoğlu ve Keleş, 2019), dijital platform tercih kriterlerinin değerlendirilmesi (Erdem vd., 2023) ve kara kuşak eğitimi alacak personelin seçiminde (Çakır ve Kacı, 2018) SWARA-GİA'nın kullanımı dikkat çekmektedir.

Bu çalışmada, üretim sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerini etkin bir şekilde değerlendirmek ve bu süreçte izlenecek kritik faktörlerin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Literatürde, dijital dönüşüm performans ölçümünde SWARA ve GİA yöntemlerinin birlikte kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Bu çalışma ile dijital dönüşümde karşılaşılan belirsizliklerin azaltılması ve dijitalleşme sürecinin çok yönlü bir yaklaşımla değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada, dijital dönüşüm performansının ölçümünde, kriterlerin ağırlıklandırılmasında SWARA yöntemi ve performans hesaplamasında GİA ilk kez birlikte kullanılmıştır. Bu yöntemlerin tercih edilme nedenleri arasında, SWARA'nın subjektif kararları minimal seviyeye indirerek uzman görüşlerini sistematik bir şekilde değerlendirmesi ve az sayıda karşılaştırma yapması gibi avantajlar bulunmaktadır (Supçiller ve Bayramoğlu, 2020). SWARA yöntemi, n kriter için yalnızca $(n-1)$ adet karşılaştırma gerektirmesi nedeniyle karmaşık yapılar karar verme problemlerine uygun bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, karar vericilere kriterleri daha özgür bir şekilde değerlendirme imkanı sağlamakta, ikili karşılaştırmalar için kullanılacak sabit bir ölçek gerektirmemektedir (Stanujkic vd., 2015). Bu özellikleri sayesinde SWARA, dijital dönüşüm gibi çok boyutlu ve dinamik yapıya sahip alanlara uygulandığında hızlı ve esnek bir çözüm sunmaktadır. GİA yöntemi, performans değerlendirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan ve başarılı sonuçlar vermesiyle bilinen bir analiz tekniğidir. Özellikle ÇKKV süreçlerinde, çeşitli faktörler arasındaki ilişkileri etkili bir şekilde ortaya koyma kapasitesi sayesinde sıklıkla tercih edilmektedir (Ervural, 2023). GİA, alternatiflerin çok boyutlu performanslarını karşılaştırmada güvenilir ve tutarlı sonuçlar sunmakta, karar vericilere uygulama kolaylığı sağlamaktadır. Bu bağlamda, SWARA ve GİA yöntemlerinin dijital dönüşüm alanında sağladığı objektif analizler, işletmelerin dijitalleşme sürecindeki kritik önceliklerini belirlemesine rehberlik edecek niteliktedir. Bu çalışma, dijital dönüşüm performansını analiz etmek için yeni bir uygulama alanı sunarak literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır.

DİJİTAL DÖNÜŞÜM DEĞERLENDİRME FAKTÖRLERİNİN BELİRLENMESİ

Dijital teknolojilerin hızla gelişmesi ve dijitalleşmenin üretim süreçlerine entegrasyonu, işletmelerin dijital dönüşüm seviyelerini ölçme gerekliliğini de beraberinde getirmiştir. Dijital dönüşümün etkin bir şekilde yönetilebilmesi için işletmelerin, dijitalleşme süreçlerini doğru bir şekilde değerlendirebilmesi kritik öneme sahiptir. Bu değerlendirmeyi sağlamak amacıyla, literatürde ve uygulamada çeşitli modeller ve çerçeveler geliştirilmiştir. Ancak, her işletmenin kendi sektörel dinamiklerine ve dijitalleşme hedeflerine uygun kriterlerle dijital dönüşümünü değerlendirmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, üretim sektöründeki işletmelerin dijital dönüşüm etkinliklerini ölçmek üzere kullanılacak kriterlerin belirlenmesi için kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Dijital dönüşüm performansını etkileyen faktörler, mevcut çalışmalardaki öneriler ve uygulamalar dikkate alınarak sınıflandırılmıştır. Literatür taraması sonucunda, dijital dönüşüm süreçlerinde dikkate alınması gereken kriterler üç ana başlık altında toplanmıştır: (i) Teknolojik yetenekler, (ii) İnsan ve organizasyonel faktörler ve (iii) Operasyonel verimlilik ve entegrasyon.

Bu ana başlıklar altında, dijital dönüşüm süreçlerinin farklı yönlerini kapsayan alt başlıklar ve kriterler tanımlanmıştır. Belirlenen kriterler, dijital dönüşümün sadece ileri teknolojilerle değil, aynı zamanda işletme kültürü, çalışanların yetkinliği ve organizasyonel değişime adaptasyon kapasitesi gibi insan ve yönetsel faktörlerle de ilgili olduğunu göstermektedir.

Bu kapsamda, dijital dönüşüm performansını değerlendirmek amacıyla toplamda 6 ana kriter ve bu ana kriterler altında 26 alt kriter tanımlanmıştır. Bu kriterler, işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmelerine olanak tanıyan bir çerçeve sunmaktadır. Çalışmada kullanılan kriterler Tablo 1'de sunulmuştur.

Teknolojik Yetenekler

Dijital dönüşüm sürecinde teknolojik yetenekler, işletmelerin dijitalleşme düzeylerini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Teknolojinin bu süreçteki katkıları, üretim sistemlerini daha verimli hale getirmek, süreçleri optimize etmek ve yenilikçi çözümler sunmak açısından büyük önem taşır. Bu başlık altında, dijital dönüşümde önemli yere sahip akıllı üretim teknolojileri ve veri ile yazılım altyapısına odaklanılmaktadır.

i. Akıllı Üretim Teknolojileri (K1)

- Gelişmiş Robotik (Otonom ve İşbirlikçi Robotlar) (K1.1): Otonom ve işbirlikçi robotlar, dijital dönüşümün temel taşlarından biridir. Bu robotlar, gömülü bilişim sistemleri ve yapay zekâ tekniklerini kullanarak karar verebilme, bu kararları eyleme dönüştürebilme yeteneklerine sahiptirler. Robotlar,

üretim süreçlerinde veri toplama, analiz etme ve diğer akıllı nesnelere iletişim kurma becerisiyle işletmelerin verimliliğini artırmaktadır (Paksoy vd., 2020).

Tablo 1. Dijital Dönüşüm Etkinlik Değerlendirme Kriterleri

Ana kriterler		Alt Kriterler	Çalışma(lar)
Teknolojik Yetenekler	K1-Akıllı üretim teknolojileri	K1.1-Gelişmiş Robotik (Otonom ve İşbirlikçi Robotlar)	Ayyıldız ve Demir (2022) Biby ve Dehe (2018) Kamble vd., (2019)
		K1.2-Siber Fiziksel Sistemler	Angreani vd., (2023) Kocaoğlu ve Kırmızı (2024) Osterrieder (2020) Yıldızbaşı ve Ünlü (2020)
		K1.3-Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik	Dermenci ve Sağbaş (2023) Yıldızbaşı ve Ünlü (2020)
		K1.4-Eklemeli İmalat teknolojisi	Angreani vd., (2023) Chowdhury vd., (2024) Wagire vd., (2020)
	K2-Veri ve yazılım altyapısı	K2.1-Endüstriyel Nesnelerin İnterneti	Angreani vd., (2020) Biby ve Dehe (2018) Osterrieder (2020)
		K2.2-Endüstriyel Veri Güvenliği	Dermenci ve Sağbaş (2023) Kökümer (2018) Özdemir (2022)
		K2.3-Büyük Veri ve Analitik	Kocaoğlu ve Kırmızı (2024) Hitham vd., (2023) Yıldızbaşı ve Ünlü (2020)
		K2.4-Bulut Bilişim ve Uç Bilişim (Edge Computing)	Angreani vd., (2020) Biby ve Dehe (2018) Dermenci ve Sağbaş (2023)
		K2.5-Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) Yazılımı	Kasnak ve Özkara (2022) Özdemir (2022)
		K2.6-Blokszinciri Teknolojisi	Kasnak ve Özkara (2022) Wang ve Sao (2024)
İnsan ve Organizasyonel Faktörler:	K3-İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık	K3.1-Dijital beceriler ve yetkinlik geliştirme	Büyüközkan ve Güler (2019). Wagire vd., (2020)
		K3.2-İnsan-robot iş birliği	Osterrieder (2020) Kasnak ve Özkara (2022)
		K3.3-Yatırım ve kaynak tahsisi	Dermenci ve Sağbaş (2023) Keskin vd., (2019) Xu ve Yin (2025)
		K3.4-Dijital dönüşüm stratejisi	Büyüközkan vd., (2020) Hitham vd., (2023) Karadağ vd., (2024)
		K3.5-Liderlik Desteği ve vizyonu	Büyüközkan ve Güler (2019) Hitham vd., (2023) Chen vd., (2024)
Operasyonel verimlilik ve entegrasyon	K4-Üretim Süreci Otomasyonu	K4.1-Süreç Otomasyonu ve Kontrolü	Alkan ve Kahraman (2019) Kalender ve Zilka (2024) Angreani vd., (2023)
		K4.2-Ürün ve Üretim İzlenebilirliği	Wagire vd., (2020)
		K4.3-Kestirimci Bakım ve Arıza Tespiti	Dotoli vd., (2018)
		K4.4-Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik	Sriram ve Vinodh (2020)
	K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	K5.1-Dijital Tasarım ve Prototipleme	Doğan ve Baloğlu (2020)
		K5.2-Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı	Biby ve Dehe (2018) Kökümer (2018)
		K5.3-Envanter Optimizasyon Uygulamaları	Khan ve Ahmed (2024) Liu ve Nishi (2023)
		K5.4-Enerji Tüketiminin İzlenmesi ve Optimizasyonu	Dotoli vd., (2018) Chen vd., (2024)
		K6-Entegrasyon ve Bağlantı	Godbole (2023) Keskinlikç ve İpkin (2023)
K6-Entegrasyon ve Bağlantı	K6.2-Elektronik Ticaret Uygulamaları	Ayyıldız ve Demir (2022) Wang ve Sao (2024)	
	K6.3-Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu	Angreani vd., (2020) Ayyıldız ve Demir (2022) Büyüközkan vd., (2020)	

