

DİJİTAL İKİZ: AKILLI FABRİKALARA GİDEN YOL

Mehmet Erdal ÖZBEK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Çiğli Ana Yerleşkesi, 35620, Çiğli, İzmir, Türkiye

merdal.ozbek@ikcu.edu.tr

Özet: Endüstriyel devrimin yeni bir aşaması olan Endüstri 4.0, gelişmiş bulunan bilgi teknolojilerinin de katkısı ve uygulanabilirliği sayesinde daha da önem kazanmıştır. Bu yeni aşamanın hedeflerinden birini oluşturan akıllı üretim, üretimin gereksinim ve şartlarına hızlı bir şekilde uyum sağlayabilen teknolojilerin birleşimi olarak görülmektedir. Akıllı fabrika terimi de akıllı üretimi sağlayan makinelerin birbirleriyle etkileşimini ve iletişimini ifade etmek üzere kullanılmaktadır. Akıllı algılayıcılar ve nesnelerin interneti teknolojisinin de yaygınlaşması ile gerçek ortamdaki üretim modeli daha kolay bir şekilde sanal ortama taşınmaktadır. Dijital ikiz, fiziksel ortam ile sanal ortam bağlantısını kurarak dijitalleşme yolundaki ilerlemenin temel taşlarından birisini oluşturmaktadır. Bu çalışmada dijital ikiz kavramı ve akıllı fabrikalar oluşturulmasındaki katkısı ele alınmıştır. Model-fabrika üzerinde oluşturulan dijital ikiz çalışmaları sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Dijital ikiz, akıllı fabrika, model-fabrika, nesnelerin interneti

1. GİRİŞ

Endüstri 4.0 olarak adlandırılan içinde bulunduğumuz endüstri ilerleme aşaması akıllı üretim sistemlerinin öne çıkmasına dayanmaktadır. Bunun temelinde bilgi teknolojilerindeki son gelişmeler ve bu teknolojilerin pratikte uygulanmasındaki yaygınlaşma gösterilebilir [1, 2]. Akıllı üretim denilince, müşterilerin ihtiyaçlarına ve bu ihtiyaçları karşılamak üzere kurulmuş pazarlara göre üretilen ürünlerin, gerek üretim gerekse dağıtım olmak üzere ürünü ilgilendiren her aşamasında bilgi teknolojilerinden en iyi şekilde yararlanılması anlaşılmaktadır. Bu yarar, ürün üretimine yönelik tedarik aşamasından başlayarak ürünün pazarlanması, satışı ve sonrasındaki süreçlere kadar geniş bir çerçevede ele alınabilmektedir. Üretim aşamasında kullanılan teknolojilerin bir araya getirilerek uyumlu ve fayda sağlayıcı

şekilde düzenlenmiş olması, hâlihazırda kullanılan otomasyon sistemlerinin insan gereksinimini olabildiğince azaltarak kendi kendilerine çalışabilir duruma getirilmesi, akıllı üretimin temelini oluşturmaktadır.

Günümüzde akıllı üretim kavramı yaygınlaşmakta ve gelişmektedir, ancak henüz tam olarak olgunlaşmamıştır. Akıllı fabrikaların kurulması ya da var olan geleneksel fabrikaların daha akıllı hale getirilmesi için bazı tasarım esasları önerilmiştir [3]. Bir fabrikayı oluşturan sistemlerin ve elemanlarının modüler olması, yani işlem birimlerinin kolayca ayrılıp birleşebilmeleri bu esaslardan ilki olarak ifade edilebilir. Birimlerin birlikte çalışabilmeleri ama kendi başlarına da merkeziyetsiz şekilde karar alabilmeleri de akıllı yönetim için önemli bir faktördür. Fiziksel işlemleri izleme ya da bilgisayarda benzetimini gerçekleştirmek amacıyla sanal (dijital) ortama

