

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Tedarik Zincirlerinde Dijital İkiz Teknolojisinin Avantajlarının KPI Kriterleri Üzerinden Analizi¹

Analysis of the Advantages of Digital Twin Technology in Supply Chains Based on KPI Criteria

Berfin TAYHAVA ¹, Emel YONTAR ^{*}

¹ Tarsus Üniversitesi

^{*} Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü,

Sorumlu yazar: eyontar@tarsus.edu.tr

Geliş: 08.09.2025 · Kabul: 29.12.2025

ÖZ

Bu çalışmanın temel amacı, tedarik zinciri yönetiminde dijital ikiz kullanımının sunduğu avantajları belirlemek ve bu avantajları Temel Performans Göstergeleri (KPI) çerçevesinde sistematik olarak sınıflandırmaktır. Elde edilen KPI'lar, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Yöntemlerinden biri olan BWM (Best-Worst Method) yöntemi kullanılarak analiz edilecek ve dijital ikiz teknolojinin tedarik zinciri performansına katkıları önem derecelerine göre sıralanacaktır. Dijital ikiz uygulamalarının enerji verimliliği, karbon emisyonlarının azaltılması, teslimat sürelerinin kısaltılması, kaynak kullanım optimizasyonu ve operasyonel maliyetlerin düşürülmesi gibi çok boyutlu performans alanlarında sağladığı kazanımlar, çalışmanın temel analiz çerçevesini oluşturmaktadır. Bu analiz sayesinde, tedarik zincirlerinde dijital ikiz teknolojinin hangi performans göstergeleri üzerinde en büyük etkiyi yarattığı ortaya konulacak ve yöneticilere teknoloji yatırımlarını daha bilinçli yönlendirebilmeleri için karar desteği sunulacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma tedarik zincirlerinde dijital ikiz teknolojinin sunduğu avantajların bütüncül bir şekilde değerlendirilmesine katkı sağlamayı ve ÇKKV temelli bir analiz modeli ile literatüre özgün bir yöntem önerisi getirmeyi hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijital İkiz; Tedarik Zinciri Yönetimi, Temel Performans Göstergeleri (KPI); BWM

ABSTRACT

The main purpose of this study is to determine the advantages offered by the use of digital twins in supply chain management and to systematically classify these advantages within the framework of Key Performance Indicators (KPIs). The obtained KPIs will be analyzed using multi-criteria decision-making (MCDM) methods which is BWM method and the contributions of digital twin technology to supply chain performance will be ranked according to their importance. The gains provided by digital twin applications in multi-dimensional performance areas such as energy efficiency, carbon emission reduction, shortening delivery times, resource utilization optimization and reducing operational costs constitute the basic analysis framework of the study. This analysis will reveal which performance indicators digital twin technology has the greatest impact on in supply chains and will provide decision support to managers so that they can direct their technology investments more consciously. As a result, this study aims to contribute to the holistic evaluation of the advantages offered by digital twin technology in supply chains and to propose an original method to the literature with an analysis model based on MCDM.

Keywords: Digital Twin, Supply Chain Management, Key Performance Indicators (KPI), Multi-Criteria Decision Making

Atf: Tayhava, B., & Yontar, E. (2026). Tedarik Zincirlerinde Dijital İkiz Teknolojisinin Avantajlarının KPI Kriterleri Üzerinden Analizi. *Uluslararası Davranış, Sürdürülebilirlik ve Yönetim Dergisi*, 13(24), 1-13. <https://doi.org/10.71444/jobesam.1780333>



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

¹Bu makale, 15-16 Mayıs 2025 tarihlerinde gerçekleştirilen 5th International Symposium on Sustainable Logistics kapsamında sunulan bildiriden türetilmiştir.

1 | Giriş

Tedarik zinciri, tedarikçiler ve müşterilerden oluşan karmaşık ve dinamik bir sistemdir (Freese ve Ludwig, 2025). Küreselleşmenin hız kazanması, teknolojik gelişmelerin ivmelenmesi ve müşteri taleplerinin giderek daha değişken hale gelmesi, işletmeleri daha esnek, hızlı ve sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi modelleri geliştirmeye zorlamaktadır. Özellikle son yıllarda yaşanan COVID-19 pandemisi, ani doğa olayları, savaş, tarife değişiklikleri ve ihracat sınırlamaları, büyüyen siber tehditler, sosyal ve kültürel sorunlar, terörizm ve diğer sorunlar gibi belirsizlikler üretim sektöründe tedarik zincirlerinde büyük aksamalara ve ekonomik kayıplara yol açmıştır (Pujawan ve Bah, 2021). Bu bağlamda, yalnızca maliyet odaklı yaklaşımlar değil, aynı zamanda risk yönetimi, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik odaklı stratejiler ön plana çıkmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, çeşitli teknolojiler, süreçler ve insan karar alma süreçlerine destek sağlayan çeşitli bilgi sistemleri mevcuttur (Daneshvar Kakhki ve Gargeya, 2019) ve tedarik zinciri yönetiminde yaşanan bu dönüşüm, dijitalleşme süreçleri ile paralel ilerlemektedir. Son yıllarda büyük veri, yapay zekâ, blok zinciri, nesnelerin interneti ve dijital ikiz gibi yeni nesil teknolojilerdeki hızlı ilerlemeler dikkat çekmektedir. Bu gelişmelerle birlikte, akıllı işletmeler, kripto para birimleri, otonom araçlar ve sürdürülebilirlik gibi kavramlara olan ilgi de giderek artmaktadır (Deng vd., 2021). Tüm bu değişimler, küresel ölçekte Endüstri 4.0 vizyonunun etkisiyle büyük bir dönüşüm sürecini beraberinde getirmiştir. Bu dönüşüme ayak uydurabilmek için eğitimden savunmaya, üretimden hizmet sektörüne kadar pek çok alanda yapısal değişimler yaşanmaktadır.

Endüstri 4.0'ın en önemli bileşenlerinden biri olan dijital ikiz teknolojisi, fiziksel sistemlerin ve süreçlerin sanal ortamda dinamik bir yansımasının oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Dijital ikizler, gerçek dünya süreçlerini eş zamanlı olarak izleyip analiz edebilen, tahminlemeye ve optimizasyona imkân tanıyan dinamik simülasyon modelleridir (Liu vd., 2024). Gelişmiş veri analitiği, IoT sensörleri ve yapay zeka teknolojileri ile entegre çalışan bu sistemler, tedarik zincirlerinin performans göstergelerini ölçmede ve iyileştirmede kritik rol oynamaktadır. Özellikle tedarik zincirine özgü Temel Performans Göstergeleri (Key Performance Indicators - KPI) üzerinde dijital ikizlerin etkisinin sistematik biçimde analiz edilmesi, mevcut uygulamaların etkinliğini artırmak açısından büyük önem taşımaktadır.