- **Siber Fiziksel Sistemler (K1.2):** Bu sistemler, fiziksel işlemleri sanal dünya ile entegre eden yapılardır. Sensörler ve aktüatörlerle fiziksel dünyadaki süreçleri izleyen, koordine eden ve kontrol eden bu sistemler, akıllı üretim süreçlerinde merkezi bir rol oynar. Siber-fiziksel sistemler sayesinde üretim süreçleri daha esnek ve verimli hale gelmektedir (Dökme, 2020).
 - **Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik (K1.3):** Dijital ikizler, bir ürün ya da sistemin dijital bir kopyasıdır ve gerçek zamanlı verilerle güncellenerek sanal simülasyonlar yapmayı sağlar. Bu teknoloji, üretim süreçlerini optimize etme ve bakım gereksinimlerini öngörme gibi faydalar sunar. Artırılmış gerçeklik ise, fiziksel dünyaya sanal unsurlar ekleyerek üretim süreçlerini zenginleştirir (Attaran vd., 2024).
 - **Eklemeli İmalat Teknolojisi (K1.4):** Eklemeli imalat, malzemelerin katmanlar halinde üst üste biriktirilerek nesnelerin oluşturulmasını sağlar. 3D baskı teknolojisi sayesinde hızlı ve maliyet etkin üretim süreçleri gerçekleştirilebilir. Bu teknoloji, özellikle özel ve küçük ölçekli üretimlerde önemli avantajlar sunmaktadır (Bhatia ve Sehgal, 2023).
- ii. **Veri ve yazılım altyapısı (K2)**
- **Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (K2.1):** Üretim süreçlerindeki cihazların ve makinelerin internet aracılığıyla birbirine bağlanması ve veri alışverişi yapması, üretim ortamının sürekli izlenmesini ve optimize edilmesini sağlar. Bu teknoloji sayesinde fabrikalar, süreçleri gerçek zamanlı olarak izleyip yönetebilir, üretim verimliliğini artırabilir (Kesbiç, 2020).
 - **Endüstriyel Veri Güvenliği (K2.2):** Dijitalleşen dünyada veri güvenliği kritik bir unsur haline gelmiştir. Üretim süreçlerindeki hassas bilgilerin korunması, dijital dönüşümde başarılı olmanın ön koşullarından biridir. Veri güvenliği, sadece verilerin korunmasını değil, aynı zamanda veri alışverişinin güvenli ve kesintisiz olmasını da kapsar (Cheminod vd., 2013).
 - **Büyük Veri ve Analitik (K2.3):** Büyük veri, üretim süreçlerinden elde edilen büyük hacimli verilerin analiz edilmesini sağlayarak işletmelerin stratejik karar alma süreçlerine katkıda bulunur. Büyük veri analitiği, özellikle üretim verimliliğini artırmak ve süreç optimizasyonu sağlamak açısından önemli bir role sahiptir (Sahut vd., 2022).
 - **Bulut Bilişim ve Uç Bilişim (K2.4):** Bulut bilişim, işletmelere büyük miktarda veri depolama ve işleme kapasitesi sunarken, uç bilişim teknolojisi verilerin kaynağa daha yakın bir noktada işlenmesini sağlar. Bu teknolojiler, üretim süreçlerinde esnekliği artırmak ve maliyetleri düşürmek açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Singla vd., 2018).
 - **Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) Yazılımı (K2.5):** ERP yazılımları, işletmenin tüm kaynaklarını entegre bir şekilde yönetmesini sağlayan sistemlerdir. Bu yazılımlar, üretim süreçleri, finans, muhasebe ve diğer işletme fonksiyonları arasında veri akışını sağlarken, Endüstri 4.0 ile birlikte akıllı fabrikaların temelini oluşturur (Kökümer, 2018).
 - **Blokszinciri Teknolojisi (K2.6):** Blokszincir, işletmeler arası veri paylaşımında şeffaflık ve güvenlik sağlayan bir teknoloji olarak dijital dönüşümde önemli bir yere sahiptir. İşletmeler arasındaki işlemlerin güvenli bir şekilde kaydedilmesi ve takip edilmesi, blokszincir teknolojisinin sağladığı avantajlardan biridir (Han vd., 2023).

İnsan ve Organizasyonel Faktörler

Dijital dönüşüm süreci sadece teknolojik yeniliklerle sınırlı değildir; aynı zamanda işletmelerin çalışanlarının yetkinlikleri, organizasyonel yapıları ve stratejik yaklaşımları bu süreçte kritik bir rol oynar. İnsan ve organizasyonel faktörler, işletmelerin dijital dönüşüme uyum sağlamasını ve başarıyla sürdürmesini etkileyen önemli unsurlardır. Bu başlık altında iş gücü gelişimi ve stratejik bağlılık, liderlik desteği ve kaynak tahsisi gibi konular ele alınmaktadır.

i. İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık (K3)

- **Dijital Beceriler ve Yetkinlik Geliştirme (K3.1):** İşletmelerin Endüstri 4.0'a uyum sağlaması için çalışanların dijital becerilerini geliştirmesi gerekmektedir. Dijital dönüşüm sürecinde teknolojik gelişmeler, işgücü piyasasında önemli değişikliklere neden olmakta ve bu süreç çalışanların dijital yetkinliklerini geliştirmesini gerektirmektedir. Özellikle robotik teknolojiler ve dijital sistemlerdeki ilerlemeler, mevcut iş gücünün becerilerinin sürekli olarak güncellenmesini zorunlu kılmaktadır (Goulart vd., 2022).

- İnsan-Robot İş Birliği (K3.2): Dijital dönüşümde işçilerin ve robotların birlikte çalışabilmesi, verimlilik artışı ve iş süreçlerinin optimize edilmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. İnsan-robot iş birliği, özellikle üretim alanlarında hem verimliliği artırmakta hem de çalışanların robotlarla birlikte daha etkin bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu iş birliği, endüstriyel süreçlerde insan faktörünü güçlendirirken robotların mekanik işlerde etkin rol almasına olanak tanır.
- Yatırım ve Kaynak Tahsisi (K3.3): Dijital dönüşüm sürecinde teknolojilere ve insan kaynağına yapılacak yatırımlar, sürecin başarısında kritik bir rol oynar. İşletmelerin yeni teknolojilere adaptasyon sağlaması ve çalışanlarını dijital beceriler açısından eğitmesi için bilgi teknolojilerine ve insan kaynaklarına yatırım yapması gerekmektedir. Bu yatırımlar, dijital dönüşüm süreçlerinin sürdürülebilirliğini sağlar.
- Dijital Dönüşüm Stratejisi (K3.4): İşletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde belirledikleri strateji, dijital teknolojilerin etkin bir şekilde entegre edilmesi açısından önemlidir. Dijital dönüşüm stratejisi, işletmenin genel iş hedefleriyle uyumlu olmalı ve sürdürülebilir bir dijitalleşme sürecini desteklemelidir. Net bir yol haritası ve kapsamlı bir strateji olmadan, dijital dönüşüm süreçleri başarısız olabilir (Mitroulis ve Kitsios, 2019).
- Liderlik Desteği ve Vizyonu (K3.5): Dijital dönüşümün işletmelerde başarılı olabilmesi için liderlerin sürece kararlılıkla katılımı ve destek vermesi gereklidir. Dijital liderlik, organizasyonun dijital varlıklarını stratejik hedefler doğrultusunda etkin bir şekilde yönetmeyi gerektirir. Liderlik desteği, dijital dönüşümün tüm organizasyon genelinde benimsenmesi ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Kıyak ve Bozkurt, 2020).