aktarılabilmeleri, ürünün yanında ürün öncesi ve sonrası servis süreçlerini de içerebilmeleri ve değişikliklere gerçek zamanda yanıt verebilmeleri dijital dönüşümün uygulanması ile mümkün olmaktadır. Endüstri 4.0'ın gerçekleştirilmesi ve fabrikanın yeniden organize olmasının sağlanması için sürmekte olan ürün yaşam döngüsünün dijitalleşme sayesinde oluşan büyük veri kullanılarak yeniden ele alınması ve iyileştirmeler yapılması da önerilmektedir [4]. Bu amaçla örneğin üretim hatları ve tedarik zinciri ile bütünleşmiş sürekli ve anlık iletişimin sağlanması, bilgisayar benzetim ve veri işleme araçlarının kullanılması, kaynak ve enerji gereksinimlerinin karşılanabilir olması için iletişim ağlarının kullanılması gibi birçok katmanda oluşan darboğazların belirlenmesi beklenmektedir [5].

Günümüzde akıllı fabrika ve benzeri sistemleri oluşturabilmek için daha çok üretim aracı, süreci ya da işleminin dijital ikizi bulunmaktadır. Dijital ikiz kavramı ilk olarak fiziksel bir ürünün sanal ya da dijital birebir kopyasını oluşturmak için önerilmiştir [6]. Dijital ikiz modeli gerçek ortam, sanal ortam ve bu iki ortamı birleştiren veri/bilgi akışı mekanizmasından oluşan üçlü bir yapının bir araya gelmesi olarak tanımlanmıştır. Sonrasında ise ürünün yanı sıra tüm üretim faaliyetlerini içeren daha genel bir kavram olarak farklı tanımlamalar ve nitelermeler yapılarak yaygınlaşmıştır [7]. Üretim aşamasında gerçek zamanlı uzaktan izleme ve kontrol sağlayan bu sistem ile planlı, daha verimli ve güvenli üretim sağlanabilmektedir. Üretimde ortaya çıkabilecek sorunların önlenmesi için önleyici bakım ve planlama yapılması, çeşitli senaryo ve risklerin değerlendirilmesi, daha iyi takım içi ve dışı işbirliğinin sağlanması, daha etkili ve bilgili karar destek sistemlerinin kurulması, ürünlerin ve servislerin kişiselleştirilebilmesi, daha iyi raporlama

ve iletişim ihtiyaçlarının karşılanması gibi birçok katma değer sağlanmaktadır [8].

Dijital ikiz sayesinde bir fabrikanın, ürünün ya da üretim hattının sanal ortamda denenmesi, zaman ve maliyet tasarrufu sağlarken riskleri de kayda değer oranda azaltmaktadır. Esasen dijital ikizin kullanılmasındaki amaç, üretimi, üretim süreçlerinde kaliteyi yükselterek maliyetleri azaltmak için geleneksel yöntemlerde mümkün olmayan şekilde verimli, dinamik ve akıllı şekilde gerçekleştirmektir [9]. Bu nedenle de işletmelerin gerçek zamanlı verileri elde etmesi ve onlardan gerekli sonuçlar çıkartarak kullanması üretimde önemli bir avantaj getirmektedir. Bunun sağlanması için de siber-fiziksel dünya olarak adlandırılan fiziksel ve sanal dünya birleştirilmesinin eş zamanlı ve tutarlı olması gerekmektedir. Ancak işletmelere bakıldığında temel süreç verileri genellikle yanlış ve eksiktir, tutarlı ve gerçek zamanlı değildir [10].