Dijital ikiz teknolojisi, ilk olarak Grieves tarafından 2003 yılında ürün yaşam döngüsü yönetimi bağlamında ortaya konmuş, zamanla üretimden lojistiğe, savunmadan sağlık sektörüne kadar geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Grieves, 2019). Grieves'a (2019) göre dijital ikiz modeli üç temel bileşenden oluşmaktadır (Shengli, 2021): (1) Fiziksel dünyadaki gerçek ürün, (2) Siber dünyada bu ürünün dijital temsili, (3) Fiziksel ve dijital sistemler arasında gerçekleşen veri ve bilgi etkileşimi. Dijital ikiz teknolojisi, ürünlerin, geliştirme süreçlerinin ve üretimin dijitalleştirilmesini amaçlamaktadır. Bu çerçevede, fiziksel ürünün dijital ortama aktarılmasında üç aşamalı bir süreç işlemektedir. İlk olarak ürünün tüm niteliklerini içeren dijital ana veriler oluşturulmakta, ardından operasyonel süreç, üretim verileri, tesis ve altyapı bilgileriyle desteklenen bir dijital gölge meydana getirilmektedir. Son aşamada ise bu iki bileşenin entegrasyonu ile dijital ikiz oluşmaktadır (Kumaş ve Erol, 2021).

Grieves ve Vickers (2016) dijital ikizi, fiziksel varlık ile dijital model arasındaki sürekli veri akışına dayalı, dinamik bir sistem olarak tanımlamıştır. Kritzing vd., (2018) ise dijital ikizi üç kategoride sınıflandırmıştır: (1) Dijital Model: Fiziksel sistemden bağımsız, yalnızca teorik tasarımı içeren model. (2) Dijital Gölge: Fiziksel sistemden gelen verilerle güncellenen model.

(3) Dijital İkiz: Fiziksel sistem ile tam entegre, çift yönlü veri akışı sağlayan dinamik yapı. Bu sınıflandırma, dijital ikizin yalnızca bir simülasyon aracı değil, aynı zamanda karar destek mekanizması olduğunu göstermektedir.

Boschert ve Rosen (2016), dijital ikizin özellikle mühendislik süreçlerindeki tasarım, test ve doğrulama aşamalarını hızlandırdığını vurgulamıştır. Tao vd. (2019), dijital ikizin IoT, yapay zekâ ve büyük veri ile entegre olduğunda akıllı üretim sistemlerinin temel bileşeni haline geldiğini göstermiştir. Leng vd. (2021) ise CNC makinelerinde kestirimci bakım ve enerji optimizasyonu sağladığını, bu sayede üretim sürekliliğinin artırıldığını ortaya koymuştur.

Son yıllarda literatürde, dijital ikiz teknolojisinin tedarik zinciri yönetiminde kullanımı öne çıkmaktadır. Ivanov ve Dolgui (2020), tedarik zincirinde kesinti risklerinin yönetiminde dijital ikizlerin kritik rol oynadığını göstermiştir. Ivanov (2021) ise dalga etkilerinin (bullwhip effect) yönetiminde dijital ikizin sağlayabileceği avantajları incelemiştir. Busse vd. (2021) tarafından önerilen Dijital İkiz Destekli Tedarik Zinciri kavramı, tedarik zincirinde görünürlük, esneklik ve çeviklik sağlamaktadır. Klappich (2019), dijital ikizlerin tedarik zincirinde karar alıcılara ileriye dönük öngörüler sunduğunu ve bu sayede talep dalgalanmaları, tedarikçi kesintileri ve lojistik darboğazlara karşı daha proaktif çözümler geliştirilebildiğini belirtmiştir.

Literatürde dijital ikizin işletme performansı üzerindeki etkileri de yoğun olarak incelenmiştir. Liu vd. (2021), dijital ikizlerin lojistik sistemlerde sekiz temel hizmet (izleme, değerlendirme, tahmin vb.) ve beş temel yetkinlik (entegrasyon, simülasyon, etkileşim vb.) sunduğunu raporlamıştır. Shrivastava vd. (2025), narenciye ürünlerinin soğuk zincir taşımacılığında dijital ikiz modelleriyle kalite, enerji tüketimi ve çevresel etki gibi çoklu KPI'ların analiz edilebildiğini ortaya koymuştur. Marmolejo-Saucedo (2020), dijital ikizlerin tedarik zinciri yönetiminde teslimat süreleri, maliyet, enerji verimliliği ve müşteri memnuniyeti gibi KPI'lara doğrudan katkı sağladığını göstermiştir.

Literatür sonucu elde edilen bulgulara göre dijital ikiz teknolojisi, yalnızca izleme aracı değil, aynı zamanda karar destek ve optimizasyon sistemi işlevi görmektedir. Üretim süreçlerinde maliyet düşürme, kalite artırma ve bakım süreçlerini optimize etme odaklı faydalar sağlarken, tedarik zincirinde teslimat süresi, kaynak kullanımı, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik gibi KPI'lara yönelik çok boyutlu katkılar sunmaktadır.

Nitekim son yıllarda yapılan çalışmalar, dijital ikizlerin enerji verimliliğinden çevresel etkiye, teslimat doğruluğundan maliyet etkinliğine kadar çok boyutlu performans kriterlerini aynı anda değerlendirebildiğini göstermektedir. Örneğin, Kayan vd. (2025), tarımsal atıklardan biyohidrojen üretiminde dijital ikiz destekli bir tedarik ağı modeli geliştirerek karbon salınımı, taşıma verimliliği ve sosyal fayda gibi KPI'lara ilişkin analizler sunmuştur. Liu vd. (2024) ise lojistik sistemlerde dijital ikizlerin sekiz temel hizmetle (izleme, değerlendirme, tahmin vb.) beş yetkinliği (entegrasyon, simülasyon, etkileşim vb.) nasıl sağladığını literatür taramasıyla ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, dijital ikizlerin yalnızca kısa vadeli operasyonel çıktılar değil, aynı zamanda uzun vadeli stratejik ve sürdürülebilir avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır.

