



Üretim Sistemlerinde Dijital İkiz Kullanımına Yönelik Bariyer Analizi Barrier Analysis for Using Digital Twins in Production Systems

Salih Aka ^{a*}

^a Dr. Öğr. Üyesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Erzincan/Türkiye, salih.aka@erzincan.edu.tr, ORCID: [0000-0002-6386-8582](https://orcid.org/0000-0002-6386-8582)

MAKALE BİLGİSİ

ÖZ

Makale Türü

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler

Dijital İkiz
Üretim
Bulanık Best Worst Metot
ÇKKV

Geliş Tarihi : 06 Ocak 2025

Kabul Tarihi: 25 Mart 2025

Dijital ikiz, gerçek bir nesne, kaynak ya da sürecin sanal ortamda dijital benzerinin oluşturulduğu ve veri bağlantısı yoluyla anlık ve dinamik olarak fiziksel dünya ile sanal dünya etkileşiminin canlı tutulduğu bir platformdur. Yeni gelişen bir sistem olduğundan dijital ikizin üretim sistemlerinde uygulanması sırasında ortaya çıkan çeşitli bariyerler, bu platformun benimsenmesini zorlaştırabilmektedir. Dijital ikizin üretim projelerinde başarılı olması için bariyerleri ortadan kaldıracak stratejilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada üretim sistemlerinde dijital ikiz kullanımı sırasında ortaya çıkabilecek bariyerler belirlenmiş ve uzman görüşleri doğrultusunda bariyerler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı bariyerler arasındaki göreceli ağırlıkları tespit ederek önem önceliğini ortaya koymaktır. Analiz tekniği olarak uzman görüşlerinin dilsel değişkenler üzerinden modellenmesine imkân sağlayan bulanık Best Worst metodu (BWM) kullanılmıştır. Sonuç olarak "sistemsel ve teknolojik entegrasyon yetersizlikleri" bariyerinin üretimde dijital ikiz uygulamaları için öncelikli olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, dijital ikiz ve üretim birlikteliğini inceleyerek birlikteliğe engel olabilecek unsurları ortaya koymakta ve uygulayıcılar için genel bir çerçeve sunmaktadır.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type

Research Article

Keywords

Digital Twin
Production
Fuzzy Best Worst Method
MCDM

Received: Jan, 06, 2025

Accepted: Mar, 26, 2025

Digital twin is a platform where a digital equivalent of a real object, resource or process is created in a virtual environment and the physical world and virtual world interaction is kept alive instantly and dynamically through data connection. Since it is a newly developed system, various barriers that arise during the implementation of digital twin in production systems can make it difficult to adopt this platform. For digital twin to be successful in production projects, strategies are needed to eliminate barriers. In this study, barriers that may arise during the use of digital twins in production systems were determined and the barriers were compared with each other in line with expert opinions. The aim of the study is to determine the relative weights between the barriers and to reveal their priority. The fuzzy Best Worst method (BWM), which allows expert opinions to be modeled over linguistic variables, was used as the analysis technique. As a result, it was determined that the barrier of "systemic and technological integration deficiencies" is a priority for digital twin applications in production. The study examines the digital twin and production integration, reveals the elements that may prevent integration and provides a general framework for practitioners.

Extended Abstract

Aim: Production systems have increasingly begun to include digital assets in manufacturing and service processes. Digital assets used during the design, development and control of a product or process can be more efficient than physical equipment. A digital twin is a platform that lives simultaneously with a physical element rather than a virtual representation of a physical asset and can model the real-world status of the physical asset instantly and dynamically. Digital twins can economically provide preliminary design, process control and predictive modeling for production systems, and many other activities. However, application examples and knowledge in this field regarding digital twins are insufficient. During the integration of such new and innovative platforms with other systems, barriers that can make the integration difficult or even prevent it may arise.

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

Atıf/Cite as: Aka, S. (2025). Üretim Sistemlerinde Dijital İkiz Kullanımına Yönelik Bariyer Analizi. *Uluslararası Ekonomi, İşletme ve Politika Dergisi*, 9(1), 247-261. <https://doi.org/10.29216/ueip.1614573>



Bu makale, [Creative Commons Atıf \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) lisansının hüküm ve koşulları altında dağıtılan açık erişimli bir makaledir. / This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

This study aims to compile the barriers that can be seen during digital twin applications to be used in production and to present an order of importance for these barriers.

Methods: Digital twin barriers in production were examined by considering the few reviews on the subject before. Barriers were grouped under 7 main barriers in terms of their definitions and reasons for emergence. BWM, one of the multi-criteria decision-making methods, was preferred in determining the importance weight of the barriers. BWM offers a solution methodology for multi-objective problems with a discrete structure with its mathematical model infrastructure (Rezaei, 2015). In addition, the method produces effective results with fewer comparisons than similar methods. Thanks to these features, BWM is easy to use and quite efficient as it requires less effort. However, digital twin barriers are qualitative and uncertain in nature. In multi-criteria decision-making methods, the importance weights of the qualitative criteria can be affected by the subjective opinions of the decision makers. In such cases, fuzzy methods can be used to tolerate uncertainty in the evaluations (Karimi et al., 2020). In the study, the approach of Guo and Zhao (2017) was preferred for the fuzzy transformation of the BWM method. To compare the barriers with each other, the opinions of practitioners and academicians who have knowledge and experience on the subject were sought. Pairwise comparisons were modeled based on fuzzy BWM and solved with LINGO 21.0. The fuzzy BWM method can provide information about the quality of the solution with the calculation of the consistency ratio.

Findings: In this study examining the barriers to the use of digital twins in production, the main barriers identified are as follows: System and technological integration deficiencies (Bar₁), security concerns (Bar₂), data storage and operational difficulties (Bar₃), organizational and talent deficiencies (Bar₄), lack of standardization (Bar₅), lack of understanding of the expected benefits (Bar₆) and environmental uncontrollable factors (Bar₇). As a result of the evaluations and analysis, the level of importance among the barriers emerged as Bar₁ > Bar₃ > Bar₆ > Bar₄ > Bar₅ > Bar₂ > Bar₇.

Conclusion: Since the concept of digital twin is still developing, there are limited applications and research on this subject. Generally, the studies are theoretically based and include developments in the field. There are discussions about digital twin barriers in a few studies that focus on the factors that may affect the success of digital twin applications. This study, unlike the previous ones, compiled the digital twin barriers in production and compared these barriers with each other. The study is one of the pioneering studies that focus on comparing the barriers for the use of digital twins in production. According to the results, the biggest challenge that practitioners may face in digital twin projects for production stands out as "systemic and technological integration deficiencies" expressed as Bar₁. Since digital twin is newly developing, there are a limited number of providers in this field and the competitive environment is not sufficiently developed. The second barrier in the ranking is "data storage and operation difficulties" expressed as Bar₃. The digital twin is fed with the data flow dynamically provided by its real-world counterpart through a data connection. The uninterrupted provision of data flow and the continuous expansion of the stored data require regularly updated memories in terms of volume and speed. The "environmental uncontrollable factors" shown by Bar₇ have been identified as the barrier that should be given the least importance in this integration. For state incentives and support to be implemented, legal and administrative infrastructure must be established. Although bureaucratic processes take a long time, technological developments are quite dynamic and variable. Therefore, waiting for such initiatives may be unnecessary and may not provide a gain in terms of economic value. Similarly, security concerns shown by Bar₂ have been found to be another barrier that should be given the least importance. The analysis results are like the findings in previous studies. Perno et al. (2022) described the "lack of system integration" and "difficulty in ensuring interoperability" barriers as priority barriers. Opoku et al. (2023) determined that the barriers they named as "low level of knowledge" and "low level of technology acceptance" were the first two. Yadav and Majumdar (2024)

stated that the “lack of technology infrastructure, “technology immaturity”, and “high capital investment” barriers should be given priority in digital twins. All these findings indicate that a sufficient environment has not been created for systemic and technological integration and are consistent with the results of our study.