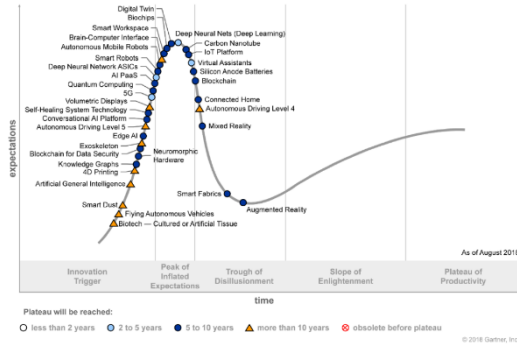
Bu nedenlerle farklı katmanlardaki verinin bütünleştirilmesi ve karmaşık işlemlerin modellenmesi çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Akıllı algılayıcılar ve nesnelerin interneti (IoT) teknolojisinin de yaygınlaşması ile gerçek ortamdaki üretim modeli daha kolay bir şekilde sanal ortama taşınmaktadır. Gerek bilgisayar ağları kullanılarak gerekse 5. nesil (5G) öncesi ve sonrası mobil iletişim araçları kullanılarak dijital ortamdaki veriler sınır bilişim ile hesaplanmakta, bulut sistemleri aracılığı ile aktarılmakta ya da saklanabilmektedir [11]. Yine de verilerin doğru ve tutarlı bir şekilde elde edilmediği durumlarda dijital ikizin kullanılması doğru sonuçlar doğurmayabilir. Bu nedenle uygulamada dijital ikiz sonuçlarını görmek halen oldukça kısıtlıdır. Yapılan çalışmaların çoğunda kavramsal öneriler ve derlemeler bulunmaktadır. Yerli kaynaklarda dijital ikizle ilgili çalışmalar bulunsa da halen

önemli bir boşluk bulunmaktadır [10,12,13,14].

Bu çalışmada akıllı fabrika modeli için dijital ikizin faydalarını kullanacak bir ara aşama önerisi sunulmaktadır. Dijital ikiz oluşumunda kullanılan anahtar teknolojiler ve standartlaşma çalışmaları hakkında bilgi verilmektedir.

2. DİJİTAL İKİZ

Gartner 2010 yılından beri her yıl, teknolojilerin kavramsal olarak ilk ortaya çıkışından, ürüne dönüşebilme aşamasına kadar beklentilerinin gösterildiği gelişen teknoloji eğilimleri yayınlamaktadır. Dijital ikiz, 2018 yılındaki eğilime göre Şekil 1'de gösterildiği gibi beklenti eğrisinin tepe noktasında bulunmakta ve o tarihten sonraki 5-10 yıl içerisinde üretim düzlüğüne erişmesi beklenmekteydi [15]. Bu öngörünün gerçekleşmesi yolunda yapılan çalışmalarda etkin bir dijital ikiz modelin birçok dijital ikiz modelleme yöntemlerinden oluşması gerektiği ifade edilmiştir. Bunlar, modellerin ayrı ayrı çalışacak şekilde oluşturulması, bir araya getirilebilmesi ve modellerin bir karışımının oluşturulması, modellerin istenildiği şekilde çalıştığı doğrulanması, modelde gerekebilecek değişiklik ya da düzeltmelerin yapılması ve bir bütün olarak modelin yönetimi olarak adlandırılmıştır [16].



Şekil 1. Gartner gelişmekte olan teknolojiler yanıltıcı beklentiler eğrisi [15]

Benzer oluşumlar modelleme amaçlı kullanılan otomasyona geçiş modelleri, bilgisayara aktarım ve kontrol yapıları olarak bilinen bilgisayar destekli tasarım ya da üretim (CAD/CAM) gibi yazılımlarda da gözlenebilir. Ancak dijital ikizin avantajı, bu dijital modellerin yaratılmasından farklı olarak gözlem altındaki gerçek sistemi tanımlaması ve aynı zamanda o sistemin zamanla değişimini de güncellemesidir [7]. Bu değişim ve güncelleme sadece benzetim ortamında da kalmamaktadır. Çünkü sadece benzetim aracılığı ile yapılan güncelleme üretim sistemlerinin birbirleriyle ve çevreleriyle etkileşiminde beklenmedik davranışlar göstermesine neden olabilmektedir. Dijital ikiz ise, ikiz kelimesinin taşıdığı anlama atıfla, gerçek fiziksel sistemin bire bir benzerini yaratarak, siber sistemin fiziksel sistemi de etkileyecek şekilde veri/bilgi akışını iki yönlü olarak gerçekleştirilebilmektedir.