Operasyonel Verimlilik ve Entegrasyon

Dijital dönüşüm sürecinde operasyonel verimliliği artırmak ve işletme süreçlerini entegre etmek, işletmelerin rekabet avantajını sürdürebilmesi için büyük önem taşır. Bu bağlamda, üretim süreci otomasyonu, kesintisiz mühendislik ve optimizasyon uygulamaları, entegrasyon ve bağlantı gibi konular işletmelerin dijital dönüşümünü hızlandıran faktörler olarak öne çıkar.

i. Üretim Süreci Otomasyonu (K4)

- Süreç Otomasyonu Kontrolü (K4.1): Üretim süreçlerinde otomasyon, verimliliği artırmanın ve insan hatalarını en aza indirmenin önemli bir yoludur. Otomasyon teknolojileri, robotlar, sayısal kontrol (NC) makineleri, programlanabilir mantık kontrolörleri (PLC'ler), CNC sistemleri ve endüstriyel sensörler gibi çeşitli araçlarla sağlanabilir. Bu teknolojiler, üretim görevlerinin gerçek zamanlı izlenmesini ve kontrolünü mümkün kılar, böylece kalite, güvenlik ve üretkenlik artışı sağlar (Anonim, 2023).
- Ürün ve Üretim İzlenebilirliği (K4.2): Üretim süreçlerinin her aşamasında izlenebilirlik sağlanması, özellikle tedarik zinciri yönetimi için kritik bir unsurdur. Nesnelerin interneti (IoT), RFID etiketleri, barkodlar ve GPS gibi teknolojiler, ürünlerin tedarik zinciri boyunca her adımda izlenebilmesine olanak tanır. İzlenebilirlik sayesinde ürünlerin nerede, ne zaman ve kim tarafından üretildiği takip edilebilir, bu da kalite kontrol ve geri çağırma süreçlerini iyileştirir (Koç, 2020).
- Kestirimci Bakım ve Arıza Tespiti (K4.3): Kestirimci bakım, makine ve ekipmanlarda oluşabilecek arızaları önceden tahmin ederek, plansız duruşları en aza indiren bir yöntemdir. Makine öğrenmesi algoritmaları ve sensörler aracılığıyla toplanan veriler kullanılarak arıza tahminleri yapılır ve bakım süreçleri optimize edilir. Bu süreç, işletmelerin bakım maliyetlerini düşürmesine ve operasyonel verimliliği artırmasına yardımcı olur (Ceyhan ve Kasapbaşı, 2021; Özkat, 2021).
- Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik (K4.4): Dijital dönüşüm süreçlerinde esneklik, değişen müşteri taleplerine ve piyasa koşullarına hızla adapte olabilmek için kritik bir yetenektir. Yeniden yapılandırılabilir üretim sistemleri, modüler ve isteğe göre uyarlanabilen yapılar sunarak üretim süreçlerinin hızla değiştirilmesine olanak tanır. Bu esneklik, hatalı ürünlerin yeniden işlenebilmesi, stok maliyetlerinin azaltılması ve taleplere hızlı cevap verebilme gibi avantajlar sağlar (Santos vd., 2017).

ii. Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları (K5)

- Dijital Tasarım ve Prototipleme (K5.1): Dijital tasarım araçları ve üç boyutlu yazıcılar, ürün geliştirme süreçlerinde prototiplerin hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde üretilmesine olanak tanır. Bu yöntemler, mühendislerin daha yenilikçi ve karmaşık tasarımlar geliştirmesini sağlar, aynı zamanda üretim hatalarını

en aza indirir. Dijital prototipleme araçları, geleneksel prototipleme yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve esnek çözümler sunar (Nelson vd., 2020).

- Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı (K5.2): MES, hammaddeden bitmiş ürüne kadar üretim sürecini izleyen ve kontrol eden kapsamlı bir yazılım sistemidir. MES, operatörler için veri yönetimi, süreç izleme ve kalite kontrol işlevleri sağlar. Aynı zamanda, üretim süreçlerinin gerçek zamanlı takibini sağlayarak maliyetleri düşürür, kaliteyi artırır ve üretim süreçlerinin optimizasyonuna katkıda bulunur (Chen ve Voigt, 2020).
- Envanter Optimizasyon Uygulamaları (K5.3): Stokların doğru seviyede tutulması, maliyetleri düşürmek ve müşteri taleplerini karşılamak için önemlidir. Envanter optimizasyonu, lojistik maliyetlerini en aza indirmek ve stok fazlası veya eksikliği gibi sorunları önlemek için kullanılan yazılım ve algoritmaların uygulanmasıdır.
- Enerji Tüketiminin İzlenmesi ve Optimizasyonu (K5.4): Enerji tüketimi, dijital dönüşüm süreçlerinde dikkat edilmesi gereken önemli bir maliyet unsurudur. Sensörler ve enerji yönetim sistemleri kullanarak enerji tüketimi izlenebilir ve optimize edilebilir. Bu süreç, işletmelerin enerji maliyetlerini düşürmesine ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olur (Dotoli vd., 2016).

iii. Entegrasyon ve Bağlantı (K6)

- ERP Yazılımının Entegrasyonu (K6.1): ERP sistemleri, işletmelerin tüm departmanlarının verilerini ve süreçlerini entegre ederek iş birliği sağlar. ERP, maliyetleri düşürmek, stratejik karar almayı kolaylaştırmak, süreç iyileştirmeleri yapmak ve esnekliği artırmak için önemli bir araçtır. İşletmelerde ERP'nin entegrasyonu, verilerin gerçek zamanlı olarak departmanlar arasında paylaşılmasını sağlar, bu da daha hızlı ve etkili kararlar alınmasına yardımcı olur (Tarigan vd., 2020).
- Elektronik Ticaret Uygulamaları (K6.2): E-ticaret, işletmelerin ticari faaliyetlerini internet üzerinden gerçekleştirmelerini sağlayarak, maliyetlerin azalması ve fiyatların düşmesi gibi avantajlar sunar. E-ticaret, geleneksel ticaret modellerini değiştirerek daha hızlı ve etkin bir müşteri deneyimi sağlar (Güven, 2020).
- Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu (K6.3): İşletmelerde dijital teknolojilerin entegrasyonu, süreçlerin verimli bir şekilde yönetilmesi ve optimize edilmesi için kritik öneme sahiptir. API'ler, middleware, SOA ve EDI gibi entegrasyon teknolojileri, işletmelerin farklı sistemler arasında veri alışverişini yapmasını ve süreçlerini sorunsuz bir şekilde yönetmesini sağlar.

METODOLOJİ

Bu bölümde, işletmelerin dijital dönüşüm performanslarını değerlendirmek amacıyla kullanılan yöntemler ve sürecin detayları ele alınmaktadır. Çalışmada, kriter ağırlıklandırma için SWARA yöntemi, performans ölçüm aşamasında ise GİA yöntemi kullanılmıştır.

SWARA Yöntemi

SWARA (Aşamalı Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi) yöntemi, kriterlerin ağırlıklandırılması sürecinde karar vericilerin uzmanlıklarına dayanarak daha öznel bir değerlendirme yapmalarına olanak sağlar. SWARA yöntemi, ilk olarak Keršulienė, Zavadskas ve Turskis tarafından önerilmiştir (Keršulienė vd., 2010) ve son yıllarda ağırlık belirleme amacıyla sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biri haline gelmiştir. SWARA yöntemi, basit yapısıyla farklı uzmanların veya karar vericilerin aynı anda ortak bir amaç için iş birliği yapmasını kolaylaştırır. Bu durum, özellikle zaman kısıtlaması olan projelerde önemli bir avantaj sunar (Hashemkhani Zolfani vd., 2015). AHP gibi yöntemlere kıyasla, SWARA yönteminde yapılan ikili karşılaştırmaların sayısı daha azdır, bu da işlem maliyetini azaltır. Ayrıca, işlem adımları daha basit ve hızlı olduğundan, karar vericilerin zamandan tasarruf etmesini sağlar (Çakır, 2018). SWARA yöntemi, karar vericilere kendi önceliklerini seçme imkânı tanır. Kriterler arasındaki öncelik sıralamasının uzmanlar tarafından belirlenmesi, sonuçların daha stratejik olmasını sağlar. SWARA yönteminin şu şekildedir:

Adım 1: Uzmanlar, kriterler için önem sıralaması yapar. Örneğin en önemli olan ilk sırada, en önemsiz olan en son sırada olacak şekilde sıralama yapılır.

Adım 2: İkinci kriterden başlanarak, $j-1$. kriter ile j . kriterin kıyaslaması yapılır ve $j-1$. kriterin j . kritere karşı göreceli önemi belirlenir. Bu belirlenen değere (s_j) "ortalama değer karşılaştırmalı önemi" adı verilmiştir. s_j değeri için uzmanlar, 0,05 ve katlarını kullanmışlardır.

Adım 3: Tüm kriterler için katsayı değeri k_j , Denklem (1) kullanılarak hesaplanır.

$$k_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad (1)$$

Adım 4: Tüm kriterler için q_j değeri yani düzeltilmiş ağırlıklar Denklem (2) kullanılarak hesaplanır. Birinci sırada yer alan kriterin q_j değeri 1 olarak kabul edilir ve q_j hesaplanırken q_j 'ye göre yapılan sıralama dikkate alınır.

$$q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{k_{j-1}}{k_j} & j > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Adım 5: Bütün kriterler için nihai ağırlıkların hesaplaması Denklem (3) kullanılarak yapılır.