Ancak literatürde dikkat çeken bir boşluk, dijital ikiz teknolojisinin avantajlarının çoğunlukla nitel düzeyde ele alınmasıdır. Çoğu çalışma, dijital ikizin sunduğu fırsatları genel kavramlar üzerinden açıklamakta, ancak bu avantajların Temel Performans Göstergeleri çerçevesinde sistematik bir şekilde

analiz edilmesine sınırlı ölçüde yer vermektedir. Oysa KPI'lar, işletmelerin performansını ölçmek, stratejik hedeflerini takip etmek ve teknoloji yatırımlarının

geri dönüşünü değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. KPI'lar, işletmelerin stratejik hedeflerine ulaşmasında kritik öneme sahip olan performans ölçütleridir. Bu göstergeler, kurumların hedeflerini tanımlamalarına ve başarı düzeylerini objektif olarak değerlendirmelerine olanak sağlar. Etkili bir KPI, hem ölçülebilir olmalı hem de işletmenin uzun vadeli başarısına katkı sağlayacak nitelikte olmalıdır (Brocket ve Rezaee, 2012).

Bu çalışma, söz konusu boşluğu gidermeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, dijital ikiz teknolojisinin tedarik zincirinde sağladığı avantajlar KPI kriterleri üzerinden sınıflandırılmış ve Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden olan Best-Worst Method (BWM) kullanılarak analiz edilmiştir. Böylece hangi performans göstergelerinin dijital ikiz teknolojisinden en fazla etkilendiği belirlenmiş ve işletmelere teknoloji yatırımlarını daha rasyonel bir şekilde yönlendirmeleri için somut karar destek mekanizmaları sunulmuştur. Bu yönleriyle çalışma, hem akademik literatüre katkı sağlamakta hem de uygulayıcılar için yol gösterici nitelikte karar destek önerileri geliştirmektedir.

Çalışmanın geri kalan kısmında ikinci bölümde Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden olan BWM yöntemi hakkında teorik bilgi verilmiş ve kullanılacak KPI lar belirlenmiştir. Üçüncü bölüm olan bulgular başlığı altında BWM yönteminin adımları detaylıca aktararak belirlenen önem düzeyi sıralaması açıklanmıştır. Son bölüm olan tartışma bölümünde ise sonuç aktarılmıştır.

2 | Yöntem

Bu çalışmada temel amaç, dijital ikiz teknolojisinin tedarik zinciri yönetimine sağladığı avantajları Temel Performans Göstergeleri (KPI) üzerinden sistematik olarak değerlendirmektir. Bunun için Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biri olan Best-Worst Method (BWM) tercih edilmiştir.

Vektör temelli bir yaklaşım olan BWM (Best-Worst Method), çok kriterli karar verme alanına 2015 yılında Rezaei tarafından kazandırılmıştır. Bu yöntem, diğer çok kriterli karar verme teknikleriyle karşılaştırıldığında daha az sayıda ikili karşılaştırmaya ihtiyaç duyması ve hesaplama sürecinin basitliğiyle öne çıkar. BWM, karar verme sürecinde yer alan kriterler arasında en önemli olanın diğerlerine göre ve diğer kriterlerin en az önemli olana göre tercih derecelerinin belirlenmesine dayanır. Bu temelde yapılan değerlendirmeler aracılığıyla kriter ağırlıkları hesaplanır. BWM'nin seçilme nedeni, diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla daha az sayıda ikili karşılaştırma gerektirmesi, uzmanlardan elde edilen verilerde tutarlılığı ölçebilmesi ve küçük örneklem gruplarıyla dahi güvenilir sonuçlar verebilmesidir.

Bu metodolojinin uygulama adımları şu şekilde sıralanmaktadır (Rezaei, 2016):

Bu metodolojinin uygulama adımları şu şekilde sıralanmaktadır (Rezaei, 2016):

1. Adım: Kriterler belirlenir. (Kriterler $c_1, c_2, \dots, c_n$ olarak gösterilir).
2. Adım: En iyi (en önemli) kriter ve en kötü (en az önemli) kriter belirlenir.
3. Adım: En iyi kritere, diğer kriterlere kıyasla 1-9 arasında bir tercih puanı verilir.
 - $AB = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$ 1-9 arasındaki sayılar kullanılarak en iyi kriterin diğer tüm kriterlere göre önceliği belirlenir. AB_j en iyi kriterin Kriter j üzerindeki etki derecesini temsil eder.
4. Adım: En kötü kriteri diğer kriterlere göre 1-9 arasında derecelendirin
 - $AW = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})$ 1-9 arasındaki sayılar kullanılarak, en kötü kriterin diğer tüm

kriterlere göre önceliği belirlenir. a_jW en kötü kriterin Kriter j üzerindeki etki derecesini temsil eder.

5. Adım: En uygun kriter ağırlıkları belirlenir. $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$

- Amaç, tüm j s için maksimum mutlak farkların en aza indirilmesini sağlayacak şekilde kriterlerin ağırlıklarını hesaplamaktır.

Minimax formülü aşağıda yer aldığı şekilde kullanılarak belirlenmektedir.

$$\text{Min max } \{ |wB - a_j w_j|, |w_j - a_j W w_j| \}$$

$$\text{s.t. } \sum_j [w_j = 1]$$

$$w_j \geq 0, \text{ for all } j$$

Doğrusal model aşağıda yer alan formülü kullanılarak oluşturulmaktadır.

$$\text{min } \xi^L \text{ (Tutarlılık indeksi)}$$

$$\text{s.t.}$$

$$\{ |wB - a_j w_j| \leq \xi^L, \text{ for all } j$$

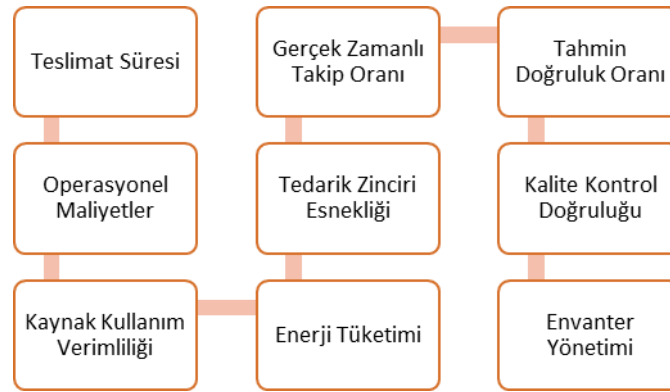
$$|w_j - a_j W w_j| \leq \xi^L, \text{ for all } j$$

$$\sum_j [w_j = 1]$$

$$w_j \geq 0, \text{ for all } j$$

İki denklem çözüldüğünde optimize edilmiş ağırlıklar $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)$ ve optimize edilmiş ξ^L elde edilecektir (Rezaei, 2016).