Dijital ikizi oluşturan bu üçlü yapıda, siber ile fiziksel sistemi birleştiren bilgi akışı sürekli akan ve değişen veriler aracılığı ile sağlanmaktadır. Bu nedenle veriye dayalı benzetim modelleri dijital ikizin avantajını ortaya çıkarmaktadır [17]. Bu modellerin kullandığı veriler, algılayıcılar aracılığı ile elde edilmekte, bilgisayar platformları üzerinden de nesnelere internetinin merkezde yer aldığı bilgi ve haberleşme teknolojileri kullanılarak üretim endüstrisinin

ihtiyaçlarına göre akıllı üretim gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır [18]. Dijital ikizi oluşturan ana bileşenler şu şekilde sayılabilmektedir: Farklı işlemlerden veri alabilmeyi sağlayan nesnelerin interneti, özellikle endüstriyel nesnelerin interneti (IIoT) çözümleri; fiziksel kaynakların hesaplandığı, kontrol edildiği ve iletildiği siber-fiziksel sistemler; hesaplamalar için bulut ve uç hesaplama çözümleri; makine öğrenmesinin kullanıldığı büyük veri ve yapay zekâ çözümleri [19]. Nesnelerin internetinin zamanla evrilmesi ve ilgili teknolojilerinin kullanılması ile ilgili aşamalardan bazıları Tablo 1’de özetlenmiştir [20].

Tablo 1. Nesnelerin interneti ve ilişkili teknolojiler [20]

Özellikler	Faz 1 (2016-2018)	Faz 2 (2019-2020)	Faz 3 (2021-2025)
Bağlantı	Kablolu, 3G/4G	Kablolu, 3G/4G	Kablolu, 3G/4G, 5G
Uç cihazlar	Akıllı algılayıcılar	Akıllı algılayıcılar, siber-fiziksel sistemler	Akıllı algılayıcılar, akıllı kameralar, siber-fiziksel sistemler
Yapay zekâ	Destek yok	Destek yok	Evet
Özerklik	Düşük	Orta	Yüksek
İşlem gücü	Düşük	Orta	Yüksek
Güvenilirlik	Yok	Arttırılmış	Zorunlu
Dijital ikiz	Durum bildiren nesnelerin interneti, benzetimler	Ortama özgü, çalışabilir ortamlar için nesnelerin interneti ve benzetimleri	Kendi kendisine çalışabilen, işbirlikçi, ortamlararası nesnelerin interneti

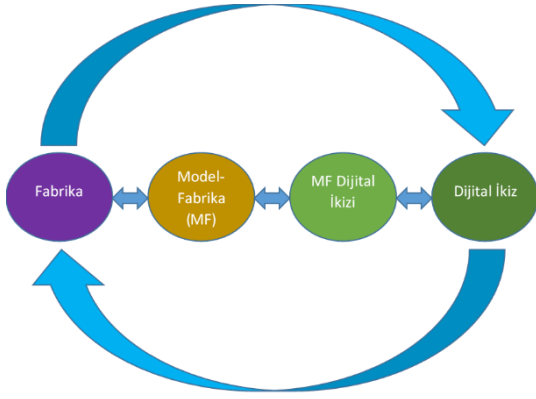
Bu bileşenler ortak bir yapıda bir araya gelerek basit bir üretim aracının işleyişinden, bütün üretim, tedarik, pazarlama, satış, ürün sonrası hizmetleri de içerecek şekilde kapsayıcı duruma getirilebilmektedir. Bu haliyle de dijital ikiz akıllı fabrikalar için olmazsa olmaz bir yapı taşı durumuna gelmiştir.