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Gri İlişkisel Analiz Yöntemi

Gri İlişkisel Analiz (GİA), 1982 yılında Deng tarafından geliştirilen Gri Sistem Teorisi'nin bir parçası olarak belirsizlik durumlarında karar verme süreçlerinde kullanılan bir yöntemdir. Gri sistem teorisi, özellikle belirsiz, eksik veya kısmen belirlenmiş verilerle çalışırken faydalı bir yaklaşımdır. GİA, ayrı veri setleri arasındaki ilişkileri analiz ederek bu veriler arasında bir bağ kurulmasına olanak sağlar. Yöntemin en büyük avantajları, orijinal verilere dayanması, hesaplamalarının kolay ve anlaşılır olmasıdır. GİA, özellikle ÇKKV süreçlerinde, alternatiflerin performanslarını ölçmek ve en iyi seçimi belirlemek amacıyla kullanılır. Dijital dönüşüm performansını değerlendirme gibi çok sayıda kriterin bulunduğu alanlarda bu yöntem, işletmelere doğru ve güvenilir bir karar verme imkânı sunar.

GİA'da ilk adım, tüm alternatiflerin belirlenerek karşılaştırılabilirlik dizilerine dönüştürülmesidir. Bu diziler, her alternatifin performansını temsil eden kriterlere göre düzenlenir. İkinci adımda, ideal hedef olarak kullanılacak bir referans dizi tanımlanır. Bu referans dizi, tüm kriterler açısından en iyi performansı sergileyen durumu temsil eder. Üçüncü adım, verilerin normalize edilmesidir. Normalize işlemi, farklı ölçeklerdeki kriterlerin karşılaştırılabilir hale getirilmesini sağlar ve veriler 0 ile 1 arasında değerlere dönüştürülür. Bu sayede, tüm kriterler aynı ölçek üzerinden değerlendirilmiş olur. Normalleştirilmiş veriler kullanılarak referans dizi ile diğer karşılaştırılabilirlik dizileri arasındaki Gri İlişkisel katsayı hesaplanır. Bu katsayı, her alternatifin referans dizisine ne kadar yakın olduğunu gösterir. Son adımda, referans dizi ile karşılaştırılabilirlik dizileri arasındaki Gri İlişkisel dereceler hesaplanır. Gri ilişkisel dereceler, alternatiflerin birbirine olan yakınlıklarını belirlemek için kullanılır. En yüksek Gri İlişkisel skora sahip alternatif, en iyi seçenek olarak değerlendirilir. GİA yönteminin adımları şu şekildedir:

Adım 1: Karar Matrisinin Oluşturulması

İlk adımda alternatiflerin kriter değerlerini belirten karar matrisi oluşturulur. Burada n alternatifleri, m kriterleri, $x_i(j)$ i. alternatifin j. kritere göre değerini göstermektedir ve $n \times m$ boyutlu karar matrisi Denklem (4)'deki gibi oluşturulur.

$$x_i = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(n) \\ \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \dots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Adım 2: Referans Serisinin Belirlenmesi

Gri ilişkisel analizin bu aşamasında değerlendirme kriterlerine ilişkin referans serileri belirlenmelidir. Referans seri $x_0 = x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(j) \dots \dots x_0(n)$ şeklindedir. $x_0(j) = j, j$. Kriterin değerleri arasındaki en büyük, en küçük ve olması istenen bir değeri belirtmektedir.

Adım 3: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi

Normalizasyon işlemi fayda durumu, maliyet durumu ve optimal durum olmak üzere 3 farklı şekilde yapılmaktadır. Seri değerlerinin daha büyük olması amaca olumlu katkı sağlıyorsa normalizasyon işlemi Denklem (5) ile gerçekleştirilir.

$$x_i^* = \frac{x_i(j) - \min x_i(j)}{\max x_i(j) - \min x_i(j)} \quad (5)$$

Seri değerlerinin daha küçük olması amaca olumlu katkı sağlıyorsa normalizasyon işlemi Denklem (6) ile yapılır.

$$x_i^* = \frac{\max x_i(j) - x_i(j)}{\max x_i(j) - \min x_i(j)} \quad (6)$$

Seri değerlerinin belirlenen bir optimal değere göre normalizasyonu gerçekleştirilecekse Denklem (7) kullanılır.

$$x_i^* = \frac{|x_i(j) - x_{ob}(j)|}{\max x_i(j) - x_{ob}(j)} \quad (7)$$

Adım 4: Mutlak Değer (Fark) Matrisinin Oluşturulması

X_0^* ile X_j^* arasındaki mutlak farkın değeri $\Delta_{0i}(j)$ Denklem (8) ile hesaplanır.

$$\Delta_{0i}(j) = |X_0^*(j) - X_j^*(j)| \quad (8)$$

Adım 5: Gri İlişki Katsayılarının Hesaplanması

Gri ilişki katsayıları Denklem (9) kullanılarak hesaplanır.

$$\gamma_{0i}(j) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_i(j) + \xi \Delta_{\max}} \quad (9)$$

Formülde yer alan ξ katsayısı 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. Literatürde bu değer genellikle 0,5 olarak kullanılmaktadır.

Adım 6: Gri İlişki Derecesinin Hesaplanması

Gri ilişki derecesinin hesaplanması aşamasında iki farklı formül kullanılır. Kriterlerin önem seviyelerinin eşit olduğu varsayımında Denklem (10), önem seviyelerinin farklı olduğu durumlarda ise Eşitlik (11) kullanılır. w_j değeri kriter ağırlıklarını ifade eder ve ağırlıklar toplamı 1'e eşittir.

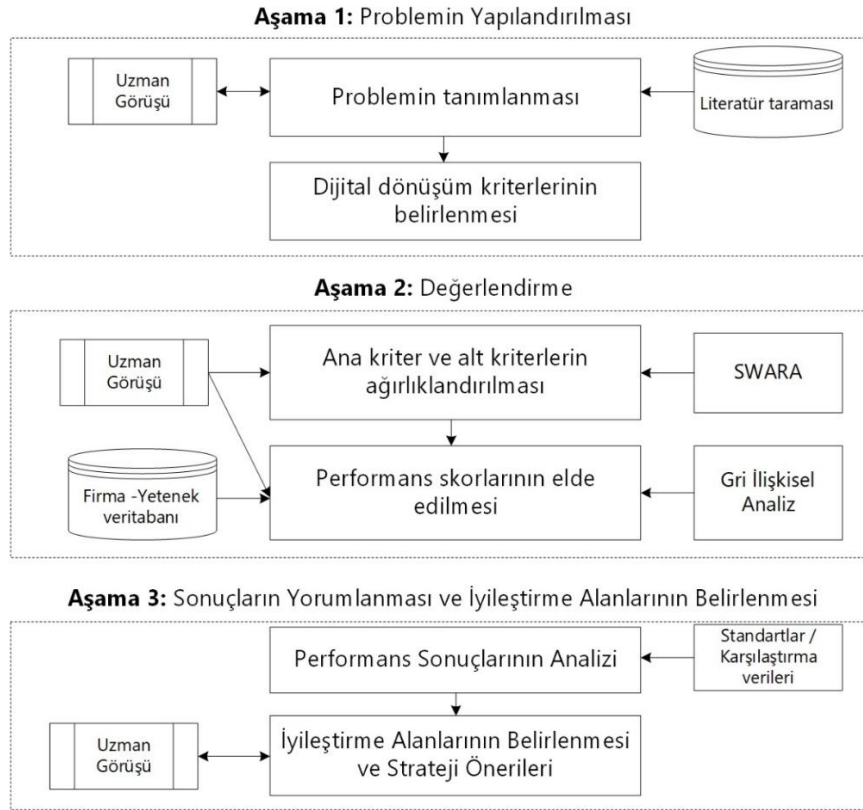
$$\Gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{0i}(j) \quad (10)$$

$$\Gamma_{0i} = \sum_{j=1}^n w_j \gamma_{0i}(j) \quad (11)$$

Önerilen Yöntem

Bu bölümde, dijital dönüşüm etkinliğinin değerlendirilmesi amacıyla geliştirilen performans ölçüm sisteminin adımları açıklanacaktır. Amaç, işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinin etkinliğini belirleyerek, dijital strateji geliştirmeleri ve gerekli adımları atabilmeleri için bir yol haritası sunmaktır. Önerilen yöntemin ilk adımında, dijital dönüşümün değerlendirilmesine yönelik kriterler belirlenecektir. Bu kriterler, literatür taraması ve uzman görüşlerine dayanarak oluşturulacaktır. Dijital dönüşümle ilgili faktörler hem teknolojik hem de organizasyonel düzeyde incelenecek, işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerindeki başarısını etkileyen anahtar performans göstergeleri (KPI'lar) belirlenecektir. Belirlenen kriterlerin önem derecelerini hesaplamak için SWARA yöntemi kullanılacaktır. Uzmanlardan alınan geri bildirimler doğrultusunda, kriterler arasında bir öncelik sıralaması yapılacak ve her bir kriterin ağırlığı hesaplanacaktır.