Literatür incelemesi ve uzman görüşleri doğrultusunda, tedarik zinciri performansını dijital ikiz penceresinden en iyi yansıtan dokuz KPI belirlenmiştir (Şekil 1). Bu kriterler, dijital ikiz teknolojinin doğrudan veya dolaylı olarak etkilediği performans alanlarını kapsamaktadır (Tablo 1).



Şekil 1. Tedarik zincirde dijital ikiz temel performans göstergeleri

Tablo 1. KPI tanımlamaları

Kod	KPI	Tanım	Yazarlar
DT1	Teslimat Süresi	Siparişin alınmasından teslim edilmesine kadar geçen süre	Tao vd., 2019
DT2	Operasyonel Maliyetler	Dijital ikizle optimize edilen süreçlerin toplam maliyeti	Lu vd., 2020
DT3	Kaynak Kullanım Verimliliği	Hammadde, enerji, iş gücü gibi kaynakların verimlilik düzeyi	Lu vd., 2020
DT4	Enerji Tüketimi	Dijital ikizle optimize edilen süreçlerdeki enerji tüketimi	Verdouw vd., 2021
DT5	Tedarik Zinciri Esnekliği	Ani değişikliklere karşı uyum sağlama becerisi	Ivanov vd., 2021
DT6	Gerçek Zamanlı Takip Oranı	Dijital ikizle incelenen süreç oranı	Lu vd., 2020
DT7	Tahmin Doğruluk Oranı	Talep-Sipariş tahminlerinin doğruluk oranı	Kritzing vd., 2018
DT8	Kalite Kontrol Doğruluğu	Kalite kontrol süreçlerinin iyileştirilmesi	Tao vd., 2019
DT9	Envanter Yönetimi	Stok takibi ile stok optimizasyonunun sağlanması	Lu vd., 2020

Çalışmada kullanılan veriler, beş farklı uzmanın görüşlerinden elde edilmiştir. Uzman seçiminde amaçlı örnekleme (purposive sampling) yöntemi benimsenmiştir. Katılımcılar, dijital ikiz uygulamaları, tedarik zinciri yönetimi, üretim planlama ve lojistik alanlarında en az 5 yıl deneyime sahip olmaları, akademik veya sektörel düzeyde bu alanlarda uzman bilgi birikimine sahip olmaları ve karar verme süreçlerine katkı sağlayabilecek nitelikte bilgi derinliğine sahip olmaları esas alınarak seçilmiştir. Uzmanların biri akademisyen, diğer dördü ise imalat, lojistik ve tedarik zinciri operasyonları alanlarında çalışan profesyonellerdir. Bu uzmanlardan üçü üretim sektöründe dijital dönüşüm projelerinde görev almış, ikisi ise tedarik zinciri optimizasyonu ve performans ölçümü konularında danışmanlık deneyimine sahiptir. Uzmanlardan, belirlenen KPI kriterlerini önem derecelerine göre değerlendirmeleri için görüş alınmıştır. BWM (Best-Worst Method) yöntemi, literatürde küçük örneklemle dahi güvenilir sonuçlar sağlayabilen (Rezaei, 2015; 2016) bir yöntem olduğundan, örneklem büyüklüğünün bu çalışma için yeterli olduğu değerlendirilmiştir.

Verilerin analizi için BWM-Solver yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, uzmanların verdiği değerlendirmeleri matematiksel modele dönüştürerek kriter ağırlıklarını otomatik olarak hesaplamaktadır.

Metodoloji kapsamında oluşturulan araştırma modeli üç bileşenden oluşmaktadır:

1. Girdi: Uzman görüşleri (BWM karşılaştırmaları)
2. Süreç: BWM algoritması ile ağırlıkların hesaplanması
3. Çıktı: KPI'ların göreceli önem sıralaması

Bu model sayesinde dijital ikiz teknolojisinin tedarik zinciri performansına sağladığı katkılar, yalnızca nitel değil, aynı zamanda nicel bir önceliklendirme ile ortaya konulmuştur.

3 | Bulgular

Bu bölümde, BWM analizi sonucunda dokuz KPI kriterine ait ağırlık değerleri hesaplanmış ve önem sıralamaları belirlenmiştir. Beş farklı karar vericinin değerlendirmelerine yer verilen çalışmada, temel kriterlere ilişkin değerlendirme sonuçları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Karar verici değerlendirmeleri**KV 1'in Değerlendirmeleri: En önemli faktör: DT3 | En az önemli faktör: DT8**

En önemli faktörün diğer faktörlere göre ikili karşılaştırma vektörü									
Değerlendirme	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9
En önemli faktörün diğer faktörlere göre tercih oranı	3	2	1	4	5	5	4	6	3
Diğer faktörlerin en az önemli faktöre göre ikili karşılaştırma vektörü									
Değerlendirme	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9
En önemli faktörün diğer faktörlere göre tercih oranı	3	4	6	2	2	3	3	1	4

KV 2'in Değerlendirmeleri: En önemli faktör: DT4 | En az önemli faktör: DT8

En önemli faktörün diğer faktörlere göre ikili karşılaştırma vektörü									
Değerlendirme	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9
En önemli faktörün diğer faktörlere göre tercih oranı	2	4	6	2	3	4	5	7	1
Diğer faktörlerin en az önemli faktöre göre ikili karşılaştırma vektörü									
Değerlendirme	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9
En önemli faktörün diğer faktörlere göre tercih oranı	7	4	2	1	6	2	5	3	4

KV 3'in Değerlendirmeleri: En önemli faktör: DT2 | En az önemli faktör: DT6

En önemli faktörün diğer faktörlere göre ikili karşılaştırma vektörü									
Değerlendirme	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9
En önemli faktörün diğer faktörlere göre tercih oranı	3	1	2	4	4	5	2	6	3
Diğer faktörlerin en az önemli faktöre göre ikili karşılaştırma vektörü									
Değerlendirme	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9
En önemli faktörün diğer faktörlere göre tercih oranı	6	7	5	4	3	1	2	3	3