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Gerçek bir üretim sisteminin dijital ikizinin gerçekleştirilmesi görüldüğü üzere birçok farklı bileşen ve modelleme aşamaları içermektedir. Modelleme aşaması tamamlanan bir akıllı fabrikanın, modelinin gerçeğe dönüştürülmesinde birçok problemin tanımlanması ve çözülmesi gerekmektedir. Öncelikle gerçek bir fabrikada verilerin elde edilmesi kolay değildir ve çalışılan fiziksel ortam birçok zorluklar getirmektedir. Ortamın tozlu, yağlı, sıcak, nemli, karanlık, dar olması gibi fiziksel kısıtlamalar bulunmaktadır. Ek olarak dijitalleşmeyi sağlayacak veri algılayıcıların konumları, aralarındaki iletişim, ortamın hem algılayıcı yerleşimi hem de iletişimi için uygunluğu, vb. birçok etmen göz önüne alınmalıdır. Fabrika ortamından elde edilecek verilerin üretim aşamalarında değerlendirilmesinden önce, üretim aşamalarının belirlenmesi ve hangi üretim aşamasından ne tip veriler alınmasının uygun olduğunun ortaya konulması da gerekmektedir. Bunun yanı sıra, veri alınırken ortaya çıkan algılayıcı, iletişim teknolojisi seçimleri ve her bir seçimin ortaya çıkardığı avantaj ve dezavantajların belirlenmesi kritik önem taşımaktadır.

Bu ve benzeri sorunların hepsini olmasa da bir bölümünün çözümü için gerçek bir üretim sisteminden elde edilebilecek verilerin ve süreçlerin izlenebildiği ölçeklenebilir bir transfer laboratuvarının kurulması önerilmektedir. Bir işletme üretim sahasından alınan verilerin öncelikle ölçeklenebilir bir akıllı fabrika modeli üzerinde gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Daha sonra bu model-fabrika üzerinde belirlenecek üretim sisteminin ve sistemi oluşturan elemanların her birinin dijital ikiz

modellerinin oluşturulmasının, model-fabrika aracılığıyla hem sanal hem de gerçek ortamdaki sorunların eşgüdümle belirlenmesinin çözüm odaklı olacağı kanısındayız. Üretim aşamalarının modelinin oluşturulması ve gerçek fabrikanın dijital ikizi oluşturulmadan önce bu modelde gerekli incelemeler, değerlendirmeler ve gerekirse düzeltmelerin yapılması akıllı fabrikaya giden yolda önemli bir adım olacaktır. Şekil 2’de akıllı fabrika yapısına ulaşmak için öngörülen model-fabrika yapısı gösterilmektedir.

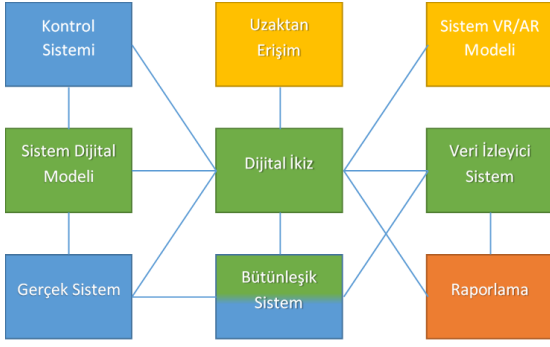


Şekil 2. Akıllı fabrika için model-fabrika dijital ikiz modeli

Bunu sağlamak için öncelikle gerçek fabrikadan alınacak bilgiler ve veriler ışığında model-fabrikanın oluşturulması gelmektedir. Ürün, işlem ya da süreç bazında bir fabrikanın tek seferde oluşturulması çok zor olan dijital ikizi yerine, öncelikle seçilecek birimlerin modellerinin dijital ikizi oluşturularak ayrı ayrı model ve dijital ikizler elde edebilmek mümkün olacaktır. Ortam zorlukları nedeniyle gerçek fabrikadan alınması gerekli veriler laboratuvar ortamında kurulan model-fabrika üzerinden kolaylıkla alınabilecektir. Böylelikle model-fabrikanın dijital ikizinin kurulması ve kontrol edilmesi gerçek fabrikaya göre çok daha kolay ve uygun olacaktır. Daha sonra

model-fabrikadaki elemanların ve süreçlerin her birisi için dijital ikizleri yaratılabilecektir. Buradan da bütün model-fabrika dijital ikizlerinden gerçek fabrikanın dijital ikizine ulaşılabilecektir. Bu işlemler de adım adım, birim birim gerçekleştirilebileceğinden dijital ikizin önceden bahsedilen modüler olma özelliği kullanılabilir, belirli dijital ikizler diğerleri için kolaylaştırıcı örnekler olarak da kullanılabilir.