1. Giriş

Dijital olanakların gelişmesine kadar olan dönemde üretim sistemlerinin tasarlanması ve denetiminde fiziksel araçlara ihtiyaç duyulmaktaydı. Yeni dönemdeki üretim sistemlerine yönelik stratejilerin temelinde ise büyük veri, bulut imalat, nesnelerin interneti gibi teknolojik ve dijital unsurların olduğu görülmektedir (Zhang vd., 2022). Akıllı veri araçları ve sensörler üretim operasyonlarına dair verinin toplanması, tasarım süreçleri, imalat ve hizmet faaliyetlerinin gerçekleşmesi, dağıtımın sağlanması, bakım planlamaları ve geri dönüşüm süreçlerinin organizasyonu gibi hususlarda destek sağlayarak, arıza tahmini ve verimlilik gibi alanlarda oldukça faydalı olmaktadır (Errandonea vd., 2020). Bu dijital araçlarla gelişen ve kapsamı genişleyen üretim paradigması, dünyanın farklı bölgelerinde “Endüstri 4.0”, “Gelişmiş Üretim”, “Akıllı Üretim”, “Toplum 5.0”, “Geleceğin Endüstrisi”, “Akıllı Fabrika” ve “Geleceğin Fabrikası” gibi konseptlerle ifade edilmektedir (Semeraro vd., 2021).

Üretime yönelik dijital araçlar yakın zamana kadar ürünün daha çok sanal prototipler üzerinden tasarımına odaklanmış ve ürünün üretim süreçleri hakkında yeterli açıklama sağlamayan sınırlı simülasyon uygulamaları olarak değerlendirilmiştir (Wu, vd., 2020). Fakat yüksek değişkenlik taşıyan müşteri talebi üretim planlama karmaşıklığını artırmış ve bu durum fiziksel ve dijital üretim ortamlarının birleştirilmesini hızlandırarak, dijital modelin fiziksel nesne ile irtibatını sağlayacak yaklaşımların giderek daha fazla önem kazanmasını sağlamıştır (Tao vd., 2022). İnternet tabanlı iletişim altyapısının gelişmesi ve benzetim araçlarının gerçek durumu yansıtmadaki başarısı ile fiziki unsurlar artık dijital ortamlarda çok daha kolay temsil edilebilmektedir (Semeraro vd., 2021). Böylesi sanal varlıklardan biri olan dijital ikiz, gerçekteki unsurun, gerçek zamanlı veri toplama araçlarından elde edilen veriler ve simülasyon modelleri yardımıyla dijital ortamda oluşturulmuş öğrenebilen ve geliştirilebilen benzeri olarak ifade edilebilmektedir (Attaran ve Celik, 2023). Fiziksel bir varlığın dijital karşılığı ve ikili arasındaki veri bağlantısından oluşan dijital ikiz, ürünün performansının iyileştirilmesinde giderek çok daha fazla aranan bir araç haline gelmektedir (Jones vd., 2020).

Ürünün gerçek evrende çalışması sırasında elde edilen sürece dair bilgiler veri bağlantısı yoluyla dinamik sanal ortama aktarılarak fiziksel varlığın sanal ikizinin aynı anda var olması sağlanmaktadır (Attaran ve Celik, 2023). Statik bir tasarımdan farklı olan dijital ikiz vasıtasıyla sanal ortamdan ürüne dair geri bildirim toplanmakta ve potansiyel sorunlar ileri analizler ile önceden tespit edilebilmektedir (Attaran ve Celik, 2023).

İmalat ve hizmet süreçlerinin planlanması için dijital ikiz platformu oldukça kullanışlı bir araçtır. Fakat bu aracın üretim sistemlerine entegrasyonu sırasında aşılması gereken zorluklar meydana gelebilmektedir. Dijital ikiz araçlarının üretim sistemlerinde kullanılması için gereken kritik başarı faktörleri veya aşılması gereken bariyerleri derleyen bazı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada farklı olarak dijital ikiz bariyerleri uzman görüşleri doğrultusunda karşılaştırılmış ve uygulayıcıların öncelik vermesi gereken bariyerler tespit edilmiştir. Karşılaştırma için dilsel değişkenlere ihtiyaç duyulmuştur. Bariyerler nitel yapıdadır ve karşılaştırma sırasında karar vericilerin öznel görüşlerine başvurulmuştur. Bulanık yöntemler doğasında belirsizlik taşıyan problem türleri için tutarlı sonuçlar sunabilmektedir. Kriterlerin karşılaştırılmasında çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan bulanık BWM (Best Worst Metot) yöntemi tercih edilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde dijital ikiz ve üretim birlikteliği ile üretimdeki dijital ikiz bariyerlerine

dair literatür araştırması sunulmuştur. Üçüncü bölümde FBWM yöntemi tanıtılmış ve çözüm aşamaları ortaya konulmuştur. Dördüncü bölüm kriterlerin karşılaştırılması için yapılan analizi ve elde edilen bulguları içermektedir. Sonuç bölümünde ise bulgular ışığında çalışmanın katkıları ve çalışmanın getirdiği ileriye dönük yeni araştırma olanakları tartışılmıştır.

2. Literatür Araştırması

2.1. Dijital İkiz ve Üretim İlişkisi

Dijital teknolojilerin yüksek gelişim hızının aksine mekanik otomasyona dayalı üretim sistemlerinin dijital ve akıllı üretim sistemlerine dönüşmesi yeterince hızlı gerçekleşmemiştir (Zhang vd., 2022). Ürün ve üretim süreçlerinin dijital dönüşümüne yönelik kapsamlı bir uygulama prosedürüne sahip olan dijital ikiz, bu dönüşümün öncü ve kolaylaştırıcı araçlarından biri olarak görülmektedir. Dijital ikiz platformu üretimde tüm üretim süreci yönetiminin kontrolü ve ürün yaşam döngüsünün optimizasyonu için kullanılabilir (Zhang vd., 2022). Platform temel olarak veri toplama, veri modelleme ve veri uygulaması olmak üzere üç boyuttan oluşmaktadır ve bu boyutların işlevselliği için bulut bilişim, nesnelerin interneti, artırılmış gerçeklik ve yapay zekâ teknolojilerine ihtiyaç duymaktadır (Attaran ve Celik, 2023).

Tasarım süreçleri ürünün kalitesi üzerinde doğrudan etkilere sahiptir. Dijital ikiz vasıtasıyla herhangi bir prototipe gerek kalmadan tasarıma yönelik yapılabilecek testler zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır (Tekinerdogan ve Verdouw, 2020). Ürünün sürekli kontrol altında olması sorunların önceden tespitini ve ürüne dair değişiklikleri uygulamayı kolaylaştırmaktadır. Ürünün durumuna dair sistem içerisinde biriken dinamik büyük veri sayesinde öngörücü analizler yapılabilmektedir. Herhangi bir ekipmanın, aracın veya sürecin temsiliyetini yapacak dijital ikiz, olası arızalar için bir öngörücü tahmin modeli hazırlanmasına, çevrim ve hazırlık süresi optimizasyonuna ve üründe kullanılacak malzeme ve fonksiyon seçimine yardımcı olabilmektedir (van Dinter vd., 2022).