KV 4'in Değerlendirmeleri: En önemli faktör: DT1 | En az önemli faktör: DT9

En önemli faktörün diğer faktörlere göre ikili karşılaştırma vektörü									
Değerlendirme	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9
En önemli faktörün diğer faktörlere göre tercih oranı	1	4	3	2	6	5	5	2	7
Diğer faktörlerin en az önemli faktöre göre ikili karşılaştırma vektörü									
Değerlendirme	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9
En önemli faktörün diğer faktörlere göre tercih oranı	7	2	4	3	2	3	3	4	1

KV 5'in Değerlendirmeleri: En önemli faktör: DT5 | En az önemli faktör: DT4

En önemli faktörün diğer faktörlere göre ikili karşılaştırma vektörü									
Değerlendirme	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9
En önemli faktörün diğer faktörlere göre tercih oranı	7	8	7	9	1	5	6	6	3
Diğer faktörlerin en az önemli faktöre göre ikili karşılaştırma vektörü									
Değerlendirme	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6	DT7	DT8	DT9
En önemli faktörün (DT3) diğer faktörlere göre tercih oranı	7	8	7	1	9	6	5	6	6

Tablo 3. KPI Kriterleri ve Ağırlık Değerleri

Kriter	Açıklama	Ortalama Ağırlık	Sıra
DT1	Teslimat Süresi	0,1529	1
DT2	Operasyonel Maliyetler	0,1365	2
DT3	Kaynak Kullanım Verimliliği	0,1365	3
DT9	Envanter Yönetimi	0,1306	4
DT4	Enerji Tüketimi	0,1284	5
DT7	Tahmin Doğruluk Oranı	0,0900	6
DT8	Kalite Kontrol Doğruluğu	0,0781	7
DT6	Gerçek Zamanlı Takip Oranı	0,0753	8
DT5	Tedarik Zinciri Esnekliği	0,0713	9

3.1 | DT1-Teslimat Süresi – Ortalama Ağırlık: 0,152962

En yüksek ağırlığa sahip kriter olarak belirlenir. Tedarik zincirlerinin zamanında ve kesintisiz çalışması, müşteri memnuniyeti ve rekabet avantajı açısından kritik öneme sahiptir. Dijital ikiz teknolojisi, tüm lojistik ve üretim süreçlerinin dijital ortamda modellenmesini sağlayarak operasyonel darboğazların, gecikmelerin ve kaynak yetersizliklerinin önceden tespit edilmesine olanak tanır. Bu sayede, teslimat sürelerinde meydana gelebilecek aksamalar proaktif şekilde yönetilmekte, ürünlerin nihai tüketiciye zamanında ulaşması sağlanmaktadır. Ayrıca, gerçek zamanlı senaryo analizleri ve anomali tespiti gibi ileri analitik yetenekler sayesinde, rota optimizasyonu, kapasite planlaması ve talep dalgalanmalarına uyum gibi faktörler hızlıca ele alınabilmektedir. Bu bağlamda dijital ikizler, teslimat süreçlerini daha kısa, öngörülebilir ve sürdürülebilir bir yapıya dönüştürerek tedarik zincirinin çevikliğini ve etkinliğini artırmaktadır.

3.2 | DT2-Operasyonel Maliyetler – Ortalama Ağırlık: 0,136522

Dijital ikiz uygulamaları, operasyonel süreçlerin her aşamasının detaylı şekilde analiz edilmesine olanak tanıyarak, kaynak israfı, gereksiz üretim, plansız bakım ve verimsiz iş gücü kullanımı gibi maliyet unsurlarının azaltılmasına doğrudan katkı sunar. Sistem üzerinde oluşturulan dijital modeller aracılığıyla, alternatif üretim senaryoları test edilebilir ve en düşük maliyetle en yüksek verimlilik sağlayan konfigürasyonlar belirlenebilir. Bu teknoloji, aynı zamanda kestirimci bakım uygulamaları ve proses optimizasyonları ile plansız duruşları ve üretim kayıplarını minimize eder. Özellikle enerji, iş gücü ve hammadde gibi girdilerin doğru analiz edilmesiyle, üretim hatlarının sürdürülebilir maliyet yapısına ulaşması sağlanır. Dolayısıyla dijital ikizler, operasyonel harcamaları kontrol altına almak isteyen işletmeler için stratejik bir karar destek mekanizması haline gelmiştir. Bu sonuç literatürde de desteklenmektedir; örneğin Tao vd. (2019), dijital ikizlerin üretim maliyetlerinde %20'ye varan azalma sağlayabileceğini belirtmiştir.

3.3 | DT3-Kaynak Kullanım Verimliliği – Ortalama Ağırlık: 0,136519

Dijital ikiz teknolojileri, işletme içinde kullanılan fiziksel kaynakların (makine, enerji, malzeme ve insan gücü gibi) kullanım düzeylerini dijital ortamda detaylı biçimde analiz ederek verimlilik odaklı kararların alınmasına olanak tanır. Bu sistemler sayesinde kaynak kullanımındaki dengesizlikler ve verimsizlik noktaları görünür hale gelir, böylece minimum kaynakla

maksimum çıktı hedeflenebilir. Aynı zamanda, sürekli güncellenen veriler ile üretim süreçleri gerçek zamanlı optimize edilerek, kaynaklar ihtiyaca göre yeniden tahsis edilir. Bu, özellikle çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşır; çünkü israfın azaltılması, doğal kaynakların korunmasına ve karbon ayak izinin düşürülmesine katkı sağlar. Dijital ikiz uygulamaları ile elde edilen bu yüksek

seviyede kaynak verimliliği, işletmelerin hem ekonomik hem de çevresel hedeflerine ulaşmasını kolaylaştırır.

3.4 | DT9-Envanter Yönetimi – Ortalama Ağırlık: 0,130643

Stok seviyelerinin izlenmesi, yeniden sipariş noktalarının belirlenmesi ve talep dalgalanmalarına göre dinamik planlama yapılması, dijital ikizlerin sunduğu envanter yönetimi avantajlarındandır. Bu sayede hem fazla stok tutmanın maliyeti azaltılır hem de stok yetersizliği riski minimize edilir.