Önerdiğimiz yapıdaki temel bileşenler Şekil 3’te gösterilmektedir. Gerçek sistemden oluşturulacak bir dijital modeli, işlemlerin yönetimini sağlayacak kontrol sistemi ile bağlantılı olarak bir dijital ikiz yazılımı oluşturmaktadır. Bu sayede gerçek sistem ile dijital ikizin birlikte olduğu bütünleşik adımı verdiğimiz siber-fiziksel sistem elde edilebilmektedir. Dijital ikizin veri izleyici sistemi bütünleşik sistemden aldığı verileri değerlendirmekte ve istenilen anahtar performans göstergeleri (KPI) takibi için çıktıları oluşturmak üzere raporlama birimine iletmektedir. Şu aşamada Şekil 3’te farklı renkte gösterilen, sistemimizde henüz bulunmayan ancak yakın zamanda eklemek istediğimiz iki bileşenden biri, üretimde nesnelere interneti teknolojilerini kullanarak dijital ikize uzaktan erişim sağlamak olacaktır [21]. Bir diğer hedef ise sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) bileşenleri [22] ile dijital ikizin kullanıcı-dostu arayüz tasarımları ile daha kolay ve etkili kullanılmasını sağlamak olacaktır.



Şekil 3. Dijital ikiz bileşenleri

Görüldüğü üzere dijital ikizin oluşturulmasında birçok anahtar teknoloji yer almakta ve gerçek fabrikanın dijitalleşmesinde aşılması gereken zorluklar bulunmaktadır [23]. Bu zorlukların belki de başında dijital ikizin bir yazılım olması nedeniyle kullanılacak yazılım çözümü gelmektedir. Örneğin, Microsoft Azure gibi ticari yazılımların yanı sıra Eclipse Ditto gibi açık kaynak yazılım çözümleri de bulunmaktadır [24]. Bu çözümler dijital ikizin üç temel aşamasına ek olarak fabrikanın fiziksel durumuna ait geliştirilmiş sanal modellerinin ve iyileştirilmelerin yapılabilmesine yol açacak öğrenme ve uyarılma aşamasında dördüncü bir aşama olarak kullanılmaktadır [25]. Bu aşama gerçek şartların oluşturduğu verilerin yapay zekâ teknikleri kullanılarak değerlendirilmesi ve gerçek zamanlı önerilerde bulunulmasına zemin oluşturmaktadır. Örneğin Avrupa Birliği 2021'de endüstriyel tasarım ve üretimde internet ve yapay zekâ çağı olarak beşinci endüstriyel devrimini (Endüstri 5.0) önermiştir [26]. Bu alandaki çalışmaların düzenlenmesi amacıyla da bütün dünyada standartlaşma çalışmaları ISO 23247 standardı [27] olarak dört kısımdan oluşacak şekilde yayınlanmıştır. Üretimde dijital ikiz oluşturmak için genel prensipler ve gereksinimler, işlevsel bakış açısıyla verilen bir referans mimari, gözlenebilir üretim elemanları için temel

bilgi özellikleri listesi ve referans mimari içindeki birimlerin karşılıklı bilgi aktarımı için teknik gereksinimler verilmiştir. Yapılacak çalışmaların bu standardı göz önüne alması ile ortam tabanlı referans modeline dayalı standart dijital ikizler oluşturulabilecektir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada akıllı fabrika dijitalleşmesine yönelik çalışmaların temelini oluşturan dijital ikiz kavramı ve kavramı oluşturan elemanların bütünü oluşturmaya yönelik çalışmalar ele alınmıştır. Üretimin gerçekleştiği gerçek bir fabrikada dijital ikizin yaratılmasındaki zorluk göz önüne alınarak model-fabrika aracılığı ile dijital ikizin yaratılması önerilmektedir. Bu sayede hem üretim birimlerinin ayrı ayrı dijital ikizlerinin oluşturulması mümkün olacak hem de bu dijital ikizler birlikte uygun bir şekilde birleştirilerek bütünleşik sistemin oluşturulması sağlanacaktır.