Üretim hattını temsil edecek dijital ikiz, montaj hattındaki bir değişikliğin verimlilik ve çıktı miktarı üzerindeki olası etkilerini test etmede kullanılabilir. Dijital ikiz gerçekte çok yüksek harcamalara sebep olabilecek böylesi bir değişim için maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır (Liu vd., 2021). Çalışanlar açısından sürecin, ekipmanın veya ürünün sanal ortamda temsiliyeti, bu unsurlara dair deneme ve öğrenme faaliyetlerinin sorunsuz ve düşük maliyetli gerçekleşmesini sağlamaktadır. Birçok farklı senaryo sanal ortamda denenerek çalışan hataları azaltılabilmekte ve hatadan kaynaklanacak üretim kesintilerinin önüne geçilebilmektedir (Yin vd., 2023).

Dijital ikiz, ön tasarım rolü, üretim süreci temsiliyeti ve öngörücü analize uygun yapısı nedeniyle AR-GE ve inovasyon öncelikli sektörlerde tercih edilmektedir. Soori vd. (2023) havacılık, otomotiv, enerji üretim ekipmanları ve telekomünikasyon endüstrilerinin yoğun olarak dijital ikiz uygulamalarını kullandığını belirtmektedir. Attaran ve Celik (2023)' in dijital ikiz kullanım uygulamalarına verdiği örneklerden bazıları şunlardır: Ürün tasarımı, süreç tasarımı ve optimizasyonu, tedarik zinciri yönetimi, öngörücü bakım, fonksiyonlar arası iş birliği, tarım uygulamaları, çiftlik yönetimi ve kaynak optimizasyonu, hava durumu modellemesi, tesis ve operasyon tasarımı, kaynak planlama ve lojistik, kalite kontrol ve değerlendirme. Vachálek vd. (2017) üretim süreçlerinin sürekli optimizasyonuna, proaktif bakıma ve süreç verilerinin sürekli işlenmesine odaklanan bir dijital ikiz uygulaması ile otomotiv endüstrisindeki verimliliğe katkı sunacak alternatif bir proje önermektedir. Park vd. (2020) dijital ikiz teknolojisini kişiselleştirilmiş üretim konsepti içerisinde kullanarak üretim süresinde ortalama %26,87'lik bir iyileştirme gerçekleştirmiştir.

Dijital ikiz, kabiliyet ve tarz açısından tasarım, denetim, bakım ve test gibi üretim süreçlerinde kullanmak için ideal bir araç olarak görülmektedir. Fakat bu aracın üretim süreçlerine başarılı entegrasyonu için entegrasyon sırasında karşılaşılabilecek sorunların tespit edilmesi önem taşımaktadır. Olası sorunların bilinmesi müdahale için doğru stratejilerin belirlenmesine yardımcı olabilmektedir. Dijital ikiz kurulum için özel, gelişmiş ve yüksek bütçe gerektiren altyapı teknolojilerine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca bu tarz sistemsel geliştirmeler organizasyon açısından değişimi de kaçınılmaz kılabilir. Dijital ikiz ve üretim birlikteliğinin etkinliğini amaçlayan doğru stratejiler zaman ve maliyet kazanımına katkı sağlayabilmektedir. Bu amaçla çalışmada, dijital ikiz ve üretim birlikteliği öncesinde ve birliktelik sırasında görülebilecek muhtemel sorunların tespitine odaklanılmaktadır.

2.2. Üretimde Dijital İkiz Bariyerleri

Dijital ikizin üretim süreçleri içerisinde kullanımı sırasında teknolojinin yanı sıra yönetimsel, kültürel ve örgütsel bariyerler ile karşılaşmak mümkündür. Sistemin, sürecin veya ürünün dijital eşdeğerini yapabilmek için genel davranış biçimini iyi analiz etmek ve ayrıntıları ortaya koymak gerekmektedir (Moreno vd., 2017). Fakat dijital ikiz uygulamaları sadece belirli birkaç endüstri kolunda kullanılabilmekte ve her bir üretim sürecinin özel ve karmaşık koşulları da göz önüne alındığında yaygın kullanım sırasında karşılaşılabilecek sorunlarla ilgili genel bir bakış açısının olmadığı görülmektedir (Perno vd., 2022).

Dijital ikiz gibi akıllı ve teknolojik bir aracın uygulanması sırasında organizasyonel ve ekonomik engeller ortaya çıkabilmektedir. Bu tarz engellerin bilinmesi kaynakların doğru planlaması ve zaman yönetimi açısından önem kazanmaktadır. Dijital ikiz bariyerleri ve kolaylaştırıcıları hakkında literatürde geniş bir araştırma boşluğu bulunmaktadır. Opoku vd. (2023) inşaat sektöründe dijital ikizin benimsenmesinin önündeki engelleri ortaya koymuştur. Neto vd. (2020) şirketlerin dijital ikiz tercih sebeplerini, girişimlerin gelişmesini sağlayan faktörleri ve uygulama çabalarını yavaşlatan bariyerleri tespit etmeye çalışmıştır. Perno vd. (2022) geniş literatür taraması sonucu belirledikleri dijital ikiz bariyerleri ve kolaylaştırıcıları ile uygulayıcılara daha iyi karar alma ortamı sağlamayı amaçlamıştır. Yadav ve Majumdar (2024) dijital ikizin tarımsal gıda tedarik zincirinde yaratabileceği büyük değişimin önündeki bariyerleri ve bu bariyerlerin birbirleri arasındaki ilişkilerini tespit etmeye odaklanmıştır.

Literatürde dijital ikiz bariyerlerini derleyen çalışmalar bulunmaktadır (Perno vd., 2022; Opoku vd., 2023; Yadav ve Majumdar, 2024; Neto vd., 2020). Bu çalışmada üretim ve dijital ikiz entegrasyonu sırasında ortaya çıkacak bariyerlerin tespitine ve geçmiştekilerden farklı olarak, bariyerlerin birbirleri arasındaki önem derecelerini ortaya koymaya ve doğru stratejiler oluşturabilmek için hangi bariyerlerin öncelikli olması gerektiğini belirlemeye odaklanılmaktadır. Çalışmada üretim sistemlerinde dijital ikiz kullanımına yönelik bariyerler karşılaştırılmak üzere beş ana kategori altında gruplandırılmıştır. Tablo 1. Dijital ikiz bariyerleri ve bu bariyerlerin tanımlarını ve bariyerlerin bahsedildiği kaynakları içermektedir.

Çalışmada dijital bariyerlerin belirlenmesinin yanı sıra farklı olarak bariyerlerin öncelik sıralamasının ortaya konulması amaçlanmıştır. Öncelikli uğraşı gerektiren bariyerlerin tespiti, girişim çabalarının doğru yönlendirilmesine ve üretim sürecinin verimliliğine katkı sağlayacaktır. Çalışmada, belirlenen bariyerlerin karşılaştırılmasında bulanık BWM yönteminden faydalanılmıştır.

