

Dijital Dönüşüm Teknolojilerinin Çok Boyutlu Yapısı Üzerine Bir Derleme: Teknolojik Yenilikler ve Uygulama Alanları

Berk DEMİRİSOY^{1*}

¹ Kormas Electric Motor, TOSB OSB, 41420, Kocaeli, Türkiye

*(demirsoyy.berk@gmail.com)

(Received: 19 October 2025, Accepted: 26 October 2025)

(7th International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences ICEANS 2025, October 25-26, 2025)

ATIF/REFERENCE: Demirsoy, B. (2025). Dijital Dönüşüm Teknolojilerinin Çok Boyutlu Yapısı Üzerine Bir Derleme: Teknolojik Yenilikler ve Uygulama Alanları, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(10), 373-389.

Özet – Bu çalışma, dijital dönüşüm kavramını çok boyutlu bir perspektiften ele alarak gelişen teknolojiler, sektörel uygulamalar ve yönetim dinamikleri arasındaki etkileşimi incelemektedir. Literatürde yer alan güncel araştırmalar, dijital dönüşümün yalnızca teknik bir yenilenme süreci değil, aynı zamanda kurumsal, toplumsal ve kültürel dönüşümleri de içeren bütüncül bir paradigma olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda çalışma, altı temel eksen üzerinden derlenmiştir: ileri düzey dijital teknolojilerin entegrasyonu, akıllı üretim ve dijital ikiz uygulamaları, sağlıkta dijital dönüşüm, elektronik ölçüm ve enstrümantasyon teknikleri, siber güvenlik ve dijital yönetim ile Nesnelerin İnterneti (IoT) tabanlı dönüşüm yaklaşımlarıdır. Elde edilen bulgular, bu alanlarda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmasına karşın, araştırmaların çoğunlukla teknolojik yeniliklere odaklandığını ve insan, organizasyon, etik ve sürdürülebilirlik boyutlarının sınırlı biçimde ele alındığını ortaya koymaktadır. Literatürdeki temel eksiklikler arasında teknolojiler arası entegrasyon modellerinin yetersizliği, birlikte çalışabilirlik standartlarının eksikliği, veri güvenliği ile enerji verimliliği arasındaki dengenin kurulamayışı ve siber yönetimde davranışsal faktörlerin ihmal edilmesi öne çıkmaktadır. Bu derleme, mevcut literatürdeki bu boşlukları bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirerek, gelecekteki araştırmalar için çok katmanlı hibrit mimariler, etik ve açıklanabilir yapay zekâ modelleri, kenar-bulut bilişim tabanlı dijital ikiz sistemleri ve insan merkezli yönetim çerçevelerinin geliştirilmesini önermektedir. Sonuç olarak, dijital dönüşümün sürdürülebilir, güvenli ve insan merkezli biçimde ilerlemesi; yalnızca teknolojik gelişmelere değil, bu gelişmeleri yönlendirecek stratejik planlama, kurumsal uyum ve disiplinler arası bütünleşmeye dayalı bir ekosistemin oluşturulmasına bağlı olacaktır.

Anahtar Kelimeler – Dijital dönüşüm elektroniği, nesnelerin interneti, yapay zeka, siber güvenlik, sürdürülebilirlik

I. GİRİŞ

Elektronik alanında dijital dönüşüm, ileri düzey dijital teknolojilerin kullanılarak verimliliğin artırılması, yenilikçi çözümlerin geliştirilmesi ve farklı endüstrilerde sürdürülebilir rekabet avantajlarının yaratılmasını kapsamaktadır. Güncel çalışmalar, dijital dönüşümün işletmelerin işleyiş biçimlerini kökten değiştirdiğini, süreçlerin daha veri odaklı, esnek ve müşteri merkezli hale geldiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, elektronik alanındaki dijital dönüşüm yalnızca teknik bir gelişme değil; aynı zamanda

organizasyonel kültürün, üretim modellerinin ve hizmet anlayışının yeniden tanımlanmasını gerektiren çok boyutlu bir dönüşümdür.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, elektronik endüstrisinde dijital dönüşümün temelini yapay zeka , bulut bilişim, blokzincir (blockchain) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi gelişmiş dijital teknolojilerin oluşturduğunu göstermektedir [1], [2]. Bu teknolojiler, operasyonel süreçlerin dijitalleşmesini sağlayarak hizmet kalitesini ve müşteri deneyimini önemli ölçüde geliştirmektedir. Özellikle bankacılık sektöründe mobil bankacılık ve elektronik ödeme sistemleri gibi uygulamaların yaygınlaşması, dijital dönüşümün hizmet etkileşimini nasıl güçlendirdiğinin somut bir örneğidir [1].

Elektronik üretiminde öne çıkan bir diğer önemli eğilim ise dijital ikiz (digital twin) teknolojisidir. Bu yaklaşım, fiziksel üretim süreçlerinin dijital ortamda simüle edilmesini sağlayarak tasarım ve üretim verimliliğini artırmakta, aynı zamanda maliyetleri düşürmektedir. Dijital ikiz tabanlı üretim sistemleri, akıllı fabrikaların (smart factories) oluşumuna katkıda bulunmakta ve kestirimci bakım, üretim optimizasyonu gibi uygulamalar aracılığıyla operasyonel performansta belirgin iyileşmeler sağlamaktadır [3].