Dijital ikizin temel olarak bir yazılım olduğu ortadadır. Ancak bu yazılımın gerçek sistemler ile birlikte çalıştırılmasına, her bir çalışan birim ya da işlem için de dijital ikizinin oluşturulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Gerçek sistemlerden elde edilebilecek veriler, akıllı algılayıcıların nesnelerin interneti teknolojilerini kullanması ile konumdan bağımsız olarak değerlendirilebilecek ve üretimle ilgili tüm süreçler yönetilebilecektir. Üretimi sağlayan makinelerle özgü dijital ikizler de yaratıldıkça, üretim süreçlerinin tümünü kapsayacak dijital ikizler de bunu izleyecektir. Zamanla üretim elemanları ve süreçleri için ortak kullanıma açık, standartlaşmış dijital ikizlerin oluşması da mümkün görünmektedir. Bu konudaki

ticari yazılımların artmasına ek olarak, açık kaynak kodlu yazılımların kullanılmasının yaygınlaşmasının da bu yöndeki çalışmalara hız kazandıracığı düşünülmektedir. Ancak üretime ya da fabrikaya özgü, farklı süreçleri kullanan fabrikaların, özgün çözümler geliştirmesi gerekmektedir. Bu nedenle de fabrikalarının kendi model-fabrikalarını oluşturmalarının artık geriye dönüşü mümkün olmayacak dijital ikize geçiş aşamasında faydalı olacağı kanısındayız. Bunun için burada özetlenen çalışmalarımız sürdürülmektedir.

Bütün bunlara ve gelişmekte olan diğer teknolojilere de dayanılarak, dijital ikiz oluşturma işlemlerinin uzun soluklu ve çok sayıdaki teknolojinin bir arada bulunması gereken bir süreç olduğu görülmektedir. Ancak akıllı fabrikalara giden yolun da dijital ikizden geçmekte olduğu artık kesinleşmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Akıllı Fabrika Sistemleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (AFSUAM) kapsamında yürütülen çalışmalar ışığında hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

[1] P. Osterrieder, L. Budde, T. Friedli, "The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review", *International Journal of Production Economics*, 221, 107476, March 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.08.011>

[2] L. Li, B. Lei, C. Mao, "Digital twin in smart manufacturing", *Journal of Industrial Information Integration*, 26, 100289, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100289>

[3] M. M. Mabkhot, A. M. Al-Ahmari, B. Salah, H. Alkhalefah, "Requirements of the smart factory system: A survey and perspective", *Machines*, 6(2), 23, 2018. <https://doi.org/10.3390/machines6020023>

[4] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, F. Sui, "Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, pp. 3563-3576, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>

[5] Q. Qi, F. Tao, "Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison", *IEEE Access*, 6, pp. 3585-93, 2018. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2793265>

[6] M. Grieves, "Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication", White paper, 2014.