Tablo 1: Üretimde dijital ikiz bariyerleri

Kod	Bariyer	Tanım	Kaynak
Bar ₁	Sistemselsel ve teknolojik entegrasyon yetersizlikleri	Eski üretim sistemlerine nesnelerin interneti ve sensör bazlı sistemlerin kolayca entegre edilememesi, yüksek yatırım harcamaları ve dijital sistemlerin birlikte çalışabilir olmasının zorluğu.	Perno vd. (2022); Yadav ve Majumdar (2024); Henrichs vd. (2021); Opoku vd. (2023); Neto vd. (2020).
Bar ₂	Güvenlik endişeleri	Veri şeffaflığının garanti edilmesindeki zorluklar, paydaşlarla dijital ikiz varlığının paylaşılabilirliği gereklilikleri, siber güvenlik tehditleri.	Perno vd. (2022); Yadav ve Majumdar (2024); Fuller vd. (2020).
Bar ₃	Veri depolama ve işletim zorlukları	Sürekli büyüyen veri, veri işleme ve analiz zorlukları, internet erişimindeki aksaklıklar, proje verilerindeki tutarsızlıklar, iletişim, izleme ve raporlama sağlamada gecikmeler, ani hata oluşumu, araç ve yöntem eksiklikleri.	Opoku vd. (2023); Rafsanjani ve Nabizadeh (2023); Perno vd. (2022).
Bar ₄	Organizasyon ve yetenek eksiklikleri	Değişime karşı örgütsel direnç, uzman eksikliği, bilgi alt yapısının yetersizliği	Neto vd. (2020); Perno vd. (2022), Opoku vd. (2023); Rafsanjani ve Nabizadeh (2023).
Bar ₅	Standardizasyon eksikliği	Dijital ikiz projelerinin uygulanmasına yönelik herhangi bir protokol ve düzenleme birliğinin olmayışı.	Yadav ve Majumdar (2024); Fuller vd. (2020); Perno vd. (2022).
Bar ₆	Beklenen faydanın anlaşılabilmesi	Sistemin yeterince tanınır olmamasından dolayı değerinin tam anlaşılabilmesi.	Loaiza, ve Cloutier (2022); Pires vd. (2020).
Bar ₇	Çevresel kontrol edilemeyen faktörler	Devlet teşvik ve desteklerinin olmaması, yasal ve etik ihlalleri ihtimali, dijital ikiz hakkındaki literatür ve pratik endüstriyel uygulamaların düşük olgunluğu.	Opoku vd. (2023); Perno vd. (2022).

3. Bulanık BMW Yöntemi

BMW yöntemi doğrusal programlama formatında tasarlanmış çok kriterli karar verme yöntemidir. Rezaei (2015) kurguladığı matematiksel model ile kesikli yapıdaki çok amaçlı problemler için bir çözüm metodolojisi sunmuştur. Önem açısından en iyi ve en kötü iki kriterin diğer kriterler ile arasındaki önem düzeyi karşılaştırmalarının genel değerlendirme için yeterli olduğu, dolayısıyla AHP gibi benzerlerine kıyasla ikili karşılaştırmalar için daha az veriye ihtiyaç duyan yöntemde, karşılaştırmalardan kaynaklı tutarsızlıkların tespit edilmesi de mümkündür (Karimi vd., 2020). Hesaplama kolaylığı sunması ve tutarsızlık tespiti yapabilen yapısı nedeniyle diğer çok kriterli yöntemlere göre çeşitli üstünlüklere sahip olan BMW, tedarik zinciri yönetimi (Ahmadi vd., 2017), tesis yeri seçimi (Kheybari vd., 2019) performans analizi (Akyüz vd., 2020) gibi farklı üretim yönetimi problemlerine uygulanabilmektedir.

Çok kriterli karar verme yöntemlerinde nitel yapıdaki kriterlerin önem ağırlıkları karar vericilerin öznel görüşlerinden etkilenebilmektedir. Bu tarz durumlarda değerlendirmelerdeki belirsizliği tolere edebilmek için bulanık yöntemler kullanılabilir (Karimi vd., 2020). Bu konuda yapılan çalışmalara örnek vermek gerekirse, Guo ve Zhao (2017), bulanık dilsel değişkenler üzerinden karşılaştırmalar yapan ve doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli önerisinde bulunmuşlardır. Ghoushchi vd. (2019) arıza modlarını karşılaştırmak için tasarladıkları üç aşamalı yaklaşımda risk öncelik faktörlerinin ağırlıklarını karşılaştırmak için bulanık BMW yönteminden faydalanmıştır. Chen vd. (2024) bulanık BMW yöntemi ile mevcut dijital ikiz projelerinin genel olgunluk ölçümüne yönelik bir değerlendirme aracı geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem uygulanmakta olan dijital ikiz projelerinin performansına odaklanmaktadır. Amiri vd. (2021) parametrelerinin üçgensel bulanık sayı olduğu bir sürdürülebilir tedarikçi seçimi problemi için α -kesme yöntemine dayalı BMW yönteminden faydalanmıştır.

Bu çalışmada Guo ve Zhao (2017)'nin BMW yöntemi için geliştirdiği bulanık dönüşüm yaklaşımı kullanılmıştır. Yöntem az sayıda bulanık ikili karşılaştırma ile net ağırlıklar ve tutarlı

sonuç üretebilmektedir (Ecer ve Pamucar, 2020). Yöntemin aşamalı olarak uygulaması aşağıdaki gibidir (Guo ve Zhao, 2017; Ecer ve Pamucar, 2020):

Adım 1: Problemdaki değerlendirme kriterleri $\{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ belirlenir ve karar verici seti oluşturulur.

Adım 2: Her bir karar verici kriterler içerisinde önem açısından en iyi (c_B) ve en kötü (c_w) kriteri tespit eder.

Adım 3: En iyi kriterin diğer kriterlere göre ne kadar daha önemli olduğu ve diğer kriterlerin en kötü kriterden ne kadar daha önemli olduğu ikili karşılaştırmalarla değerlendirilir. Değerlendirme kriterleri için Tablo 2.'de yer alan bulanık dilsel değişkenlerden faydalanılmaktadır. Tablo 2'de ayrıca bulanık dilsel değişkenlerin üyelik fonksiyonu sayı karşılıkları ve tutarlılık oranında kullanılacak tutarlılık indeksi değerleri görülmektedir.

Bu aşamada bulanık en iyinin diğerlerine göre önem durumunu ifade eden $\tilde{A}_B$ vektörü ile diğerlerinin bulanık en kötüye göre önem durumunu ifade $\tilde{A}_w$ vektörleri elde edilir.

$$\tilde{A}_B = (\tilde{a}_{B1}, \tilde{a}_{B1}, \tilde{a}_{B2}, \dots, \tilde{a}_{Bn}) \quad (1)$$

$$\tilde{A}_w = (\tilde{a}_{w1}, \tilde{a}_{w1}, \tilde{a}_{w2}, \dots, \tilde{a}_{wn}) \quad (2)$$

Tablo 2. Bulanık Dilsel Değişkenler Ve Sayı Karşılıkları

Dilsel değişkenler	Üyelik fonksiyonu	Tutarlılık indeksi
Eşit önemde (EÖ)	[1,1,1]	3.00
Biraz daha önemli (ZÖ)	[2/3, 1, 3/2]	3.80
Oldukça önemli (OÖ)	[3/2, 2, 5/2]	5.29
Çok önemli (ÇÖ)	[5/2, 3, 7/2]	6.69
Aşırı önemli (AÖ)	[7/2, 4, 9/2]	8.04

Kaynak: Ecer ve Pamucar, 2020: 5.