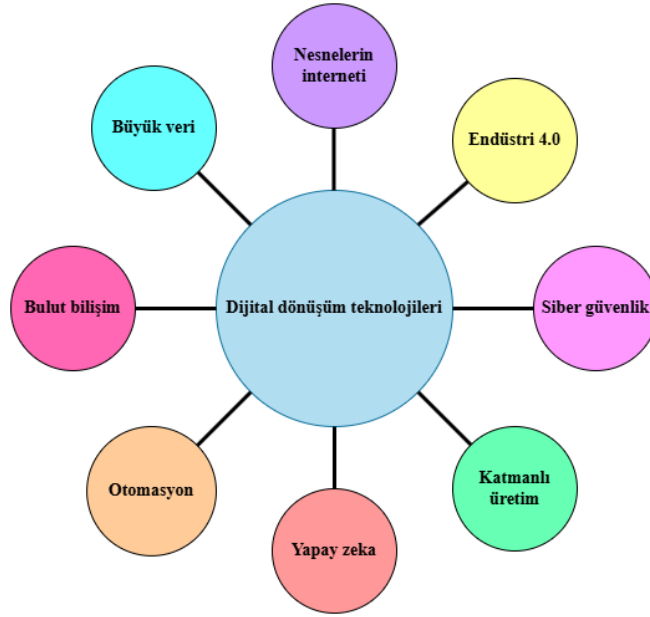
Sağlık sektörü, dijital dönüşümden en fazla etkilenen alanlardan biridir. Elektronik sağlık kayıtları (EHR) ve gelişmiş hastane bilgi sistemleri (HIS), sağlık kurumlarında süreçlerin dijitalleştirilmesi ve hasta bakım kalitesinin yükseltilmesi açısından kritik öneme sahiptir [4]. Bununla birlikte, sağlık verilerinin büyük ölçekte elektronik ortamda depolanması ve analiz edilmesi, veri güvenliği ve sistemler arası birlikte çalışabilirlik (interoperability) açısından yeni zorlukları da beraberinde getirmektedir [5].

Dijital teknolojilerin elektronik ölçüm sistemlerine entegrasyonu da önemli bir ilerleme alanı oluşturmuştur. Özellikle elektronik transformatörlerin tasarımı ve uygulamalarında yaşanan gelişmeler, yüksek gerilimli sistemlerde ölçüm doğruluğunu artırarak daha güvenilir veri toplama ve izleme imkânı sunmaktadır [6]-[8]. Bu tür dönüştürücüler, özellikle trafo merkezlerinde koruma sistemlerinin güvenilirliğini artırmakta ve sinyal bütünlüğünün korunmasında kritik rol oynamaktadır [9].

Dijitalleşmenin hızlanmasıyla birlikte, siber güvenlik konusu elektronik sistemlerin sürdürülebilirliği açısından en temel gerekliliklerden biri haline gelmiştir. Dijital altyapıların siber tehditlere karşı korunması, gelişmiş güvenlik çerçevelerinin ve dijital yönetim (digital governance) modellerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır [10],[11]. Ayrıca, dijital dönüşüm projelerinin etkin biçimde yönetilmesi için BT Altyapı Kütüphanesi (ITIL) gibi yönetim çerçevelerinin benimsenmesi, teknoloji stratejileriyle kurumsal hedeflerin uyumlu hale getirilmesinde önemli katkılar sağlamaktadır [10].

Bununla birlikte, dijital dönüşüm süreci birçok teknik ve organizasyonel zorluk da içermektedir. Bunların başında, farklı sistemlerin birlikte çalışabilirliğini gerektiren entegrasyon ve standartlaşma sorunları gelmektedir. Ayrıca, yeni teknolojilerin etkin biçimde kullanılabilmesi için çalışanların yeterli teknik bilgi ve beceriye sahip olması gerekmektedir. Literatürde, dijital yetkinlik eksikliğinin dijital dönüşüm projelerinin başarısını doğrudan etkileyen en kritik faktörlerden biri olduğu vurgulanmaktadır [4],[11]. Bunun yanı sıra, dijital dönüşümün yalnızca bir teknolojik yenileme değil, aynı zamanda bir kurumsal kültür değişimi olduğu da belirtilmektedir. Bu nedenle, başarılı bir dijital dönüşüm süreci; paydaşların yeni teknolojileri benimsemelerini kolaylaştıracak kapsamlı bir değişim yönetimi stratejisini gerektirmektedir [10],[12].

Şekil 1’de dijital dönüşüm teknolojilerinin alanları şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1 Dijital dönüşüm teknolojileri

Elektronik sektöründe dijital dönüşüm, farklı endüstrilerde işletmelerin faaliyet biçimlerini yeniden şekillendiren ve hizmet sunumunu dönüştüren çok boyutlu bir süreçtir. Gelişmiş dijital teknolojiler sayesinde üretimden sağlığa, enerji yönetiminden bankacılığa kadar geniş bir yelpazede yenilikçi çözümler geliştirilmekte, verimlilik ve özelleştirme düzeyi önemli ölçüde artmaktadır. Ancak bu potansiyelin tam anlamıyla gerçekleştirilebilmesi için teknik altyapı eksikliklerinin giderilmesi, insan kaynağının dijital yetkinliklerle güçlendirilmesi ve organizasyonel dönüşümün bütüncül biçimde ele alınması gerekmektedir. Elektronik endüstrisinin geleceğini şekillendirecek bu dijital dönüşüm süreci, yalnızca teknolojik gelişmelere değil; aynı zamanda sürdürülebilir büyüme, veri güvenliği ve insan merkezli inovasyona odaklanan sürekli bir araştırma ve geliştirme yaklaşımına da ihtiyaç duymaktadır.