Kriter ağırlıklarının belirlenmesinden sonra, dijital dönüşüm performansını ölçmek için GİA yöntemi kullanılacaktır. GİA, kriterler ve alternatifler arasındaki ilişkiyi ölçerek dijital dönüşümde en iyi performans gösteren işletmeleri belirlemeye olanak tanır. Bu yöntem sayesinde, her bir işletmenin dijital dönüşüm başarısı skora dayalı olarak değerlendirilecektir. GİA yöntemi ile elde edilen bulgular doğrultusunda, işletmelere yönelik dijital dönüşüm stratejileri ve gelişim yol haritaları oluşturulacaktır. Bu stratejiler, işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde daha verimli ve etkili olmasını sağlamak amacıyla tasarlanacaktır. İşletmeler, dijital teknolojilere yatırımlarını artırarak operasyonel süreçlerini iyileştirebilir ve dijitalleşme sürecini hızlandırabilir. Bu metodolojinin adımlarını gösteren akış şeması Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Dijital Dönüşüm Performans Ölçüm Sistemi Aşamaları

UYGULAMA

Bu bölümde, dijital dönüşüm performansının ölçülmesi amacıyla geliştirilen metodolojinin uygulanması detaylandırılacaktır. İlk olarak kriterlerin ağırlıklandırılması SWARA yöntemi ile gerçekleştirilecek, ardından GİA yöntemi ile performans skorları hesaplanacaktır.

Kriterlerin Ağırlıklandırılması

Dijital dönüşüm etkinliğinin değerlendirilmesi için 6 ana kriter ve 26 alt kriter belirlenmiştir. Belirlenen kriterlerin ağırlıklarının SWARA yöntemi ile belirlenebilmesi için dijital dönüşüm alanında çalışan akademisyenlerden ve sektördeki uzmanlardan oluşan 10 kişilik bir uzman paneli oluşturulmuştur. Sektörde çalışan uzmanlar, firmaların planlama, üretim ve kalite departmanlarında çalışmakta olup 5-15 yıl arası tecrübeye sahiptirler.

SWARA yönteminin uygulanması adımlarında uzmanlardan, ana ve alt kriterleri önem sırasına göre sıralamaları istenmiştir. Uzmanlar, ana ve alt kriterleri önem derecelerine göre sıralamışlardır. En önemli kriter 1. sırada, en az önemli olan ise son sırada yer alacak şekilde bir sıralama yapılmıştır. Uzmanlar, ikinci kriterden başlayarak her bir kriterin bir önceki kriterine göre ne kadar daha önemli olduğunu ifade eden s_j değerini belirlemiştir. Bu değerler, yüzdelik farklar halinde belirlenir ve tabloya yansıtılır. Örneğin, K3 kriterinin K2 kriterinden %20 daha önemli olduğu belirtilirse bu, 0.2 değeri ile ifade edilir. Ardından, Denklem (1) kullanılarak her bir k_j değeri, ilgili s_j değerine 1 eklenerek hesaplanır. İlk kriterin q_j değeri 1 olarak kabul edilir. Sonraki q_j değerleri ise önceki kriterin q_j değeri ile ilgili k_j değerinin çarpılmasıyla hesaplanır. Ağırlıklar (w_j), Denklem (3)'te gösterildiği şekilde her bir kriterin q_j değeri, toplam q_j değerlerine bölünerek bulunur. Tablo 2'de, Uzman-1 için ana kriterler ve K1 altındaki alt kriterler

için s_j , k_j , q_j ve w_j değerleri gösterilmiştir. Bu örnek adımlarda SWARA yöntemi ile her bir kriterin ağırlığının nasıl hesaplandığı açıklanmaktadır.

Tablo 2. Uzman 1'e Ait Ana Kriter Değerlendirmesi

Önem sırası	Kriterler	s_j	k_j	q_j	w_j
1	K3-İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık	—	1	1	0,253
2	K2-Veri ve Yazılım Altyapısı	0,2	1,2	0,833	0,211
3	K4-Üretim Süreci Otomasyonu	0,3	1,3	0,641	0,162
4	K6-Entegrasyon ve Bağlantı	0,1	1,1	0,582	0,147
5	K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	0,2	1,2	0,485	0,123
6	K1-Akıllı Üretim Teknolojileri	0,2	1,2	0,404	0,103

Her bir uzman için ana ve alt kriterlere yönelik aynı işlemler yapılmış, her bir uzmanın hesapladığı ağırlıklar toplanarak ortalama ağırlıklar elde edilmiştir. 10 uzmanın değerlendirilmesi sonucu elde edilen ağırlıklar ve ana kriterler ve alt kriterler için Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3'te görüldüğü üzere ana kriterler arasında en yüksek ağırlığa sahip olan K2-Veri ve Yazılım Altyapısı (%21,7), dijital dönüşüm için kritik öneme sahip olduğu görülmektedir. Bu ana kriter altında ERP yazılımı (%5,5), en yüksek ağırlığa sahip alt kriter olarak öne çıkmaktadır. K6-Entegrasyon ve Bağlantı ana kriteri de önemli bir rol oynamakta olup, alt kriterlerden ERP yazılımının entegrasyonu (%6,4) en kritik faktör olarak belirlenmiştir. K1-Akıllı Üretim Teknolojileri ve K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon ana kriterleri de ağırlıklı olarak dijital üretim süreçlerini destekleyen teknolojilerle ilişkilidir. Genel olarak, ERP yazılımı ve entegrasyonunun dijital dönüşümde en önemli unsurlar olduğu, buna ek olarak akıllı üretim teknolojileri ve veri güvenliğinin de kritik bir rol oynadığı görülmektedir.

Tablo 3. Ana Kriter ve Alt Kriter Ağırlıkları

Ana Kriterler	Ana Kriter Ağırlıkları	Alt kriterler	Alt Kriter Ağırlıkları	Nihai Alt Kriter Ağırlıkları
K1-Akıllı üretim teknolojileri	0,156	K1.1.Gelişmiş Robotik (Otonom ve İşbirlikçi Robotlar)	0,314	0,049
		K1.2.Siber Fiziksel Sistemler (SFS)	0,276	0,043
		K1.3.Dijital İkiz ve Artırılmış Gerçeklik	0,205	0,032
		K1.4.Eklemeli İmalat teknolojisi	0,212	0,033
K2-Veri ve Yazılım Altyapısı	0,217	K2.1.Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IoT)	0,175	0,038
		K2.2.Endüstriyel Veri Güvenliği	0,184	0,040
		K2.3.Büyük Veri ve Analitik	0,171	0,037
		K2.4.Bulut Bilişim ve Uç Bilişim	0,124	0,027
		K2.5.Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP) Yazılımı	0,253	0,055
		K2.6.Blokzinciri Teknolojisi	0,097	0,021
K3-İşgücü Gelişimi ve Stratejik Bağlılık	0,176	K3.1.Dijital Beceriler ve Yetkinlik Geliştirme	0,199	0,035
		K3.2.İnsan-Robot İş birliği	0,136	0,024
		K3.3.Yatırım ve Kaynak Tahsisi	0,199	0,035
		K3.4.Dijital Dönüşüm Stratejisi	0,222	0,039
		K3.5.Liderlik Vizyonu ve Desteği	0,227	0,040
K4-Üretim Süreci Otomasyonu	0,140	K4.1.Süreç Otomasyonu ve Kontrolü	0,257	0,036
		K4.2.Ürün ve Üretim İzlenebilirliği	0,279	0,039
		K4.3.Kestirimci Bakım ve Arıza Tespiti	0,200	0,028
		K4.4.Esneklik ve Yeniden Yapılandırılabilirlik	0,257	0,036
K5-Kesintisiz Mühendislik ve Optimizasyon Uygulamaları	0,150	K5.1.Dijital Tasarım ve Prototipleme	0,220	0,033
		K5.2.Üretim Yürütme Sistemleri (MES) Kullanımı	0,267	0,040
		K5.3.Envanter Optimizasyon Uygulamaları	0,320	0,048
		K5.4.Enerji Tüketiminin İzlenmesi ve Optimizasyonu	0,193	0,029
K6-Entegrasyon ve Bağlantı	0,162	K6.1.ERP Yazılımının Entegrasyonu	0,395	0,064
		K6.2.Elektronik Ticaret Uygulamaları	0,259	0,042
		K6.3.Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu	0,364	0,059

Performans Analizi

Bu bölümde, dijital dönüşüm etkinliğinin hesaplanması için nihai kriter ağırlıkları ile performans değerleri GİA yöntemiyle birleştirilmiştir. Örnek uygulama olarak, Konya'da faaliyet gösteren 3 otomotiv yan sanayi firması seçilmiştir. Bu firmalardaki dijital dönüşüm performansını ölçmek için 1-5 arasında bir değerlendirme ölçeği

kullanılmıştır. Stratejik planlama ve üretim alanında tecrübeli 3 uzman, belirlenen kriterler üzerinden firmaların performanslarını puanlamış ve her kriter için verilen puanların ortalaması alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4. Kriter Bazında Uzman Değerlendirmeleri