Adım 4: Optimal bulanık ağırlıklar $(\tilde{w}_1^*, \tilde{w}_2^*, \dots, \tilde{w}_n^*)$ için Denklem 3' de yer alan doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Modelde j . kriterin ağırlığı $\tilde{w}_j = (l_j^w, m_j^w, u_j^w)$ ile temsil edilmektedir.

Min ξ^*

$$\text{s. t. } \begin{cases} \left| \frac{l_B^w, m_B^w, u_B^w}{l_j^w, m_j^w, u_j^w} - l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj} \right| \leq (k^*, k^*, k^*) \\ \left| \frac{l_j^w, m_j^w, u_j^w}{l_W^w, m_W^w, u_W^w} - l_{jW}, m_{jW}, u_{jW} \right| \leq (k^*, k^*, k^*) \\ \sum_j R(\tilde{w}_j) = 1 \\ l_j^w \leq m_j^w \leq u_j^w \\ l_j^w \geq 0 \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

Burada l , m ve u , alt, orta ve üst değerleri gösterirken $\tilde{w}_B = (l_B^w, m_B^w, u_B^w)$, $\tilde{w}_W = (l_W^w, m_W^w, u_W^w)$, $\tilde{a}_{Bj} = (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj})$, $\tilde{a}_{jW} = (l_{jW}, m_{jW}, u_{jW})$ ile ifade edilmektedir. Ayrıca $\tilde{\xi} = (l^\xi, m^\xi, u^\xi)$: $l^\xi \leq m^\xi \leq u^\xi$ ve $\xi^* = (k^*, k^*, k^*)$; $k^* \leq l^\xi$ olarak kabul edilmektedir.

Bulanık BWM yöntemi sonucunda çoklu çözüm ile karşılaşmak mümkündür. Çoklu çözüm ortamında çözümün kalitesinin değerlendirilmesinde tutarlılık oranına (CR) başvurulmaktadır. Tutarlılık oranı hesabında Tablo 2’de yer verilen tutarlılık indeksine (CI) ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu değerler ışığında $CR = \xi^*/CI$ eşitliğinden elde edilmektedir ve $CR < 0,1$ oranı sonuçların tutarlı olduğunu göstermektedir (Ecer ve Pamucar, 2020; Ghoushchi vd., 2019).

4. Analiz

Bulanık BWM yöntemi az sayıda karşılaştırma ile oldukça tutarlı sonuçlar sunabildiğinden kullanım açısından oldukça pratik ve basit bir yöntemdir. Yöntem aracılığıyla kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesinde, karar vericilerin dilsel değişkenler doğrultusundaki yargıları etkili olmaktadır. Çalışmada yer alan karar vericiler, dijital ikizin kavramsal yapısı ve üretim sahasındaki uygulama alanları hakkında bilgi ve tecrübe sahibi uzman araştırmacı ve uygulayıcılardır. Tablo 3’ de karar vericilere dair pozisyon ve alan bilgisi sunulmuştur.

Tablo 3: Karar Verici Bilgileri

Karar Verici	Tecrübe (yıl)	Organizasyon / Bölüm	Pozisyon/Unvan
KV ₁	25	İşletme Bölümü	Prof. Dr.
KV ₂	18	Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü	Doç. Dr.
KV ₃	14	Üretim	Müdür
KV ₄	15	Yalın Üretim	Yönetici
KV ₅	13	Yatırım	Müdür
KV ₆	13	Endüstri Mühendisliği Bölümü	Dr. Öğr. Üyesi

Bu aşamadan sonra Tablo 1’de yer alan bariyerler hakkında dilsel değişkenler kullanılarak uzman görüşü toplanmıştır. İki aşamalı değerlendirme sürecinde, her bir karar verici ilk olarak problem için en çok dikkat edilmesi gereken bariyeri seçmiştir. Burada karar verici ikili olarak yaptığı bariyer karşılaştırmalarında, best olarak ifade edilen bariyerin diğer bariyerlere göre problem açısından ne kadar daha önemli olduğuna karar vermektedir. Sürecin ikinci aşamasında her bir karar verici problemin önemi açısından en kötü bariyeri belirlemektedir. Bu aşamada ikili karşılaştırmalar ile diğer bariyerlerin worst olarak ifade edilen bariyere göre problem açısından ne kadar daha önemli olduğu değerlendirilmektedir. İki farklı açıdan yapılan değerlendirme ile AHP ve benzeri tekniklerdekine göre kriter karşılaştırma süreci çok daha az çaba ile tamamlanmaktadır. Tablo 4 ve Tablo 5 karar vericilerin bariyerler hakkındaki dilsel değişkenler aracılığıyla yaptıkları değerlendirmeleri içermektedir.

Tablo 2’ de görüleceği üzere dilsel değişkenlerin bulanık üçgensel sayı karşılıkları bulunmaktadır. Karar vericilerin dilsel değişkenler aracılığıyla yaptığı değerlendirmeler bulanık sayılara dönüştürülmektedir. Aşağıda KV₁ görüşlerine ait karşılaştırma dizinleri örnek olarak sunulmuştur.

$$\tilde{A}_B = [(1,1,1), (2,5,3,3,5), (1,5,2,2,5), (0,67,1,1,5), (2,5,3,3,5), (1,5,2,2,5), (3,5,4,4,5)] \quad (4)$$

$$\tilde{A}_W = [(3,5,4,4,5), (0,67,1,1,5), (1,5,2,2,5), (2,5,3,3,5), (1,5,2,2,5), (1,5,2,2,5), (1,1,1)] \quad (5)$$

Tablo 4: Best Bariyere Göre Yapılan Değerlendirmeler

Karar Verici	Best bariyer	Bariyerler						
		Bar ₁	Bar ₂	Bar ₃	Bar ₄	Bar ₅	Bar ₆	Bar ₇
KV ₁	Bar ₁	EÖ	ÇÖ	OÖ	ZÖ	ÇÖ	OÖ	AÖ
KV ₂	Bar ₁	EÖ	ÇÖ	OÖ	AÖ	ÇÖ	OÖ	ÇÖ
KV ₃	Bar ₅	EÖ	AÖ	AÖ	OÖ	EÖ	AÖ	ÇÖ
KV ₄	Bar ₆	ZÖ	OÖ	ÇÖ	AÖ	AÖ	EÖ	AÖ
KV ₅	Bar ₃	ZÖ	OÖ	EÖ	ÇÖ	ÇÖ	AÖ	AÖ
KV ₆	Bar ₁	EÖ	OÖ	ZÖ	ZÖ	ÇÖ	AÖ	AÖ

Tablo 5: Worst Bariyere Göre Yapılan Değerlendirmeler

Bariyerler	Karar Verici					
	KV ₁	KV ₂	KV ₃	KV ₄	KV ₅	KV ₆
	Worst Bariyer					
	Bar ₇	Bar ₄	Bar ₂	Bar ₄	Bar ₆	Bar ₇
Bar ₁	AÖ	ÇÖ	AÖ	OÖ	AÖ	AÖ
Bar ₂	ZÖ	OÖ	EÖ	ZÖ	OÖ	OÖ
Bar ₃	OÖ	OÖ	ZÖ	OÖ	AÖ	ÇÖ
Bar ₄	ÇÖ	EÖ	ZÖ	EÖ	OÖ	ÇÖ
Bar ₅	OÖ	OÖ	AÖ	ZÖ	ZÖ	OÖ
Bar ₆	OÖ	OÖ	ZÖ	AÖ	EÖ	EÖ
Bar ₇	EÖ	OÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	EÖ

Tüm dilsel değişkenlerin bulanık sayı dönüşümü sonrası FBWM' nin doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon modeli aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir. Aşağıda örnek olarak KV₁ tarafından yapılan karşılaştırmalar sonrası kurulan model görülmektedir.