Dijital dönüşümün sağladığı avantajlara karşın, elektronik endüstrisi bir dizi yapısal ve teknik zorlukla karşı karşıyadır:

- Eski Sistem Altyapısı: Güncellenmemiş donanım ve yazılım altyapıları, yeni teknolojilerin entegrasyonunu zorlaştırmakta ve yüksek yatırım maliyetleri gerektirmektedir.
- Nitelikli İş Gücü Eksikliği: Yeni nesil teknolojiler konusunda eğitilmiş personel eksikliği, dijital dönüşüm uygulamalarında operasyonel verimsizliklere neden olmaktadır.
- Uyumluluk ve Standartlaşma Sorunları: Farklı üreticilere ait cihaz ve sistemlerin birlikte çalışabilirliği, dijital dönüşümün en karmaşık teknik gereksinimlerinden birini oluşturmaktadır.

Elektronik alanındaki dijital dönüşüm, çok boyutlu bir evrimi temsil etmekte ve endüstrinin geleceğini yeniden şekillendirmektedir. IoT, yapay zekâ, uç bilişim ve siber güvenlik gibi teknolojilerin entegrasyonu sayesinde sektör, daha verimli, güvenli ve kullanıcı odaklı bir yapıya dönüşmektedir. Bununla birlikte, bu dönüşüm yalnızca teknolojik bir yenilenme değil; aynı zamanda organizasyonel, kültürel ve stratejik bir değişimi de beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla dijital dönüşüm süreci, geleceğin elektronik sistemlerinde veri odaklı karar alma, enerji verimliliği, güvenlik ve sürdürülebilirlik gibi temel kriterleri ön plana çıkaran bütüncül bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle alandaki araştırmaların devam etmesi, hem akademik hem de endüstriyel açıdan büyük önem taşımaktadır.

II. LİTERATÜR

Elektronik alanındaki dijital dönüşüm, dijital teknolojilerin elektronik sistem ve bileşenlerin tümüne entegre edilmesi sürecini kapsamaktadır. Bu dönüşüm, işletmelerin çalışma biçimini ve müşterilere değer sunma yöntemlerini köklü biçimde değiştirmektedir. Dijital dönüşüm, verimliliği artırmak, ürün ve hizmet kalitesini geliştirmek ve iş modellerini yeniden şekillendirmek amacıyla yeni teknolojilerin benimsenmesi olarak tanımlanabilir. Bu bağlamda, elektronik sektörde dijitalleşme yalnızca üretim

süreçlerinde değil; tasarım, bakım, veri yönetimi ve müşteri ilişkileri gibi tüm alt sistemlerde etkisini göstermektedir.

A. İleri Düzey Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu

Gelişmiş dijital teknolojilerin farklı sektörlerde entegrasyonu, çağdaş endüstriyel dönüşümün en belirgin temalarından biri haline gelmiştir. Bu entegrasyon, operasyonel paradigmaları kökten değiştirerek verimliliği artırmakta, yenilikçi süreçleri teşvik etmekte ve geleneksel yönetim yaklaşımlarını dönüştürmektedir. Dijital teknolojilerin sektörel ihtiyaçlara özgü stratejilerle uygulanması, yönetim ve etkileşim biçimlerinde köklü bir yeniden yapılanmayı beraberinde getirmiştir.

Sağlık alanında, dijital dönüşümün “akıllı sağlık (smart healthcare)” yaklaşımıyla somutlaştığı görülmektedir. Yao ve arkadaşları, etkin bir sağlık yönetiminin temelinde veri entegrasyonu ve kurumsal iş birliğinin bulunduğunu vurgulamaktadır. Gerçek zamanlı sağlık izlemesi, erken teşhis sistemleri ve hasta sonuçlarının iyileştirilmesi gibi uygulamalar, dijital dönüşümün klinik süreçler üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. Büyük veri analitiği, yapay zekâ ve hassas tıp (precision medicine) alanındaki ilerlemeler, geleneksel sağlık hizmetlerinden teknoloji temelli, öngörücü ve kişiselleştirilmiş sistemlere doğru bir paradigma değişimi yaşandığını göstermektedir [13].

Benzer biçimde, eğitim sektörü de dijital dönüşümden derin biçimde etkilenmektedir. Srisawat ve arkadaşları, dijital dönüşümü eğitim kurumlarının örgütsel yapısını ve stratejik planlamasını yeniden biçimlendiren, yenilik odaklı bir süreç olarak tanımlamaktadır. Bu dönüşüm, kurumların dijital zorluklara karşı daha dirençli hale gelmesini sağlamakta ve sürekli öğrenme kültürünü desteklemektedir [14]. Liu ise dijital dönüşümün eğitim alanındaki en somut çıktılarından birinin veri odaklı dijital eğitim kaynak platformları olduğunu belirtmektedir. Bu tür platformlar, öğretim süreçlerinin yönetiminden öğrenme deneyimlerinin kişiselleştirilmesine kadar geniş bir yelpazede dönüşüm yaratmakta, dolayısıyla eğitim paradigmasını temelden değiştirmektedir [15].