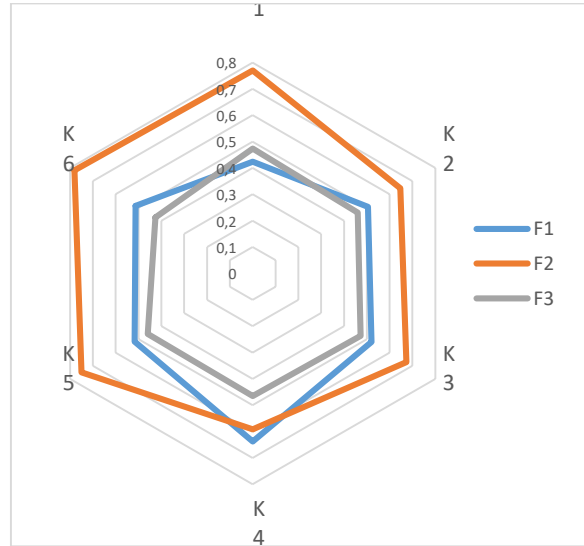
	Firma 1	Firma 2	Firma 3		Firma 1	Firma 2	Firma 3
K1.1	2,67	5,00	2,67	K3.4	2,00	4,33	2,00
K1.2	2,33	3,67	3,00	K3.5	3,67	3,33	3,00
K1.3	1,33	4,00	2,33	K4.1	3,67	4,00	2,67
K1.4	2,33	4,33	3,00	K4.2	4,00	3,67	3,00
K2.1	2,67	3,33	3,00	K4.3	3,00	3,67	1,67
K2.2	4,33	4,00	2,00	K4.4	4,33	3,00	3,00
K2.3	3,00	4,33	3,00	K5.1	2,33	4,33	2,00
K2.4	2,33	4,00	2,67	K5.2	2,33	5,00	2,33
K2.5	2,67	3,33	3,00	K5.3	3,67	4,00	3,00
K2.6	1,00	4,67	1,00	K5.4	3,67	3,33	3,00
K3.1	3,33	3,67	3,33	K6.1	1,67	4,00	2,00
K3.2	2,33	3,67	2,00	K6.2	3,67	5,00	3,00
K3.3	3,67	4,67	3,00	K6.3	3,67	4,33	2,00

GİA yöntemiyle yapılan analiz sonucunda, firmaların dijital dönüşüm performans skorları Tablo 5'te gösterilmektedir. Sonuçlara göre, Firma 2 %70,21 ile en yüksek dijital dönüşüm etkinlik performansına sahip olurken, Firma 1 %51,72 ve Firma 3 %46,02 performans skorları ile sıralamayı takip etmektedir. Bu sonuçlar, dijital dönüşüm süreçlerinde firmalar arasındaki farklılıkları ve gelişim potansiyellerini ortaya koymaktadır.

Tablo 5. Firmaların Performans Skorları

	Firma 1	Firma 2	Firma 3
Nihai Performans Skoru (%)	51,72	70,21	46,02
Sıra	2	1	3

Şekil 2'de radar grafiği kullanılarak firmaların ana kriter bazındaki performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 3 ise alt kriter bazında firmaların performanslarının bar grafiği ile görselleştirilmiştir, bu da firmaların hangi alanlarda güçlü veya zayıf olduğunu net bir şekilde göstermektedir.

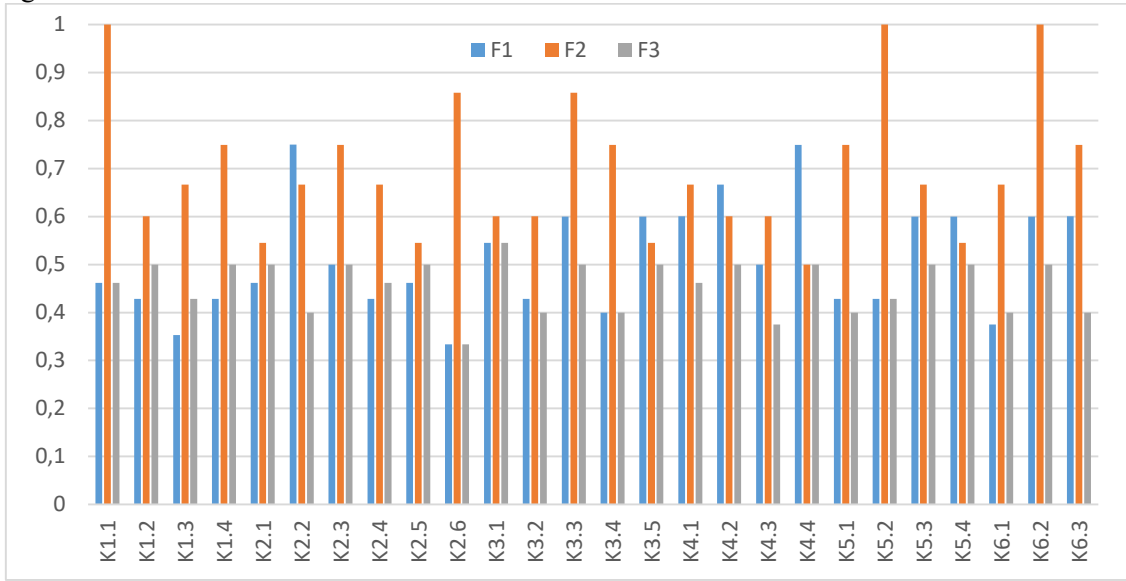


Şekil 2. Firma Ekseninde Ana Kriter Skorlarının Karşılaştırılması

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz iş dünyasında işletmeler, maliyetleri düşürmek, daha hızlı ve verimli üretim gerçekleştirebilmek için süreçlerini dijital dönüşüme adapte etmek zorundadır. Endüstri 4.0'ın gerektirdiği yenilik ve teknolojilerin benimsenmesi, bu sürecin bir parçasıdır. Ancak, dijital dönüşümü başarıyla gerçekleştirebilmek için işletmelerin,

mevcut durumlarını analiz etmeleri ve dijital dönüşüm yolculuklarında hangi aşamada olduklarını net olarak anlamaları gerekmektedir.



Şekil 3. Firma Ekseninde Alt Kriter Skorlarının Karşılaştırılması

Çalışmamızın bulguları, literatürde Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm süreçlerinde karşılaşılan kritik faktörlerle uyumludur. Özellikle ERP, IoT ve veri altyapısı gibi teknolojik unsurların dönüşüm sürecindeki önemi daha önce birçok çalışmada vurgulanmıştır. Bizim modelimizde de bu unsurlar belirgin olarak öne çıkmıştır; böylece işletmelerin, dijital dönüşümün teknolojik altyapısını güçlendirme gerekliliği doğrulanmıştır. Bu sonuç, teknolojik altyapının işletme performansına katkısı hakkında yapılan önceki araştırmalarla paralellik göstermektedir. Ayrıca, dijital dönüşüm performansının yalnızca teknolojik gelişim değil, aynı zamanda organizasyonel yapı ve insan kaynakları boyutunu da içerdiği literatürde vurgulanan önemli bir çıkarımdır. Çalışmamız, bu faktörlerin dijital dönüşüm sürecindeki etkisini göz önünde bulundurarak, bu kriterlerin ağırlıklandırılmasına yönelik sistematik bir yaklaşım sunmuştur. Böylece, işgücü gelişimi ve stratejik bağlılık yönetiminin, dijital dönüşüm başarısı üzerindeki önemini destekleyecek yeni bulgular elde edilmiştir.

Kriterlerin önem derecelerini belirlemek amacıyla, dijital dönüşüm alanındaki akademisyenler ve sektördeki profesyonellerden oluşan bir uzman paneliyle değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmeler SWARA yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve dijital dönüşümde öncelik verilmesi gereken ana ve alt kriterlerin ağırlıkları belirlenmiştir. Sonuçlara göre, en yüksek öneme sahip ana kriter K2 (Veri ve Yazılım Altyapısı) olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, en düşük ağırlığa sahip ana kriter ise K4 (Üretim Süreci Otomasyonu) olmuştur. Alt kriterler düzeyinde ise en yüksek ağırlık K2.5 (Kurumsal Kaynak Planlaması- ERP Yazılımı) kriterine verilmiştir. Bu durum, dijital dönüşüm için ERP yazılımı ve entegrasyonunun önemini vurgulamaktadır. Bu kriteri K6.1 (ERP Yazılımının Entegrasyonu) ve K6.3 (Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu) kriterleri izlemektedir. Buna karşın, K2.6 (Blokzincir Teknolojisi) ve K3.2 (İnsan-Robot İş birliği) gibi kriterler en düşük ağırlığa sahip olarak daha az kritik faktörler olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgular, dijital dönüşüm sürecinde ERP yazılımı ve entegrasyonunun öncelikli olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmada, dijital dönüşüm performansının değerlendirilmesi amacıyla SWARA ve GİA yöntemlerinin birlikte kullanıldığı özgün bir yaklaşım geliştirilmiştir. Literatürde SWARA ve GİA yöntemlerinin çeşitli sektörlerde karar verme süreçlerinde başarılı sonuçlar sunduğu ancak dijital dönüşüm performans değerlendirme alanında sınırlı çalışmalarda yer aldığı görülmektedir. Uygulama örneğinde, otomotiv yan sanayi firmalarından elde edilen veriler kullanılarak dijital dönüşüm performansı GİA yöntemi ile hesaplanmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Çalışmanın literatüre katkısı, dijital dönüşüm sürecini yalnızca teknoloji odaklı değil, aynı zamanda insan faktörlerini de dikkate alan bütüncül bir yaklaşımla ele almasıdır.