Minimize k^* ;

s.t.

$$11-2.5*u_2 \leq k*u_2; 11-2.5*u_2 \geq -k*u_2;$$

$$m1-3*m_2 \leq k*m_2; m1-3*m_2 \geq -k*m_2;$$

$$u1-3.5*l_2 \leq k*l_2; u1-3.5*l_2 \geq -k*l_2;$$

$$11-1.5*u_3 \leq k*u_3; 11-1.5*u_3 \geq -k*u_3;$$

$$m1-2*m_3 \leq k*m_3; m1-2*m_3 \geq -k*m_3;$$

$$u1-2.5*l_3 \leq k*l_3; u1-2.5*l_3 \geq -k*l_3;$$

$$11-0.67*u_4 \leq k*u_4; 11-0.67*u_4 \geq -k*u_4;$$

$$m1-m_4 \leq k*m_4; m1-m_4 \geq -k*m_4;$$

$$u1-1.5*l_4 \leq k*l_4; u1-1.5*l_4 \geq -k*l_4;$$

$$11-2.5*u_5 \leq k*u_5; 11-2.5*u_5 \geq -k*u_5;$$

$$m1-3*m_5 \leq k*m_5; m1-3*m_5 \geq -k*m_5;$$

$$u1-3.5*l_5 \leq k*l_5; u1-3.5*l_5 \geq -k*l_5;$$

$$11-1.5*u_6 \leq k*u_6; 11-1.5*u_6 \geq -k*u_6;$$

$$\begin{aligned}
&m1-2*m6 \leq k*m6; m1-2*m6 \geq -k*m6; \\
&u1-2.5*16 \leq k*16; u1-2.5*16 \geq -k*16; \\
&l1-3.5*u7 \leq k*u7; l1-3.5*u7 \geq -k*u7; \\
&m1-4*m7 \leq k*m7; m1-4*m7 \geq -k*m7; \\
&u1-4.5*17 \leq k*17; u1-4.5*17 \geq -k*17; \\
&l2-0.67*u7 \leq k*u7; l2-0.67*u7 \geq -k*u7; \\
&m2-1*m7 \leq k*m7; m2-1*m7 \geq -k*m7; \\
&u2-1.5*17 \leq k*17; u2-1.5*17 \geq -k*17; \\
&l3-1.5*u7 \leq k*u7; l3-1.5*u7 \geq -k*u7; \\
&m3-2*m7 \leq k*m7; m3-2*m7 \geq -k*m7; \\
&u3-2.5*17 \leq k*17; u3-2.5*17 \geq -k*17; \\
&l4-2.5*u7 \leq k*u7; l4-2.5*u7 \geq -k*u7; \\
&m4-3*m7 \leq k*m7; m4-3*m7 \geq -k*m7; \\
&u4-3.5*17 \leq k*17; u4-3.5*17 \geq -k*17; \\
&l5-1.5*u7 \leq k*u7; l5-1.5*u7 \geq -k*u7; \\
&m5-2*m7 \leq k*m7; m5-2*m7 \geq -k*m7; \\
&u5-2.5*17 \leq k*17; u5-2.5*17 \geq -k*17; \\
&l6-1.5*u7 \leq k*u7; l6-1.5*u7 \geq -k*u7; \\
&m6-2*m7 \leq k*m7; m6-2*m7 \geq -k*m7; \\
&u6-2.5*17 \leq k*17; u6-2.5*17 \geq -k*17;
\end{aligned}$$

$$1/6*l1+4/6*m1+1/6*u1+1/6*l2+4/6*m2+1/6*u2+1/6*l3+4/6*m3+1/6*u3+1/6*l4+4/6*m4+1/6*u4+1/6*l5+4/6*m5+1/6*u5+1/6*l6+4/6*m6+1/6*u6+1/6*l7+4/6*m7+1/6*u7=1;$$

$$l1 \leq m1; m1 \leq u1; l2 \leq m2; m2 \leq u2; l3 \leq m3; m3 \leq u3; l4 \leq m4; m4 \leq u4; l5 \leq m5; m5 \leq u5; l6 \leq m6; m6 \leq u6; l7 \leq m7; m7 \leq u7;$$

$$l1 \geq 0; l2 \geq 0; l3 \geq 0; l4 \geq 0; l5 \geq 0; l6 \geq 0; l7 \geq 0; k \geq 0; \quad (6)$$

KV₁ değerlendirmeleri sonrası Model 6 çözümü ile bariyerlere ait optimum ağırlıklar ortaya çıkmaktadır. Bu durumda ağırlıklar sırasıyla,

$$\begin{aligned}
\tilde{w}_1^* &= (0.2773, 0.2773, 0.2773); \tilde{w}_2^* = (0.0706, 0.0809, 0.1067); \\
\tilde{w}_3^* &= (0.1334, 0.1335, 0.1552); \tilde{w}_4^* = (0.1489, 0.1944, 0.253); \\
\tilde{w}_5^* &= (0.088, 0.1014, 0.1336); \tilde{w}_6^* = (0.1334, 0.1335, 0.1439); \\
\tilde{w}_7^* &= (0.0644, 0.0644, 0.0706); \xi^* = (0.4258, 0.4258, 0.4258)
\end{aligned}$$

olarak elde edilmektedir. Değerlendirme aşamasında en iyi kriterin en kötü kriter üzerindeki önemi tutarlılık oranı hesabında dikkate alınmaktadır. KV₁ çözümü sonrası tutarlılık oranı $CR = 0.4258/8.04 = 0.0530$ olarak hesaplanmıştır. $CR < 0.1$ oranı çözümün tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca tutarlılık oranının 0'a olan yakınlığı çözümün kalitesi açısından olumlu olarak değerlendirilmektedir. Tablo 6 ve Tablo 7 tüm karar vericilerin görüşleri doğrultusunda hesaplanan bariyerlere ait bulanık ağırlıkları, net göreceli ağırlıkları ve bariyer önem sırasını içermektedir.

5. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışma dijital ikiz teknolojisine dayalı uygulamaların üretim süreçleri içerisinde değerlendirilmesi amacıyla kurulacak sistemlerde uygulama öncesi veya uygulama sırasında ortaya çıkabilecek bariyerleri belirlemeyi ve ikili karşılaştırmalar yoluyla bariyerler arasında bir öncelik sıralaması yapmayı amaçlamıştır. Belirlenen bariyerler nitel yapıda olduğundan bu tarz kriterlerin karşılaştırılmasında bulanık yöntemler oldukça kullanışlı olabilmektedir. Nitekim çalışmada FBWM tekniğinden faydalanılarak bariyerler hakkında uzman görüşlerine dayalı değerlendirmelere yer verilmiştir. Elde edilen bulanık veriler, FBWM yöntemi temelinde kurgulanan modeller ile analiz edilmiş ve bariyerlerle ilgili önem ağırlıkları tespit edilmiştir. Bu ağırlıklar bariyerlerin sıralamasında kullanılabileceği gibi farklı dijital ikiz proje alternatiflerinin karşılaştırılması ve optimum projenin seçilmesi amacıyla da hizmet edebilir.