Üretim sektörü, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) açısından dijital teknolojilerin uygulandığı en kritik alanlardan biridir. Marino ve arkadaşları, dijital ikiz (digital twin) teknolojisinin mühendislik süreçlerini sanal ortamda simüle ederek işletmelerin operasyonel kabiliyetlerini ve yenilik potansiyelini artırdığını ortaya koymaktadır [16]. Araştırmada, bu teknolojilerin uygulanması sürecinde karşılaşılan zorluklara da dikkat çekilmekte; dijital ikizin, KOBİ'lerin rekabet gücünü artırmada stratejik bir araç olarak değerlendirildiği vurgulanmaktadır. Benzer şekilde, inşaat sektöründe dijital dönüşümün, teknolojik yenilik ve yönetim stratejileri arasındaki karmaşık bir etkileşim olarak ele alınması gerektiğini belirten çalışmalar [17], bu dönüşümün yalnızca teknik değil, aynı zamanda yönetsel boyutlarının da bütüncül biçimde incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

Enerji sektörü, dijital teknolojilerin sürdürülebilirlik odaklı kullanımına ilişkin çarpıcı örnekler sunmaktadır. Stennikov ve arkadaşları, dijital teknolojilerin entegre enerji sistemlerinde koordineli kontrol ve verimli kaynak yönetimini mümkün kıldığını, bunun da sistem genelinde verimlilik ve sürdürülebilirliği artırdığını belirtmektedir [18]. Bu bağlamda dijital dönüşüm, yalnızca operasyonel süreçlerin iyileştirilmesini değil; aynı zamanda çevresel hedeflerin ve Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA)'nın desteklenmesini de kapsamaktadır. Liao ise dijital araçların enerji ve kaynak verimliliğini artırmada stratejik rol oynadığını, dijitalleşmenin çevresel sürdürülebilirlikle doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamaktadır [19].

Tüm sektörlerde ortak bir payda olarak stratejik yönetim ve kaynak entegrasyonu öne çıkmaktadır. Hsiao, dijital dönüşüm süreçlerinin başarısının, örgütsel yetkinliklerin güçlendirilmesine ve kaynak entegrasyonuna bağlı olduğunu ifade etmektedir [20]. Teknolojik inovasyonların kurumsal stratejilerle uyumlu hale getirilmesi gerektiğini belirten Choori ve Kazemi [21] ise, dijital dönüşümün yalnızca teknoloji temelli değil, aynı zamanda stratejik yönetim temelli bir süreç olduğunu savunmaktadır. Bu bağlamda dijital dönüşümün başarısı, teknolojik yatırımlar kadar organizasyonel uyum ve yönetsel vizyonun da etkinliğine bağlıdır.

Sonuç olarak, ileri düzey dijital teknolojilerin entegrasyonu, sağlık, eğitim, üretim, enerji ve inşaat gibi farklı sektörlerde dönüştürücü etkiler yaratmakta ve her alanın kendine özgü gereksinimlerine göre farklı stratejiler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu dönüşümün dinamikleri, teknolojik ilerlemeler kadar

örgütsel kültür, yönetim kapasitesi ve sürdürülebilirlik hedefleriyle de şekillenmektedir. Literatür genel olarak, dijital dönüşümün sektörel bağlamda verimlilik, yenilikçilik ve çevresel sürdürülebilirlik ekseninde çok boyutlu bir etki alanı yarattığını göstermektedir.

B. Akıllı Üretimde Dijital İkiz Teknolojisi

Akıllı üretim kavramı, yapay zeka, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve veri analitiği gibi gelişmiş teknolojilerin entegrasyonu ile şekillenen yeni bir endüstriyel paradigma olarak tanımlanmaktadır. Bu dönüşümün merkezinde yer alan dijital ikiz (Digital Twin – DT) teknolojisi, fiziksel ve dijital sistemler arasında çift yönlü bir etkileşim ağı oluşturarak üretim süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesini, tahmine dayalı analizini ve operasyonel optimizasyonunu mümkün kılmaktadır. Üretim süreçlerinin giderek daha karmaşık ve veri odaklı hale gelmesiyle birlikte dijital ikiz kavramı hem akademik hem de endüstriyel çalışmalarda giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Chen ve arkadaşları, dijital ikizlerin fiziksel varlıkların operasyonel dinamiklerini doğru biçimde temsil edebildiğini ve bu sayede sistem davranışlarının daha iyi anlaşılmasına olanak tanıdığını belirtmektedir [22]. Schmetz ve arkadaşları ise dijital ikizlerin Endüstri 4.0 ekosisteminin temel bileşenlerinden biri olduğunu vurgulayarak, çok kaynaklı verilerin bütünlük biçiminde yönetilmesini ve ürün yaşam döngüsü boyunca atık miktarının azaltılmasını sağladığını ifade etmektedir [23]. Bu kapsamda dijital ikiz teknolojisi, üretim sistemlerini bütüncül biçimde analiz ederek geleneksel üretim paradigmasını daha çevik, verimli ve sürdürülebilir yapılara dönüştürmektedir.

Dijital ikizlerin en önemli katkılarından biri, üretim planlamasının optimizasyonu alanında ortaya çıkmaktadır. Tang ve arkadaşları, dijital ikiz tabanlı işbirlikçi kapasite optimizasyon modeli geliştirerek, dinamik pazar koşullarına hızlı uyum sağlayabilen üretim sistemlerinin oluşturulabileceğini göstermiştir [24]. Liu ve çalışma arkadaşları ise dijital ikiz destekli tesislerin robot hareket planlamasından kaynaklı yönetimine kadar çok boyutlu karar verme süreçlerinde gerçek zamanlı kontrol ve uyarlanabilir yönetim imkânı sunduğunu belirtmektedir [25].