3.5 | DT4-Enerji Tüketimi – Ortalama Ağırlık: 0,128435

Enerji akışlarının dijital ortamda simülasyonu, enerji yoğun süreçlerin optimize edilmesine olanak tanır. Özellikle üretim ve lojistik süreçlerinde enerji verimliliği sağlayan karar destek sistemleri ile enerji maliyetleri düşürülür ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlanır.

3.6 | DT7-Tahmin Doğruluk Oranı – Ortalama Ağırlık: 0,090076

Makine öğrenmesi ve büyük veri analitiği ile entegre çalışan dijital ikizler, talep tahminleri ve bakım ihtiyacı gibi öngörülerini daha isabetli hale getirir. Bu doğruluk oranındaki artış, stratejik planlamalarda riski azaltır ve belirsizliklerle daha etkili başa çıkmayı mümkün kılar.

3.7 | DT8-Kalite Kontrol Doğruluğu– Ortalama Ağırlık: 0,078142

Dijital ikiz teknolojileri, üretim süreçlerinin sanal ortama taşınarak sürekli izlenmesini ve kontrol edilmesini mümkün kılmakta, bu da kalite yönetiminde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Sistemlerin gerçek zamanlı verilerle sürekli güncellenmesi sayesinde, üretim sırasında oluşabilecek kalite sapmaları önceden belirlenebilmekte ve süreçlere anında müdahale edilebilmektedir. Ayrıca, dijital ikizler; sensör verileri, üretim parametreleri ve makine performansı gibi çok sayıda değişkeni analiz ederek kaliteyi etkileyen risk unsurlarını öngörme kapasitesine sahiptir. Bu sayede hatalı üretim oranı azaltılmakta, yeniden işleme veya hurdaya çıkarma gibi maliyetli sonuçlar minimize edilmektedir. Bununla birlikte, bu kriterin görece olarak daha düşük bir ağırlığa sahip olması, karar vericilerin kalite kontrol üzerindeki etkisini önemli bulsalar da daha çok teslimat süresi ve maliyet gibi kısa vadeli performans alanlarını ön planda değerlendirdiklerini göstermektedir.

3.8 | DT6-Tedarik Zinciri Esnekliği – Ortalama Ağırlık: 0,071338

Dijital ikiz teknolojileri, tedarik zincirlerinde karşılaşılan belirsizlikler, tedarikçi kesintileri ve ani talep değişimleri gibi durumlara karşı alternatif senaryoların önceden oluşturulmasına olanak tanıyarak sistemin esnekliğini artırır. Bu sayede işletmeler, ani gelişmelere karşı hızlı ve etkili tepki verebilir. Ancak bu kriterin görece düşük ağırlık değeri, karar vericilerin dijital ikiz teknolojisinin kısa vadede ölçülebilir çıktılara sağladığı katkıları (örneğin maliyet ve teslimat süresi) daha öncelikli değerlendirdiklerini göstermektedir.

3.9 | DT5-Gerçek Zamanlı Takip Oranı – Ortalama Ağırlık: 0,075364

Tedarik zincirinin farklı noktalarında anlık izleme yapılması, sistem şeffaflığını artırır ve hızlı

müdahale imkânı sağlar. Bununla birlikte, karar vericiler bu kriteri diğerlerine göre daha az öncelikli görmüş olabilir. Gerçek zamanlı takip genellikle diğer performans göstergeleri üzerinde dolaylı etkiler oluşturur. Ancak literatürde (Ivanov, 2021), uzun vadeli dayanıklılığın ve krizlere karşı esnekliğin en az operasyonel verimlilik kadar önemli olduğu vurgulanmaktadır.

Bulgular, dijital ikiz teknolojisinin özellikle kısa vadeli ve ölçülebilir performans göstergelerinde (teslimat süresi, maliyetler, kaynak verimliliği) en yüksek etkiyi sağladığını ortaya koymaktadır. Buna karşın, uzun

vadeli stratejik göstergeler (esneklik, kalite, gerçek zamanlı takip) nispeten düşük ağırlıklarla değerlendirilmiştir.

Bu sonuç iki önemli çıkarımı beraberinde getirmektedir:

- İşletmeler, teknoloji yatırımlarını öncelikle somut ve hızlı geri dönüş sağlayan kriterlere odaklanmaktadır.
- Ancak sürdürülebilirlik, esneklik ve kalite gibi ikincil görülen kriterler, uzun vadede işletmelerin rekabet gücünü belirleyici hale gelecektir.

Dolayısıyla dijital ikiz teknolojisi yalnızca operasyonel verimlilik aracı olarak değil, aynı zamanda stratejik dirençlilik ve sürdürülebilirlik aracı olarak da değerlendirilmelidir.

4 | Tartışma

Çalışmada elde edilen bulgular, dijital ikizlerin en fazla teslimat sürelerinin kısaltılması, operasyonel maliyetlerin düşürülmesi ve kaynak kullanım verimliliğinin artırılması üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Bu durum, işletmelerin teknoloji yatırımlarında öncelikli olarak kısa vadede ölçülebilir sonuçlara odaklandığını ortaya koymaktadır. Ancak görece daha düşük ağırlıklara sahip olan tedarik zinciri esnekliği, kalite kontrol doğruluğu ve gerçek zamanlı takip gibi göstergeler, uzun vadede rekabet gücü ve sürdürülebilirlik açısından stratejik avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle dijital ikiz teknolojisinin yalnızca operasyonel verimlilik için değil, aynı zamanda dirençli ve çevik bir tedarik zinciri yapısı oluşturmak için de kritik bir araç olduğu söylenebilir.