[7] E. VanDerHorn, S. Mahadevan, "Digital twin: Generalization, characterization and implementation", *Decision Support Systems*, 145, 113524, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>

[8] A. Rasheed, O. San, T. Kvamsdal, "Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective", *IEEE Access*, 8, pp. 21980-22012, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>

[9] M. Liu, S. Fang, H. Dong, C. Xu, "Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications", *Journal of Manufacturing Systems*, 58,

- Part B, pp. 346-361, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- [10] M. Ç. Duman, “İşletmeler için yeni bir verimlilik teknolojisi: Dijital ikiz”, Verimlilik Dergisi, Özel Sayı, Dijital Dönüşüm ve Verimlilik, s. 188-205, 2021. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.981349>
- [11] H. X. Nguyen, R. Trestian, D. To, M. Tatipamula, “Digital twin for 5G and beyond”, IEEE Communications Magazine, pp. 10-15, February 2021. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000343>
- [12] M. H. Calp, E. Bahçekapılı, M. Berigel, “Endüstri 4.0 kapsamında akıllı fabrikaların incelenmesi”, 5th International Management Information Systems Conference, October 24-26, 2018, Ankara, pp. 116-120.
- [13] E. Kumaş, S. Erol, “Endüstri 4.0’da anahtar teknoloji olarak dijital ikizler”, Politeknik Dergisi, 24(2), s. 691-701, 2021. <https://doi.org/10.2339/politeknik.778934>
- [14] U. Şener, E. Gökalp, P. E. Eren, “Dijital olgunluk indeksi: Organizasyonların dijital dönüşüm yolculuğunda verimliliği artırmak için bir kantitatif yöntem”, Verimlilik Dergisi, s. 17-29, 2022. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1002353>
- [15] Gartner Press Release: Gartner identifies five emerging technology trends that will blur the lines between human and machine, August 2018. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-08-20-gartner-identifies-five-emerging-technology-trends-that-will-blur-the-lines-between-human-and-machine>
- [16] F. Tao, B. Xiao, Q. Qi, J. Cheng, P. Ji, “Digital twin modeling”, Journal of Manufacturing Systems, 64, pp. 372-389, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015>
- [17] J. Friederich, D. P. Francis, S. Lazarova-Molnar, N. Mohamed, “A framework for data-driven digital twins of smart manufacturing systems”, Computers in Industry, 136, 103586, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103586>
- [18] Y. H. Son, G.-Y. Kim, H. C. Kim, C. Jun, S. D. Noh, “Past, present, and future research of digital twin for smart manufacturing”, Journal of Computational Design and Engineering, 9(1), pp. 1-23, 2021. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab067>
- [19] L. Lattanzi, R. Raffaeli, M. Peruzzini, M. Pellicciari, “Digital twin for smart manufacturing: A review of concepts towards a practical industrial implementation”, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 34:6, pp. 567-597, 2021. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1911003>
- [20] O. Vermesan vd., “New waves of IoT technologies research transcending intelligence and senses at the edge to create multi experience environments”, In O. Vermesan and J. Bacquet (Eds.), Internet of Things - The Call of the Edge, pp. 17-184, River Publishers, 2020. <https://doi.org/10.13052/rp-9788770221955>
- [21] C. Yang, W. Shen, X. Wang, “The Internet of things in manufacturing: Key issues and potential applications,” IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine, 4(1), pp. 6-15, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1109/MSMC.2017.2702391>
- [22] E. Yıldız, C. Møller, A. Bilberg, “Demonstration and evaluation of a digital twin-based virtual factory”, The International Journal of Advanced

Manufacturing Technology, 114, pp. 185-203, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-06825-w>

[23] Q. Qi, F. Tao, T. Hu, N. Anwer, A. Liu, Y. Wei, A. Y. C. Nee, “Enabling technologies and tools for digital twin”, Journal of Manufacturing Systems, 58, pp. 3-21, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>

[24] V. Damjanovic-Behrendt, W. Behrendt, “An open source approach to the design and implementation of digital twins for smart manufacturing”, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 32:4-5, pp. 366-384, 2019.
<https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1599436>

[25] B. Biller, S. Biller, “Implementing digital twins that learn: AI and simulation are at the core”, Machines, 11, 425, 2023.
<https://doi.org/10.3390/machines11040425>

[26] Z. Lv, “Digital twins in Industry 5.0”, Research, 6: Article 0071, 2023.
<https://doi.org/10.34133/research.0071>

[27] ISO 23247, Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing, 2021.
<https://www.iso.org/standard/75066.html>