Methuselah, dijital ikiz çerçevesinde yapay zekâ ve makine öğrenmesi entegrasyonunun, kestirimci bakım stratejilerinin geliştirilmesi ve operasyonel inovasyonun artırılmasında kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır [26]. Bu bağlamda, fiziksel ve dijital katmanlar arasındaki dinamik veri alışverişi, üretim süreçlerinin kesintisiz biçimde simüle edilmesine ve arıza sürelerinin (downtime) önemli ölçüde azaltılmasına imkân tanımaktadır [27].

Badakhshan ve Ball, dijital ikiz uygulamalarının kavramsal çerçevesini inceleyerek, bu sanal temsillerin sürekli veri değişimi yoluyla fiziksel sistemlerle etkileşim kurduğunu ve bu durumun zamanında, bilgiye dayalı karar verme süreçleri için kritik önem taşıdığını belirtmiştir [28]. Huang ve arkadaşları ise dijital ikizlerin yalnızca izleme sistemleri olmadığını, aynı zamanda iteratif tasarım süreçlerini ve dijital doğrulamaları destekleyerek ürün geliştirme döngülerini hızlandırdığını göstermiştir [29].

Literatürdeki pek çok çalışma, dijital ikizlerin akıllı üretim ortamlarında çok boyutlu faydalar sağladığını doğrulamaktadır. Bu faydalar arasında üretim esnekliği, operasyonel verimlilik, enerji tasarrufu, kalite artışı ve sürdürülebilirlik gibi kriterler ön plana çıkmaktadır. Kenett ve Bortman ile Song ve arkadaşları, dijital ikiz teknolojilerinin Endüstri 4.0 hedeflerine ulaşmada stratejik bir araç olduğunu, üretim sistemlerinin daha akıllı, çevik ve uyarlanabilir hale gelmesini sağladığını vurgulamıştır [30],[31].

Sonuç olarak, dijital ikiz teknolojisi, akıllı üretim süreçlerinde dijital ve fiziksel sistemler arasında kesintisiz bilgi akışını mümkün kılarak verimliliği artırmakta, maliyetleri azaltmakta ve ürün kalitesini yükseltmektedir. Endüstriler dijital dönüşümü benimsedikçe, dijital ikizlerin yaygın kullanımı üretim sistemlerinin geleceğini şekillendirecek temel unsurlardan biri haline gelmektedir. Bu teknolojinin gelişimi, yalnızca operasyonel mükemmelliğe değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve yenilikçi üretim ekosistemlerinin oluşumuna da yön vermektedir.

C. Sağlık Sektöründe Dijital Dönüşüm

Sağlık sektöründeki dijital dönüşüm, bakım hizmetlerinin sunumunu iyileştirmek, hasta deneyimlerini geliştirmek ve sağlık kurumlarındaki süreçleri daha verimli hale getirmek amacıyla ileri teknolojilerin kullanılmasına dayanan köklü bir değişim sürecidir. Bu dönüşüm yalnızca yenilikçi dijital çözümlerin

benimsenmesini değil, aynı zamanda sağlık sistemlerinin altyapısal ve kültürel olarak dönüşmesini de zorunlu kılmaktadır.

Başarılı bir dijital dönüşümün en kritik boyutlarından biri, teknolojinin mevcut sağlık hizmeti yapılarıyla uyumlu biçimde bütünleştirilmesidir. Leonardsen ve arkadaşları, e-sağlık uygulamalarının etkin biçimde hayata geçirilebilmesi için dijital araçların sağlık hizmeti sunumunun bağlamsal gerçeklikleriyle hizalanması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu durum, teknolojik çözümlerin yalnızca teknik bir yenilik değil, hasta ve sağlık personeli arasındaki etkileşimi dönüştüren sosyal bir olgu olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı çalışma, sağlık hizmetlerinde ortak üretim (co-creation) anlayışının önemine dikkat çekerek, dijital dönüşümün başarısında hastalar, aileler ve sağlık çalışanlarının aktif rol alması gerektiğini belirtmiştir [32].

COVID-19 pandemisi, dijital dönüşümün ivmelenmesinde bir katalizör işlevi görmüştür. Tucmeanu ve arkadaşları, dijital yönelimin (digital orientation) artırılmasının sağlık kurumlarında sürdürülebilir inovasyonun benimsenmesini kolaylaştırdığını ve proaktif teknoloji politikalarının pandemi sonrası dönemde önemli avantajlar sağladığını belirtmiştir [33]. Benzer biçimde, Sony ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen kapsamlı bir derleme çalışması, Health 4.0 çerçevesinde dijital sağlık çözümlerinin uygulanmasında başarı için kritik unsurların maliyet yönetimi ile hizmet kalitesinin dengelenmesi olduğunu ortaya koymuştur [34].

Bununla birlikte, sağlıkta dijital dönüşüm teknik ve organizasyonel zorluklarla da karşı karşıyadır. Schmitter ve Ashworth, sağlık kurumlarında kullanılan dijital sistemlerin genellikle çok sayıda teknoloji bileşenini aynı anda içermesi nedeniyle operasyonel verimlilik sağlamada güçlükler yaşandığını ifade etmektedir [35]. Busse ve arkadaşları ise hem sağlık profesyonelleri hem de hastalar arasındaki dijital sağlık okuryazarlığı eksikliğinin, dijital araçların etkin kullanımını sınırladığını belirtmektedir. Dolayısıyla dijital sağlık teknolojilerinin potansiyelinden tam anlamıyla yararlanılabilmesi, her iki tarafın da bu araçları bilinçli ve yetkin biçimde kullanabilmesine bağlıdır [36].