Dijital ikiz kavramı halihazırda yeni gelişmekte olduğundan bu konuda sınırlı sayıda uygulama ve araştırma bulunmaktadır. Genellikle araştırmalar teorik temelli ve alandaki gelişmeleri içermektedir. Dijital ikiz uygulamalarının başarısını etkileyebilecek, entegrasyon çalışmalarını yavaşlatacak veya engelleyebilecek etkenleri konu edinen birkaç çalışmada dijital ikiz bariyerlerinin neler olabileceğine yönelik tartışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada farklı olarak birbirleri ile ilişkili olabilecek bariyerler gruplandırılmış ve öne çıkan bariyer kümeleri üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışma, hazırlandığı zaman dilimi içerisinde üretimde dijital ikiz kullanımına yönelik bariyerlerin karşılaştırılmasına odaklanan öncü araştırmalardan biridir.

Analiz sonuçları üretim sahalarında kullanılacak dijital ikiz uygulamaları hakkında fikirler sunmaktadır. Uzman deneyimleri doğrultusunda ortaya çıkan sonuçlara göre üretime yönelik dijital ikiz projelerinde uygulayıcıların karşılaşılabileceği en büyük zorluk Bar₁ olarak ifade edilen sistemsel ve teknolojik entegrasyon yetersizlikleri olarak öne çıkmaktadır. Dijital ikiz yeni gelişmekte olduğundan bu alanda sınırlı sayıda sağlayıcı bulunmakta ve rekabet ortamı yeterince gelişmemiş durumdadır. Bu durum yatırım maliyetlerinin yüksek seyretmesine sebep olmaktadır. Aynı zamanda dijital ikizde olduğu gibi bu sistemlerin ihtiyaç duyduğu sensör vb. alt bileşenlerin de yeni gelişmekte olduğu göz önünde bulundurulduğunda Bar₁ bariyeri genel durumla uyumlu olarak öne çıkmaktadır.

Sıralamada ikinci olarak Bar₃ ile ifade edilen veri depolama ve işletim zorlukları bariyeri gelmektedir. Dijital ikiz, veri bağlantısı yoluyla dinamik olarak gerçek dünyadaki benzerinden sağlanan veri akışı ile beslenmektedir. Bu durum yüksek hacimli büyük veri depolanmasına sebebiyet vermektedir. Veri akışının kesintisiz sağlanması ve depolanan verinin sürekli olarak genişlemesi, hacim ve hız bakımından düzenli olarak yenilenen hafızalara ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca veri akışı stabilizasyonu için kaliteli internet ve denetim mekanizmasının kurulması gerekmektedir. Tüm bu gerekçeler mevcut teknolojik altyapı göz önüne alındığında Bar₃'ün dikkat gerektiren bir bariyer olarak görülmesini sağlamaktadır.

Sıralamanın diğer tarafında Bar₇ ile gösterilen çevresel kontrol edilemeyen faktörler en az önem gösterilmesi gereken bariyer olarak tespit edilmiştir. Devlet teşvik ve desteklerinin hayata geçirilebilmesi için yasal ve idari altyapının kurulması gerekmektedir. Bürokratik süreçler uzun zaman almasına rağmen teknolojik gelişmeler oldukça dinamik ve değişkendir. Dolayısıyla bu tür girişimleri beklemek gereksiz olabilmekte ve ekonomik değer açısından bir kazanım taşımayabilmektedir. Benzer olarak Bar₂ ile gösterilen güvenlik endişeleri, en az önem gösterilmesi gereken diğer bir bariyer olarak bulunmuştur. Üretim ve tedarik zincirleri alanında kriptolama mekanizması ile güvenli veri ortamını sağlayan blok zincir tarzı teknolojik sistemler, dijital ikiz teknolojisinin paralelinde gelişmektedir. Dolayısıyla bu tarz teknolojik imkanların güvenlik endişelerini azaltmada etkisi olabileceği düşünülmektedir.

Tablo 6: Bariyerlere Ait Bulanık Ağırlıklar

Karar Verici	$\tilde{w}_1^*$			$\tilde{w}_2^*$			$\tilde{w}_3^*$			$\tilde{w}_4^*$		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
KV ₁	0.2773	0.2773	0.2773	0.0706	0.0809	0.1067	0.1334	0.1335	0.1552	0.1489	0.1944	0.253
KV ₂	0.2889	0.2889	0.3046	0.0968	0.1092	0.1346	0.1123	0.1562	0.1791	0.0627	0.0663	0.0845
KV ₃	0.3187	0.3187	0.3364	0.0679	0.0716	0.0833	0.0556	0.0716	0.0833	0.0933	0.1038	0.1325
KV ₄	0.1605	0.2025	0.2569	0.1081	0.1234	0.1534	0.1084	0.1209	0.1628	0.0839	0.0839	0.0879
KV ₅	0.2306	0.2678	0.2787	0.1312	0.1448	0.166	0.2678	0.2678	0.2824	0.0825	0.1012	0.1248
KV ₆	0.2331	0.2669	0.2669	0.0912	0.1188	0.121	0.1386	0.2127	0.2127	0.1386	0.2127	0.2127
Karar Verici	$\tilde{w}_5^*$			$\tilde{w}_6^*$			$\tilde{w}_7^*$			ξ^*	CR	
	l	m	u	l	m	u	l	m	u			
KV ₁	0.088	0.1014	0.1336	0.1334	0.1335	0.1439	0.0644	0.0644	0.0706	0.4258	0.0530	
KV ₂	0.0968	0.1092	0.1346	0.1123	0.1562	0.1791	0.0968	0.1092	0.1346	0.3542	0.0441	
KV ₃	0.2543	0.2543	0.2753	0.0556	0.0716	0.0833	0.0697	0.0997	0.124	0.4494	0.0559	
KV ₄	0.0653	0.0693	0.0789	0.316	0.316	0.3308	0.0653	0.0693	0.0789	0.5599	0.0696	
KV ₅	0.0732	0.0811	0.0938	0.0581	0.0615	0.072	0.0681	0.0732	0.0787	0.3542	0.0441	
KV ₆	0.0717	0.1037	0.1124	0.0541	0.0603	0.0603	0.0541	0.0658	0.0668	0.4258	0.0530	

Tablo 7. Bariyerler Net Göreceli Ağırlıklar Ve Önem Sırası

Ağırlıklar	Bariyerler						
	Bar ₁	Bar ₂	Bar ₃	Bar ₄	Bar ₅	Bar ₆	Bar ₇
	0.2696	0.1100	0.1586	0.1260	0.1221	0.1332	0.0808
Sıra	1	6	2	4	5	3	7

Analiz sonuçları daha önce yapılan çalışmalardaki tespitlerle benzerlikler taşımaktadır. Perno vd. (2022) incelediği bariyerin değinildiği farklı çalışma sayısını sıralama kistası olarak kullanmıştır. Bu doğrultuda 12 çalışmada değinilen “sistem entegrasyonunun eksikliği” bariyeri en öncelikli ikinci bariyer olarak bulunmuştur. Aynı çalışmada “birlikte çalışabilirliğin sağlanmasında zorluk” bariyeri, 8 ayrı çalışmada değinilmesi itibari ile yine öncelik taşıyan bariyerlerdendir. Opoku vd. (2023) benzer olarak değinilme sayısını sıralama kriteri olarak kullanmış ve bu doğrultuda “düşük bilgi düzeyi” ve “düşük düzeyde teknoloji kabulü” olarak isimlendirdikleri bariyerlerin ilk iki sırada olduğunu bulmuştur. Yadav ve Majumdar (2024) tarımsal gıda tedarik zincirindeki dijital ikiz bariyerlerini incelerken WINGS (Ağırlıklı Etkili Doğrusal Olmayan Ölçüm Sistemi) yöntemini kullanmış ve “çalışabilirliğin eksikliği” ve “teknoloji altyapısının eksikliği” bariyerlerinin öncelik taşıdığını belirlemiştir. Tüm bu tespitler sistemsel ve teknolojik entegrasyon için yeterli ortamın oluşmadığını ifade etmekte ve çalışmamızın sonuçlarıyla uyum taşımaktadır.