Çalışmamız, dijital dönüşüm performansını ölçmek ve işletmelerin dijitalleşme sürecindeki önceliklerini belirlemek isteyen işletmelere rehber niteliğindedir. Geliştirilen performans ölçüm sistemi, işletmelerin dijital dönüşüm stratejilerini şekillendirmelerine ve dijitalleşme etkinliklerini değerlendirmelerine yardımcı olabilir. Gelecekteki

çalışmalar için öneriler ise şu şekildedir: (i) Çalışmada kullanılan kriter seti genişletilerek dijital dönüşüm performansını daha fazla boyutta inceleyen faktörler eklenebilir. Böylece farklı işletme ihtiyaçlarını karşılayacak esnek bir model geliştirilebilir, (ii) Önerilen sistemin farklı sektörlerde test edilmesi, modelin genel geçerliliğini artırabilir ve dijital dönüşüm performansını değerlendirmek için geniş çapta kullanılabilir hale getirebilir, (iii) SWARA ve GİA yöntemlerinin yanı sıra, dijital dönüşüm performansını ölçmeye yönelik diğer ÇKKV teknikleri ile de bir karşılaştırma yapılabilir. Özellikle kriter sayısının arttığı durumlarda uzman yargılarına dayalı SWARA yöntemi yerine CRITIC, Entropi gibi objektif ağırlıklandırma teknikleri tercih edilebilir. Performans değerlendirme için ise TOPSIS ve VIKOR gibi değer temelli yöntemlerden yararlanılabilir.

NOT

Bu çalışma Gökçen Saray'ın Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim dalında Dr. Bilal Ervural danışmanlığında yürüttüğü “Üretimde dijital dönüşüm etkinliğinin değerlendirilmesi için bir performans ölçüm sistemi geliştirilmesi” isimli yüksek lisans tezine dayanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdallah, Y. O., Shehab, E., & Al-Ashaab, A. (2022). Developing a digital transformation process in the manufacturing sector: Egyptian case study. *Information Systems and e-Business Management*, 20(3), 613-630.
- Adem, A., Kaya, B. Y., Çakıt, E., & Dağdeviren, M. (2022). Üretim sistemlerindeki dijital dönüşümün iş etüdü teknikleri üzerindeki etkisi. *Verimlilik Dergisi*, 110-122.
- Akman, G., & Kokumer, Z. (2023). Endüstri 4.0 kapsamında beyaz eşya sektöründe dijital dönüşüm yetkinliğinin MACBETH ve EDAS yöntemleriyle değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(4), 2033-2054.
- Alkan, N., & Kahraman, C. (2023). Prioritization of supply chain digital transformation strategies using multi-expert fermatean fuzzy analytic hierarchy process. *Informatica*, 34(1), 1-33.
- Angreani, L. S., Vijaya, A., & Wicaksono, H. (2020). Systematic literature review of industry 4.0 maturity model for manufacturing and logistics sectors. *Procedia manufacturing*, 52, 337-343.
- Angreani, L. S., Vijaya, A., & Wicaksono, H. (2023). Identifying Essential Driving Factors of Industry 4.0 Maturity Models Using Fuzzy MCDM Methods. *Procedia CIRP*, 120, 1582-1587.
- Attaran, S., Attaran, M., & Celik, B. G. (2024). Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0. *Decision Analytics Journal*, 10, 100398.
- Ayyıldız, M. E., & Demir, A. O. (2022). Dijital Dönüşüm Olgunluk Seviyesinin Ölçülmesine Yönelik Modellerin İncelenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Girişimcilik Dergisi*, 6(12), 61-80.
- Azambuja, A.J., Giese, T. (2023). Digital Twins in Industry 4.0 – Opportunities and challenges related to Cyber Security. *11th CIRP Global Web Conference (CIRPe 2023)*, 25-30.
- Bhatia, A., & Sehgal, A. K. (2023). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 81, 1060-1067.
- Bibby, L., & Dehe, B. (2018). Defining and assessing industry 4.0 maturity levels–case of the defence sector. *Production Planning & Control*, 29(12), 1030-1043.
- Büyüközkan, G., & Güler, M. (2020). Analysis of companies' digital maturity by hesitant fuzzy linguistic MCDM methods. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(1), 1119-1132.
- Büyüközkan, G., Feyzioğlu, O., & Havle, C. A. (2020). Analysis of success factors in aviation 4.0 using integrated intuitionistic fuzzy MCDM methods. In *Intelligent and Fuzzy Techniques in Big Data Analytics and Decision Making: Proceedings of the INFUS 2019 Conference, Istanbul, Turkey, July 23-25, 2019* (pp. 598-606).
- Ceyhan, H., Kasapbaşı, M., C. (2021). Üretim Sistemlerinde Makine Öğrenmesi ile Kestirimci Bakım, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 33, 167-175.
- Chang, S.-C.; Chang, H.-H.; Lu, M.-T. 2021, Evaluating Industry 4.0 Technology Application in SMEs: Using a Hybrid MCDM Approach, *Mathematics*, 9, 414.

- Cheminod, M., L. Durante, and A. Valenzano. (2013). "Review of Security Issues in Industrial Networks." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 9 (1): 277–293.
- Chen, X., & Voigt, T. (2020). Implementation of the Manufacturing Execution System in the food and beverage industry. *Journal of Food Engineering*, 278, 109932.
- Chen, Z. S., Wang, Z. R., Devenci, M., Ding, W., Pedrycz, W., & Skibniewski, M. J. (2024). Optimization-based probabilistic decision support for assessing building information modelling (BIM) maturity considering multiple objectives. *Information Fusion*, 102, 102026.
- Çakır, E., & Kacır, Ü. (2018). Altı Sigma kara kuşak eğitimi alacak personelin bütünleşik SWARA ve GİA yöntemleri ile belirlenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 9(23), 142-166.
- Çakır, E., 2018, Elektronik Belge Yönetim Sistemi (Ebys) Yazılımı Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri: Bir Belediye Örneği, *Business Economics and Management Research Journal*, 1(1), 15-30
- Çevik Aka, D. (2023). Evaluation Of The Effects Of Industry 4.0 On Organizational Agility With Fucom: Implementation In The Textile Industry, *Uluslararası İktisadi Ve İdari İncelemeler Dergisi*(40), 33-48.
- Demircan Keskin, F., Kabasakal, İ., Kaymaz, Y., & Soyuer, H. (2019). An assessment model for organizational adoption of industry 4.0 based on multi-criteria decision techniques. In *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018 18* (pp. 85-100). Springer International Publishing.
- Demirel, B. E., Tınmaz, G., Güven, E., & Eren, T. (2024). Türk Savunma Sanayiinde Dijital Olgunluk Seviyelerinin Karşılaştırılması. *Verimlilik Dergisi*, 58(4), 555-572.
- Dermenci, M.,S., Sağbaş A. (2023). Dijital Dönüşüm Ekseninde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Endüstri 4.0 Olgunluk Modelinin Değerlendirilmesi, *European Journal of Engineering and Applied Sciences*,6 (2),74-85.
- Doğan, O., & Baloğlu, N. (2020). Endüstri 4.0 kavramsal farkındalık ölçeği. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 22(38), 58-81.
- Dotoli, M., A. Fay, M. Miśkiewicz, and C. Seatzu. (2016). "Advanced Control in Factory Automation: a Survey." *International Journal of Production Research* 55 (5): 1243–1259
- Dökme, S. (2020). Sakarya'da Dijital Dönüşüme Yönelik Sanayi Kuruluşlarında Karşılaştırmalı Değerlendirme Çalışması. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Elibal, K., Özceylan, E., & Çetinkaya, C. (2024). An ERP Based Industry 4.0 Maturity Model Proposal. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(2), 535-544.
- Elkadi, Hitham., & El Tazi, N. (2023). Identifying and prioritizing digital transformation elements using fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(9).
- Erdem, A., Kara, M. A., & Dumlu, H. (2023). Dijital platform tercihlerinin SWARA ve gri ilişkisel analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (41), 91-106.
- Erik, A., & Kuvvetli, Y. (2021). Üretim İşletmelerinin Endüstri 4.0 Entegrasyonunun Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 637-647.
- Ervural, B. (2023). Comparative Analysis of E-Government Website Performances of European Countries Using Dynamic Grey Relational Analysis. In *International Conference on Electronic Governance with Emerging Technologies* (pp. 112-124). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Godbole, M. V. (2023). Revolutionizing Enterprise Resource Planning (ERP) Systems through Artificial Intelligence. *International Numeric Journal of Machine Learning and Robots*, 7(7), 1-15.
- Goulart, V. G., Liboni, L. B., & Cezarino, L. O. (2022). Balancing skills in the digital transformation era: The future of jobs and the role of higher education. *Industry and Higher Education*, 36(2), 118-127.
- Görçün, Ö. F., Mishra, A. R., Aytekin, A., Simic, V., & Korucuk, S. (2024). Evaluation of Industry 4.0 strategies for digital transformation in the automotive manufacturing industry using an integrated fuzzy decision-making model. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 922-948.
- Guven, H. (2020). Industry 4.0 and marketing 4.0: in perspective of digitalization and E-Commerce. In *Agile Business Leadership Methods for Industry 4.0* (pp. 25-46).