Dijital dönüşümün başarıyla uygulanabilmesi için katılımcı yaklaşımlar ve kullanıcı etkileşimi de büyük önem taşımaktadır. Wieslander ve arkadaşlarının yürüttüğü niteliksel çalışmalar, sağlık çalışanları ve hastaların karar alma süreçlerine aktif katılımının, dijital sağlık projelerinin başarı oranını artırdığını göstermiştir [37]. Bu kapsamda Mather ve Almond tarafından geliştirilen ve daha sonra genişletilen COMPASS (Context Optimisation Model for Person-centred Analysis and Systematic Solutions) modeli, kişiye odaklı analiz ve sistematik çözüm yaklaşımıyla dijital araçların benimsenmesini kolaylaştırmakta ve uygulama engellerini sistematik biçimde ele almaktadır [38],[39].

Sağlık sektörünün tele-tıp, büyük veri analitiği ve yapay zeka gibi dijital yenilikleri giderek daha fazla benimsemesiyle birlikte, esnek politika ve yönetim çerçevelerinin gerekliliği de ön plana çıkmaktadır. Al-Jaroodi ve çalışma arkadaşları, sağlık sistemlerinin yenilik kapasitesinin artırılmasında hukuki ve finansal yapıların esnekliğinin belirleyici rol oynayacağını vurgulamaktadır [40]. Özellikle pandemi sonrası dönemde hızlı teknolojik adaptasyonun zorunlu hale gelmesi, dijital dönüşümü destekleyecek çok paydaşlı iş birliği ekosistemlerinin oluşturulmasını gerekli kılmaktadır.

Sonuç olarak, sağlık sektöründe dijital dönüşüm çok boyutlu bir süreç olup yenilikçi teknolojilerin entegrasyonu, dijital okuryazarlığın artırılması, kullanıcı katılımının sağlanması ve esnek politika yapılarının oluşturulmasıyla mümkündür. Bu unsurların bütüncül biçimde ele alınması, dijital sağlık çözümlerinin potansiyelinin tam anlamıyla gerçekleştirilmesi ve sağlık hizmetlerinin kalitesinin sürdürülebilir biçimde artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

D. Elektronik Ölçüm ve Enstrümantasyon Teknikleri

Elektronik ölçüm ve enstrümantasyon tekniklerine ilişkin çalışmalar, hassasiyetin, verimliliğin ve uygulama çeşitliliğinin artırılmasına yönelik çok disiplinli araştırmaları kapsamaktadır. Bu alan; özellikle biyomedikal mühendisliği, elektrik mühendisliği ve çevresel izleme gibi disiplinlerde önemli ilerlemeler sağlamış, ölçüm doğruluğu ile sistem performansını geliştiren teknolojik yaklaşımların önünü açmıştır.

Biyomedikal mühendisliği alanında yapılan araştırmalar, biyolojik materyallerin ve hücresel etkileşimlerin izlenmesinde elektriksel ölçüm tekniklerinin kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda biyoimpedans ölçüm yöntemleri, hücrelerin dielektrik özelliklerini analiz ederek hücresel

yapıların bütünlüğünü ve canlılığını invaziv olmayan (non-invasive) bir biçimde değerlendirme olanağı sunmaktadır [41],[42]. Bu yöntemler, dokuların elektriksel yanıtlarını inceleyerek zaman içinde hücre sağlığının izlenmesini mümkün kılmakta ve doku mühendisliği ile biyoyapı üretimi (biomanufacturing) süreçlerinde yenilikçi yaklaşımların gelişmesine katkıda bulunmaktadır.

Elektrik mühendisliği kapsamında ise özellikle üç fazlı motorlar [43] ve yoğun endüstriyel fermantasyon süreçleri gibi karmaşık sistemlerde elektriksel özelliklerin doğru ölçülmesine yönelik önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu ölçümler sıklıkla dielektrik spektroskopi gibi yöntemlerle gerçekleştirilmekte, böylece enerji dönüşüm sistemlerinde parametre optimizasyonu ve verimlilik artışı sağlanmaktadır [44]. Ölçüm cihazlarının uygulamaya özel biçimde özelleştirilmesi, kullanıcıların elektriksel güç yapılarını analiz ederek sistem performansını daha etkin biçimde optimize etmesine olanak tanımaktadır [43]. Ayrıca, elektriksel direnç tomografisi (Electrical Resistance Tomography – ERT) gibi yenilikçi ölçüm teknolojileri, malzemelerin faz geçişleri ve yoğunluk değişimleri hakkında bilgi sunarak kimyasal proses endüstrilerinde karar destek mekanizmalarını güçlendirmektedir [45].

Kalibrasyon ve doğrulama süreçleri, ölçüm doğruluğunu garanti altına almak açısından büyük önem taşımaktadır. Lanza ve arkadaşları, temassız yağış ölçüm cihazları için geliştirdikleri yenilikçi kalibrasyon yöntemleriyle meteorolojik olayların daha doğru biçimde analiz edilebildiğini göstermiştir [46]. Benzer şekilde, Wang ve arkadaşları atmosfer kimyasını izleyen cihazlarda uygulanan kalibrasyon protokollerinin ölçüm tutarlılığını artırdığını vurgulamıştır [47]. Bu çalışmalar, farklı alanlarda kullanılan ölçüm sistemlerinin güvenilirliğinin, titiz kalibrasyon yaklaşımlarına dayandığını göstermektedir.