Çalışmada belirlenen bariyerler mevcut dijital ikiz uygulamaları ve bu konudaki yapılmış çalışmaların bir sentezini içermektedir. Dijital ikiz farklı üretim projelerinde kullanıldıkça ve bu alandaki teknolojik imkanlar iyileştikçe bariyerlerin sırası ve niteliği değişim gösterebilir. Ayrıca bu konuda bilgi sahibi uzman sayısı oldukça kısıtlıdır. Sistematik literatür araştırması sırasında, bu konudaki çalışmaların genellikle derlemeler olduğu ve bu alanda ampirik çalışmalara ihtiyaç olduğu çıkarımı yapılmıştır. Öte yandan dijital ikiz kavramı konusunda yaygın ve kabul edilebilir ortak bir tanımlamaya da ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu kısıtlara rağmen yapılan çalışmanın uygulama zorluklarını azaltmaya yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

Destek ve Teşekkür Beyanı: Bu araştırmanın hazırlanmasında herhangi bir dış destek alınmamıştır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı: Bu çalışma tek yazarlı olup yazarın katkı oranı %100'dür.

Çatışma Beyanı: Araştırmanın yazarları olarak herhangi bir çıkar çatışma beyanımız bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı: Bu araştırmanın her aşamasında "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi"nde belirtilen tüm kurallara uyulmuştur. Yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirisi gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmanın yazım sürecinde etik kurallarına uygun alıntı yapılmış ve kaynakça oluşturulmuştur. Çalışma intihal denetimine tabi tutulmuştur.

Kaynakça

- Ahmadi, H. B., Kusi-Sarpong, S., & Rezaei, J. (2017). Assessing the social sustainability of supply chains using Best Worst Method. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 99-106.
- Akyüz, G., Tosun, Ö., & Aka, S. (2020). Performance evaluation of non-life insurance companies with Best-Worst method and TOPSIS. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 16(1), 108-125.
- Amiri, M., Hashemi-Tabatabaei, M., Ghahremanloo, M., Keshavarz-Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., & Banaitis, A. (2021). A new fuzzy BWM approach for evaluating and selecting a sustainable supplier in supply chain management. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 28(2), 125-142.
- Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6, 100165.
- Chen, Z. S., Chen, K. D., Xu, Y. Q., Pedrycz, W., & Skibniewski, M. J. (2024). Multiobjective optimization-based decision support for building digital twin maturity measurement. *Advanced Engineering Informatics*, 59, 102245.
- Ecer, F., & Pamucar, D. (2020). Sustainable supplier selection: A novel integrated fuzzy best worst method (F-BWM) and fuzzy CoCoSo with Bonferroni (CoCoSo'B) multi-criteria model. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121981.
- Errandonea, I., Beltrán, S., & Arrizabalaga, S. (2020). Digital Twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 123, 103316.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971.
- Ghoushchi, S. J., Yousefi, S., & Khazaeili, M. (2019). An extended FMEA approach based on the Z-MOORA and fuzzy BWM for prioritization of failures. *Applied Soft Computing*, 81, 105505.
- Guo, S., & Zhao, H. (2017). Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. *Knowledge-Based Systems*, 121, 23-31.
- Henrichs, E., Noack, T., Pinzon Piedrahita, A. M., Salem, M. A., Stolz, J., & Krupitzer, C. (2021). Can a byte improve our bite? An analysis of digital twins in the food industry. *Sensors*, 22(1), 115.
- informatics10010014 Park, K. T., Lee, J., Kim, H. J., & Noh, S. D. (2020). Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106, 1787-1810.
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36-52.
- Karimi, H., Sadeghi-Dastaki, M., & Javan, M. (2020). A fully fuzzy best-worst multi attribute decision making method with triangular fuzzy number: A case study of maintenance assessment in the hospitals. *Applied Soft Computing*, 86, 105882.

- Kheybari, S., Kazemi, M., & Rezaei, J. (2019). Bioethanol facility location selection using best-worst method. *Applied Energy*, 242, 612-623.
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361.
- Loaiza, J. H., & Cloutier, R. J. (2022). Analyzing the implementation of a digital twin manufacturing system: Using a systems thinking approach. *Systems*, 10(2), 22.
- Moreno, A., Velez, G., Ardanza, A., Barandiaran, I., de Infante, Á. R., & Chopitea, R. (2017). Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(2), 365-373.
- Neto, A. A., Deschamps, F., da Silva, E. R., & de Lima, E. P. (2020). Digital twins in manufacturing: an assessment of drivers, enablers and barriers to implementation. *Procedia Cirp*, 93, 210-215.
- Opoku, D.-G.J., Perera, S., Osei-Kyei, R., Rashidi, M., Bamdad, K., Famakinwa, T. (2023). Barriers to the Adoption of Digital Twin in the Construction Industry: A Literature Review. *Informatics*, 10, 14. <https://doi.org/10.3390/informatics10010014>.
- Perno, M., Hvam, L., & Haug, A. (2022). Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Computers in Industry*, 134, 103558.
- Pires, F., Melo, V., Almeida, J., & Leitão, P. (2020, June). Digital twin experiments focusing virtualisation, connectivity and real-time monitoring. In *2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS)*, 1, 309-314, IEEE.
- Rafsanjani, H. N., & Nabizadeh, A. H. (2023). Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin. *Energy and Built Environment*, 4(2), 169-178.
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130, 103469.
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Digital twin for smart manufacturing, A review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 100017.
- Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J., & Ji, P. (2022). Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 372-389.
- Tekinerdogan, B., & Verdouw, C. (2020). Systems architecture design pattern catalog for developing digital twins. *Sensors*, 20(18), 5103.
- Vachálek, J., Bartalský, L., Rovný, O., Šišmišová, D., Morháč, M., & Lokšík, M. (2017, June). The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept. In *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, 258-262, IEEE.
- van Dinter, R., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2022). Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 151, 107008.
- Wu, J., Yang, Y., Cheng, X. U. N., Zuo, H., & Cheng, Z. (2020, November). The development of digital twin technology review. In *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, 4901-4906, IEEE.
- Yadav, V. S., & Majumdar, A. (2024). What impedes digital twin from revolutionizing agro-food supply chain? Analysis of barriers and strategy development for mitigation. *Operations Management Research*, 1-17.

Yin, Y., Zheng, P., Li, C., & Wang, L. (2023). A state-of-the-art survey on Augmented Reality-assisted Digital Twin for futuristic human-centric industry transformation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 81, 102515.

Zhang, R., Wang, F., Cai, J., Wang, Y., Guo, H., & Zheng, J. (2022). Digital twin and its applications: A survey. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(11), 4123-4136.839