Çalışma, literatüre dijital ikizlerin tedarik zinciri performansı üzerindeki etkilerini KPI temelli bir bakış açısıyla ortaya koyması ve çok kriterli karar verme yaklaşımıyla somut bir önceliklendirme sunması açısından katkı sağlamaktadır. Teslimat Süresi (DT1) kriterinin en yüksek ağırlığa sahip olması, Tao vd. (2019) ve Ivanov ve Dolgui (2020)'nin çalışmalarındaki bulgularla paralellik göstermektedir. Bu araştırmalarda da dijital ikizlerin tedarik zincirlerinde teslimat doğruluğunu ve çevikliği artırarak gecikmeleri azalttığı belirtilmiştir. Bizim çalışmamızda da dijital ikizlerin, süreç darboğazlarını önceden tespit etme ve rota optimizasyonu sağlaması yoluyla teslimat sürelerini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Operasyonel Maliyetler (DT2) açısından elde edilen sonuçlar, Lu vd. (2020) ve Leng vd. (2021)'in bulgularını desteklemektedir. Bu yazarlar dijital ikiz destekli süreçlerin plansız duruşları azalttığını ve üretim hatlarının maliyet verimliliğini artırdığını ortaya koymuştur. Çalışmamızda da dijital ikiz uygulamalarının süreçlerin daha öngörülebilir hale gelmesini sağlayarak operasyonel maliyetlerde düşüş yarattığı doğrulanmıştır. Kaynak Kullanım Verimliliği (DT3) bulgusu ise Liu vd. (2021) ve Marmolejo-Saucedo (2020)'nin sonuçlarıyla tutarlıdır. Söz konusu çalışmalarda dijital ikiz teknolojilerinin enerji, hammadde ve iş gücü kullanımında optimizasyon sağladığı belirtilmiştir. Bu çalışmada da dijital ikiz uygulamalarının verimlilik artışına doğrudan katkı sağladığı nicel olarak kanıtlanmıştır. Enerji Tüketimi (DT4)

kriterinde elde edilen bulgular, Verdouw vd. (2021)'in tarım ve üretim sistemleri üzerine yaptığı araştırmayla benzerlik göstermektedir. Her iki çalışmada da dijital ikizlerin enerji akışlarını dijital ortamda simüle ederek gereksiz enerji kullanımını azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Envanter Yönetimi (DT9) bulguları, Busse vd. (2021) ve Klappich (2019)'un tedarik zincirinde görünürlük ve stok optimizasyonuna ilişkin vurgularını desteklemektedir. Bu çalışmalar gibi, mevcut araştırmamız da dijital

ikizlerin stok seviyelerini gerçek zamanlı olarak izleyebilme kabiliyeti sayesinde envanter fazlalığı ve eksikliğini minimize ettiğini göstermiştir.

Ayrıca, düşük ağırlık değerine sahip kriterler olan tedarik zinciri esnekliği, kalite kontrol doğruluğu ve gerçek zamanlı takip oranı da literatürdeki uzun vadeli performans boyutlarıyla ilişkilendirilmiştir. Ivanov (2021) ve Shrivastava vd. (2025), dijital ikizlerin kriz yönetimi ve dayanıklılık konularında kritik rol oynadığını belirtmiş, ancak kısa vadede ölçülebilir sonuçların genellikle teslimat süresi ve maliyet gibi kriterlerde görüldüğünü ifade etmiştir. Bizim çalışmamızda da benzer şekilde kısa vadeli performans göstergeleri daha yüksek öncelik kazanmıştır. Bu durum, dijital ikizlerin işletme stratejilerinde kısa vadeli kazanımlar için öncelikle kullanıldığını, ancak uzun vadede sürdürülebilirlik ve dirençlilik açısından daha geniş etki potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Uygulama sonuçları, karar vericilere hangi performans alanlarının dijital ikiz yatırımlarından daha fazla fayda sağlayacağını göstermekte ve teknoloji planlamalarında yol gösterici olmaktadır. Bununla birlikte araştırma, sınırlı sayıda uzman görüşüne dayanmakta olup, daha geniş örneklemelerle yapılacak çalışmaların bulguları genelleştirilebilirliği artıracaktır. Ayrıca ileride yapılacak araştırmalarda çevresel ve sosyal göstergelerin de analize dâhil edilmesi ve farklı karar verme yöntemleriyle karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılması önerilmektedir.

5 | Sonuç

Bu çalışma, dijital ikiz teknolojisinin tedarik zinciri yönetiminde yarattığı avantajları Temel Performans Göstergeleri (KPI) üzerinden sistematik biçimde incelemeyi amaçlamıştır. Günümüzde tedarik zincirleri; küreselleşme, talep dalgalanmaları, çevresel baskılar ve dijital dönüşüm süreçleri nedeniyle karmaşık bir yapıya bürünmüştür. Bu bağlamda dijital ikiz teknolojisi, fiziksel süreçlerin sanal ortama yansıtılması yoluyla işletmelere süreçleri izleme, analiz etme ve iyileştirme olanağı sunan yenilikçi bir araç olarak öne çıkmaktadır. Ancak literatürde dijital ikizlerin performans göstergeleri üzerindeki etkilerini ölçen, özellikle de bu göstergeleri önem derecelerine göre sıralayan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmüştür.

Bu boşluktan hareketle, araştırmada dijital ikizlerin tedarik zinciri performansına katkı sağlayan temel kriterler belirlenmiş ve bunlar Best-Worst Method (BWM) kullanılarak analiz edilmiştir. BWM'nin seçilme nedeni, sınırlı sayıda uzman görüşüyle dahi tutarlı sonuçlar üretebilmesi ve kriter ağırlıklarını sistematik biçimde hesaplayabilmesidir. Çalışma kapsamında uzman görüşünden yararlanılarak, dokuz farklı KPI kriteri (teslimat süresi, operasyonel maliyet, enerji tüketimi, kaynak kullanım verimliliği, esneklik, tahmin doğruluğu, kalite kontrol, gerçek zamanlı takip ve envanter yönetimi) değerlendirilmiştir.

Analiz sonucunda, dijital ikiz teknolojisinin özellikle operasyonel ve kaynak verimliliği odaklı alanlarda belirgin katkı sunduğu görülmüştür. Bu bulgu, dijital ikizlerin işletmeler açısından yalnızca bir teknoloji yatırımı değil, aynı zamanda maliyet azaltımı, süreç optimizasyonu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından stratejik bir araç olduğunu göstermektedir. Buna karşılık,

esneklik ve kalite kontrol gibi daha uzun vadeli stratejik göstergelerde etkilerin daha sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, dijital ikiz uygulamalarının kısa vadede ölçülebilir performans kazanımlarıyla ilişkilendirildiğini, ancak sürdürülebilir rekabet avantajı açısından daha bütüncül bir değerlendirmeye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Bu araştırmanın en önemli katkısı, dijital ikiz teknolojisinin tedarik zincirindeki performans etkilerini KPI tabanlı bir model üzerinden nicel biçimde önceliklendirmesidir. Böylece hem akademik literatürdeki

kavramsal yaklaşımların ötesine geçilmiş hem de uygulayıcılara karar verme süreçlerinde yol gösterici olacak pratik bir çerçeve sunulmuştur. Ayrıca çalışma, dijital ikiz teknolojisinin enerji verimliliği ve kaynak kullanımı gibi sürdürülebilirlik göstergeleriyle doğrudan ilişkilendirilebileceğini ortaya koyarak, bu teknolojinin çevresel performans hedeflerine katkı sağlayabileceğini göstermiştir.