Bunun yanında, invaziv olmayan ölçüm tekniklerindeki ilerlemeler, zorlu koşullarda veri toplanmasına yönelik yeni olanaklar yaratmıştır. Hernández ve arkadaşları, yüksek sıcaklıklı metaller gibi zorlu endüstriyel ortamlarda elektrik alanlarının izlenmesiyle gerçekleştirilen ölçümlerin, dayanıklı ve güvenilir sistemlerin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahip olduğunu belirtmiştir [48]. Bu tekniklerin en önemli avantajı, gerçek zamanlı veri elde edebilme kabiliyetidir; bu özellik özellikle metalürji ve cam üretimi gibi aşırı sıcaklık ortamlarında proses kontrolü açısından hayati bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır [48].

Sonuç olarak, elektronik ölçüm ve enstrümantasyon tekniklerine ilişkin literatür, farklı mühendislik alanlarının kesişiminde konumlanan bir araştırma sahası olarak gelişimini sürdürmektedir. Bu çalışmalar, yenilikçi ölçüm metodolojilerinin pratik uygulamalarla bütünleşmesini sağlayarak hem ölçüm doğruluğunu hem de sistem verimliliğini artırmaktadır. Sürekli gelişen bu teknikler, yalnızca mevcut mühendislik süreçlerini iyileştirmekle kalmayıp, biyomedikal ve çevresel izleme gibi alanlarda yeni nesil sensör teknolojilerinin ve akıllı ölçüm sistemlerinin geliştirilmesine de zemin hazırlamaktadır.

E. Siber Güvenlik ve Dijital Yönetişim

Siber güvenliğin dijital yönetim çerçevelerine entegre edilmesi, e-devlet hizmetlerinin dirençliliği ve etkinliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Literatürde, güçlü siber güvenlik uygulamalarının e-devlet hizmet kalitesini doğrudan artırdığı ve vatandaşların bu dijital platformlara duyduğu güveni pekiştirdiği ortaya konulmaktadır. Örneğin, Suudi Arabistan’da yürütülen bir çalışma, etkin siber güvenlik önlemleri ile e-devlet hizmet kalitesi arasında güçlü bir korelasyon bulunduğunu göstermektedir. Bu bulgu, ABD’deki kamu hizmeti çalışmalarında da benzer biçimde vurgulanmakta ve siber güvenliğin kamu hizmet sunumunda merkezi bir rol oynadığına işaret etmektedir [49].

Zambiya örneği, artan siber suç tehditleriyle mücadelede hukuki ve teknolojik kapasite inşasının önemini açık biçimde ortaya koymaktadır. Siampondo ve Chansa, hükümetlerin siber güvenliği yalnızca teknik bir mesele olarak değil, aynı zamanda bir yönetim stratejisi olarak ele alması gerektiğini belirtmektedir. Bu kapsamda, yasal düzenlemelerin güçlendirilmesi ve yeterli kaynak tahsisi, hem siber suçluların yargılanmasını kolaylaştırmakta hem de caydırıcılığı artırmaktadır. Böylelikle, hukuki ve teknolojik hazırlık düzeyi, etkin siber güvenlik yönetişiminin temel belirleyicilerinden biri haline gelmektedir [50].

Doğu Afrika ülkelerinde yürütülen araştırmalar da, e-devlet sistemleri içerisinde hassas verilerin korunması için katı siber güvenlik politikalarının uygulanmasının zorunlu olduğunu göstermektedir. Nnenna ve arkadaşları, veri koruma politikalarının ve kapsamlı güvenlik stratejilerinin yalnızca gizliliği

korumakla kalmayıp, aynı zamanda kamu kurumlarının bütünlüğünü güçlendirdiğini belirtmektedir [51]. Bu durum, vatandaş güvenini artırmakta ve dijital yönetişimin sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır. Yamada ise siber güvenliğin yalnızca mevzuat uyumluluğu olarak değil, risk yönetimiyle bütünleşik bir yönetişim modeli çerçevesinde ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır [52].

Farklı sektörlerde de benzer gereklilikler öne çıkmaktadır. Özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerdeki sağlık sistemlerinde, dinamik tehdit ortamına yanıt verebilecek uyarlanabilir siber güvenlik yönetişimi modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Hasegawa ve arkadaşları, bu kapsamda siber riskleri azaltacak, paydaşları bilinçlendirecek ve teknolojik gelişmeleri destekleyecek politika yapılarına odaklanılması gerektiğini ifade etmektedir [53]. Küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ'ler) üzerine yapılan çalışmalarda ise kaynak yetersizliği ve farkındalık eksikliğinin etkili siber güvenlik stratejilerinin önünde ciddi engeller oluşturduğu belirtilmektedir. Benjamin ve çalışma arkadaşları, bu zorlukların yenilikçi çözümler, risk değerlendirmeleri ve hedefe yönelik destek programlarıyla aşılabileceğini vurgulamaktadır [54].