- Gülseren, A., & Sağbaş, A. (2019). Endüstri 4.0 perspektifinde sanayide dijital dönüşüm ve dijital olgunluk seviyesinin değerlendirilmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(2), 1-5.
- Han, H., Shiwakoti, R. K., Jarvis, R., Mordi, C., & Botchie, D. (2023). Accounting and auditing with blockchain technology and artificial intelligence: A literature review. *International Journal of Accounting Information Systems*, 48, 100598.
- Hasani, A., Haseli, G., & Deveci, M. (2024). Analyzing operational risks of digital supply chain transformation using hybrid ISM-MICMAC method. *OPSEARCH*, 1-25.
- Hashemkhani Zolfani, S., Salimi, J., Maknoon, R. ve Simona, K. (2015). Technology foresight about R&D projects selection; application of SWARA method at the policy making level. *Engineering Economics*, 26(5), 571–580. 9571.
- Hashemkhani Zolfani, S., Zavadskas, E. K. ve Turskis, Z. (2013). Design of Products with Both International and Local Perspectives Based on Yin-Yang Balance Theory and SWARA Method. *Economic Research*, 26(2), 153–166.
- Ivančić, L., Vukšić, V. B., & Spremić, M. (2019). Mastering the digital transformation process: Business practices and lessons learned. *Technology Innovation Management Review*, 9(2).
- İpkin, M., & Keskinçalış, M. (2023). İşletmelerde Erp Uygulamalarının Dijital Dönüşüm Sürecine Katkıları. *Aurum Journal Of Social Sciences*, 8(1), 49-74.
- Jafarzadeh Ghouschi, S., Ab Rahman, M. N., Raiesi, D., Osgooei, E., & Jafarzadeh Ghoushji, M. (2020). Integrated decision-making approach based on SWARA and GRA methods for the prioritization of failures in solar panel systems under Z-information. *Symmetry*, 12(2), 310.
- Kaisler S., Armour F., Espinosa J. A., Money, W. (2013). Big data: Issues and Challenges Moving Forward. In 2013. *46th Hawaii International Conference on System Sciences* , 995-1004.
- Kalender, Z. T., & Žilka, M. (2024). A Comparative Analysis of Digital Maturity Models to Determine Future Steps in the Way of Digital Transformation. *Procedia Computer Science*, 232, 903-912.
- Kamble, S., Gunasekaran, A., & Dhong, N. C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. *International journal of production research*, 58(5), 1319-1337.
- Karadağ, H., Şahin, F., Karamollaoğlu, N., & Saunila, M. (2024). Disentangling the dynamic digital capability, digital transformation, and organizational performance relationships in SMEs: a configurational analysis based on fsQCA. *Information Technology and Management*, 1-17.
- Kasnak, E., & Özkara, B. (2022). Türkiye'deki imalat şirketlerinin endüstri 4.0 olgunluk düzeyinin belirlenmesi. *Verimlilik Dergisi*, (3), 365-380.
- Kesbiç, Ö., (2020), Üretimde Dijital Dönüşüm Ve Etkileri: Türkiye Ekonomisi Açısından Bir Analiz, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa.
- Keskinçalış, M., & İpkin, M. (2023). İşletmelerde ERP uygulamalarının dijital dönüşüm sürecine katkıları. *AURUM Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(1), 49-74.
- Khan, A., & Ahmed, A. (2024). Optimizing Retail Operations, Inventory Management and Sales Forecasting with Big Data and AI in China. *Emerging Trends in Machine Intelligence and Big Data*, 16(1), 18-37.
- Kıyak, A., & Bozkurt, G. (2020). A General Overview To Digital Leadership Concept. *Uluslararası Sosyal Ve Ekonomik Çalışmalar Dergisi*, 1(1), 84-95.
- Kocaoglu, B., & Kirmizi, M. (2024). Prescriptive digital transformation maturity model: a development and validation study. *Kybernetes*.
- Koç, E. (2020). Tedarik Zinciri İzlenebilirliği Ve Sürdürülebilirliğinde Yeni Paradigma: Blokzincir. *Bingöl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 10(20), 417-437.
- Kökümer, Z., Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Beyaz Eşya Sektöründe Endüstri 4.0 Dijital Dönüşüm Yetkinlik Analizi, 2018, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Kraus, S., Jones, P., Kailer, N., Weinmann, A., Chaparro-Banegas, N., & Roig-Tierno, N. (2021). Digital transformation: An overview of the current state of the art of research. *Sage Open*, 11(3).

- Liu, T., Gao, K., & Rong, Y. (2024). An integrated picture fuzzy operational competitiveness ratings group decision approach for evaluating the enterprise digital transformation capability. *Granular Computing*, 9(2), 32.
- Lo, H. W., & Siao, Z. (2023). Exploring the Role of Multiple Criteria Decision-Making in Enterprise Digital Transformation. *International Journal of Business*, 28(3), 1-17.
- Mitroulis, D., Kitsios, F., & Kitsios, F. (2019, February). Digital transformation strategy: A literature review. In *Proceedings of the 6th National Student Conference of HELORS, Xanthi, Greece* (pp. 59-61).
- Muneeb, F. M., Karbassi Yazdi, A., Hanne, T., & Mironko, A. (2024). Small and medium-sized enterprises in emerging markets and foreign direct investment: an integrated multi-criteria decision-making approach. *Applied Economics*, 1-18.
- Nelson, J., Berlin, A., Menold, J., & Parkinson, M. (2020). The role of digital prototyping tools in learning factories. *Procedia Manufacturing*, 45, 528-533.
- Osterrieder, P., Budde, L., & Friedli, T. (2020). The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 221, 107476.
- Özbek, A., & Demirkol, İ. (2018). Lojistik sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin SWARA ve GİA yöntemleri ile analizi. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(1), 71-86.
- Özdağoğlu, A., & Keleş, M. K. (2019). Bankaların bakış açısından BIST sınai işletmelerinin değerlendirilmesi–SWARA-GİA bütünleşik yaklaşımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 10(24), 229-241.
- Özdemir, Y.S. (2022). A Spherical Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Model For Industry 4.0 Performance Measurement, *Axioms*, 11,325
- Özkat, E. C. (2021). Makine Öğrenmesi Metodolojisi Kullanılarak Yüksek Hızlı Rulmanlarda Sağlık Göstergesinin Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (22), 176.
- Paksoy, T., Kochan, C. G., & Ali, S. S. (Eds.). (2020). *Logistics 4.0: Digital transformation of supply chain management*. CRC Press.
- Ryalat, M., El Moaqet, H., & Al Faouri, M. (2023). Design of a smart factory based on cyber-physical systems and Internet of Things towards Industry 4.0. *Applied Sciences*, 13(4), 2156.
- Sahut, J.M., Schweizer, D., Peris-Ortiz, M., (2022), Technological forecasting and social change introduction to the VSI technological innovations to ensure confidence in the digital World, *Technol. Forecast. Soc. Chang*, 179, 121680.
- Santos, C., Mehraei, A., Barros, A. C., Araujo, M., & Ares, E. (2017), Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps, *Procedia Manufacturing*, 13, 972-979.
- Sharma, M., Raut, R., Sehrawat, R., Ishizaka, A. (2022), Digitalisation of manufacturing operations: The influential role of organisational, social, environmental, and technological impediments. *Expert Systems With Applications*, 211.
- Singla, C., Kaushal, S., Verma, A., Kumar, H. (2018). Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications. *Intelligent Data-Centric Systems*, 147-157.
- Sriram, R. M., & Vinodh, S. (2021). Analysis of readiness factors for Industry 4.0 implementation in SMEs using COPRAS. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 38(5), 1178-1192
- Stanujkic, D., Karabasevic, D., & Zavadskas, E. K. (2015). A framework for the selection of a packaging design based on the SWARA method. *Engineering Economics*, 26(2), 181-187.
- Supçiller, A. A., & Bayramoğlu, S. (2020). Aralıklı gri sayı tabanlı A-GİA ve gri EDAS yöntemleriyle rüzgar santrali yer seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1847-1860.
- Tarigan, Z. J. H., Siagian, H., & Jie, F. (2020). The role of top management commitment to enhancing the competitive advantage through ERP integration and purchasing strategy. *International Journal of Enterprise Information Systems (IJEIS)*, 16(1), 53-68.
- Tuş, A., Öztaş, G. Z., Öztaş, T., Özçil, A., & Adalı, E. A. (2023). Türkiye'nin dijital dönüşüm endeksinin hesaplanması için alternatif bir yaklaşım: Bayesian BWM. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(8), 842-854.

Uslu, B., Gür, Ş., Eren, T. (2019). Endüstri 4.0 Uygulaması İçin Stratejilerin Aas Ve Topsis Yöntemleri İle Değerlendirilmesi. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B- Theoretical Sciences*,7(1), 13-28.

Wagire, A. A., Joshi, R., Rathore, A. P. S., & Jain, R. (2021). Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice. *Production Planning & Control*, 32(8), 603-622.

Wang, D., & Shao, X. (2024). Research on the impact of digital transformation on the production efficiency of manufacturing enterprises: Institution-based analysis of the threshold effect. *International Review of Economics & Finance*, 91, 883-897.

Xu, J., & Yin, J. (2024). Digital transformation and ESG performance: The chain mediating role of technological innovation and financing constraints. *Finance Research Letters*, 106387.

Yıldızbaşı, A., & Ünlü, V. (2020). Performance evaluation of SMEs towards Industry 4.0 using fuzzy group decision making methods. *SN Applied Sciences*, 2(3), 355.