Araştırmanın temel sınırlılığı, uzman sayısının beş kişiyle sınırlı olmasıdır. Ancak BWM yönteminin küçük örneklemelerle güvenilir şekilde uygulanabilmesi, bu sınırlılığın geçerliliği önemli ölçüde azaltmaktadır. Gelecek araştırmalarda, farklı endüstrilerden daha geniş uzman gruplarıyla veya farklı Çok Kriterli Karar Verme yöntemleriyle karşılaştırmalı analizler yapılabilir. Ayrıca, dijital ikizlerin sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik boyutlarına etkisini inceleyen çok boyutlu modellerin geliştirilmesi literatüre yeni bir katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma dijital ikiz teknolojisinin tedarik zinciri performansına yönelik etkilerini ölçülebilir bir çerçevede ele alarak hem kuramsal hem de uygulamalı bir katkı sunmuştur. Bulgular, dijital ikizlerin yalnızca operasyonel verimliliği artıran bir araç değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve çevik tedarik zincirleri oluşturmak için stratejik bir unsur olduğunu göstermektedir.

Kaynakça

- Aşan, H., ve Ayçin, E. (2020). Kurumsal kaynak planlama sistemlerinin seçimindeki kriterlerin best-worst metodu ile değerlendirilmesi. *Akademik İzdüşüm Dergisi*, 5(2), 114-124.
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., ve Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, 7, 167653-167670.
- Baysal, H. Ö. Z. Endüstri 5.0'da Dijital İkiz ve Denetim. *Sanayi Yönetiminde Gelecek Yaklaşımları Dijitalleşme Yetenekler*, 223.
- Boschert, S., ve Rosen, R. (2016). Digital twin—the simulation aspect. In *Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers* (pp. 59-74). Cham: Springer International Publishing.
- Brockett, A., ve Rezaee, Z. (2012). *Corporate sustainability: Integrating performance and reporting*. John Wiley ve Sons.
- Daneshvar Kakhki, M., ve Gargeya, V. B. (2019). Information systems for supply chain management: a systematic literature analysis. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 5318-5339.
- Deng, J., Zhou, F., Hou, W., Silver, Z., Wong, C. Y., Chang, O., ... ve Zuo, Q. K. (2021). The prevalence of depression, anxiety, and sleep disturbances in COVID-19 patients: a meta-analysis. *Annals of the new York Academy of Sciences*, 1486(1), 90-111.
- Dipura, S., ve Soediantono, D. (2022). Benefits of key performance indicators (KPI) and proposed applications in the defense industry: a literature review. *International Journal of Social and Management Studies*, 3(4), 23-33.
- Freese, F., ve Ludwig, A. (2025). A conceptual framework for supply chain digital twins—development and evaluation. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 28(6), 676-698.
- Grieves, M. W. (2019). *Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins*.
- Grieves, M., ve Vickers, J. (2016). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches* (pp. 85-113). Cham: Springer International Publishing.
- Grieves, M., ve Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, ve A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85-113). Springer. <https://bestworstmethod.com/>

- Ivanov, D., ve Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International journal of production research*, 58(10), 2904-2915.
- Ivanov, D., Blackhurst, J., ve Das, A. (2021). Supply chain resilience and its interplay with digital technologies: Making innovations work in emergency situations. *International journal of physical distribution ve logistics management*, 51(2), 97-103.
- Karşıyaka, O., Sütçü, A. (2019). Mobilya Üretim Süreçlerinde Verimliliği Artırmaya Yönelik 5S Uygulamaları. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 3(2), 87-101.
- Kayan, R. R., Jauhar, S. K., Kamble, S. S., ve Belhadi, A. (2025). Optimizing bio-hydrogen production from agri-waste: A digital twin approach for sustainable supply chain management and carbon neutrality. *Computers ve Industrial Engineering*, 204, 111021.
- Klappich, D. (2019). Hype cycle for supply chain execution technologies. Available at: [gartner.COM/en/documents/3947306/hype-cycle-for-supply-chain-execution-technologies-2019](https://www.gartner.com/en/documents/3947306/hype-cycle-for-supply-chain-execution-technologies-2019).
- Koca, G., ve Akçakaya, E. D. U. (2021). Giyilebilir teknolojik ürünlerin tasarımında etkili olan faktörlerin best- worst metodu (BWM) ile değerlendirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 136-150.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., ve Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
- Leng, J., Liu, Q., Ye, S., ve Zhang, H. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 278-292.
- Liu, C., Gu, R., Yang, J., Luo, L., Chen, M., Xiong, Y., ... ve Sun, Q. (2024). A Self-Powered Dual Ratchet Angl Sensing System for Digital Twins and Smart Healthcare. *Advanced Functional Materials*, 34(42), 2405104.
- Liu, Y., Zhang, L., Yang, Y., Zhou, L., Ren, L., ve Wang, F. Y. (2021). A digital twin-based approach for smart manufacturing: A case study of intelligent CNC machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 84-94.
- Lu, Y., Liu, C., Kevin, I., Wang, K., Huang, H., ve Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 61, 101837.
- Marmolejo-Saucedo, J. A. (2020). Design and development of digital twins: A case study in supply chains. *Mobile Networks and Applications*, 25(6), 2141-2160.
- Öktem, B. (2019). Sürdürülebilirlik Raporlamasında Ölçüm Parametreleri KPI'lar (Temel Performans Göstergeleri): Bankacılık Sektöründe Analiz. *Finansal Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi*, 11(21), 247-263.
- Pujawan, I. N., ve Bah, A. U. (2021). Supply chains under COVID-19 disruptions: Literature review and research agenda. *Supply Chain*. In *Forum Int. J.*
- Qi, Q., ve Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 6, 3585-3593.
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
- Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130.
- Shengli, W. (2021). Is human digital twin possible?. *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*, 1, 100014.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., ve Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415.
- Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., ve Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 189, 103046.