Günümüzde siber tehditlerin karmaşıklığı, katılımcı ve iş birliğine dayalı yönetişim yaklaşımlarını zorunlu kılmaktadır. D'Amico ve arkadaşları, paydaş katılımı ve geri bildirim mekanizmalarının dâhil edildiği yönetişim modellerinin, siber güvenlik önlemlerinin etkinliğini artırdığını ve yerel aktörleri aktif paydaşlara dönüştürdüğünü ortaya koymaktadır [55]. Bu yaklaşımlar, yalnızca teknik ve hukuki düzenlemelere değil; aynı zamanda insan faktörü, örgüt kültürü ve kurumsal farkındalık boyutlarına da odaklanmaktadır [49].

Uluslararası düzeyde ise, BRICS Dijital Ekonomi Ortaklığı gibi yeni nesil dijital yönetişim modelleri, siber güvenlik alanında iş birliğini güçlendirmeye yönelik önemli adımlar olarak değerlendirilmektedir. Ayodele ve Petla, bu girişimin veri koruma ve siber güvenlik konularında üye ülkeler arasında en iyi uygulamaların ve kaynakların paylaşılmasını hedeflediğini belirtmektedir [56]. Bu tür çok taraflı yapılar, giderek karmaşılaşan dijital tehdit ortamında kolektif siber direnç oluşturulması açısından büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, siber güvenlik ve dijital yönetişim üzerine yapılan çalışmalar, kamu yönetimi sistemlerinde kapsamlı siber güvenlik politikalarının bütünleştirilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. E-devlet uygulamalarının etkinliği, yalnızca teknik altyapıya değil; hukuki, operasyonel, toplumsal ve kültürel boyutları da kapsayan çok disiplinli bir yaklaşıma bağlıdır. Bu çerçevede geliştirilen bütüncül yönetişim modelleri, dijital çağın risklerini yönetmede olduğu kadar vatandaş güvenini korumada da kilit rol oynamaktadır.

F. Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Dijital Dönüşüm

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things – IoT) teknolojilerinin dijital dönüşüm sürecine entegrasyonu, farklı endüstrilerin evrimini belirleyen temel bir unsur haline gelmiştir. IoT, operasyonel verimliliği artırarak ve iş modellerini yeniden tanımlayarak dijitalleşmenin en etkili bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Güncel çalışmalar, IoT teknolojilerinin üretim, sağlık ve tarım gibi birçok sektörde dijital dönüşümü kolaylaştırdığını ortaya koymaktadır.

IoT'nin başarısında temel unsur, bulut bilişim, büyük veri analitiği ve yapay zekâ gibi destekleyici teknolojik altyapılarla uyum içinde çalışabilmesidir. Sánchez ve arkadaşları, küçük ve orta ölçekli işletmelerin (KOBİ) dijital dönüşüm stratejilerinde IoT sistemlerinin benimsenmesiyle operasyonel verimliliklerini ve müşteri etkileşimlerini önemli ölçüde geliştirebileceğini belirtmektedir [57]. Benzer şekilde, Adhichandra ve çalışma arkadaşları, IoT yeniliklerinin Endüstri 4.0 ilkeleriyle doğrudan ilişkili olduğunu ve akıllı fabrikalarda birbirine bağlı cihazlar aracılığıyla gerçek zamanlı veri izleme ile kestirimci bakım uygulamalarının mümkün hale geldiğini vurgulamaktadır [58]. Bu sinerji, IoT'nin mevcut dijital altyapılarla bütünleşmesinin dijital dönüşümün başarısı açısından stratejik önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Özellikle üretim sektöründe, IoT entegrasyonu süreç yönetimi ve üretkenlik açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır. Liu ve arkadaşları, KOBİ'ler için geliştirdikleri kapsamlı bir dijital dönüşüm yol haritasında, IoT'nin bulut bilişimle birlikte ürün ve hizmetlerin dönüştürülmesinde ve operasyonel süreçlerin optimize edilmesinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur [59]. Romanova ve Igishev

ise endüstriyel IoT uygulamalarının, yüksek teknolojiye dayalı üretim ortamlarında yönetim etkinliğini artırdığını ve karar verme süreçlerini hızlandırdığını ifade etmektedir [60].

Sağlık sektörü de IoT entegrasyonundan en fazla yararlanan alanlardan biridir. Hamed ve Farah, Libya sağlık sisteminde IoT teknolojilerinin hasta, cihaz ve sağlık profesyonelleri arasındaki etkileşimi dönüştürdüğünü, böylece akıllı sağlık (smart healthcare) altyapısının temellerini oluşturduğunu belirtmektedir [60]. Krotkiewicz ve çalışma arkadaşları, IoT'nin yapay zekâ ve blokzincir teknolojileriyle birlikte kullanılmasının hastane yönetim sistemlerinin verimliliğini artırdığını ve veri güvenliğini güçlendirdiğini göstermiştir [62]. Bu çalışmalar, IoT'nin yalnızca teknik bir yenilik değil, sağlık yönetimi süreçlerinde sistemler arası bütünleşmeyi kolaylaştıran stratejik bir araç olduğunu göstermektedir.

IoT uygulamaları tarım sektöründe de sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından dönüştürücü etkiler yaratmaktadır. Pasupuleti, hassas tarım (precision agriculture) alanında IoT'nin gerçek zamanlı izleme olanağı sağlayarak daha akıllı ve kaynak verimli tarım uygulamalarını mümkün kıldığını belirtmektedir [63]. Widiarta ise IoT'nin derin öğrenme algoritmalarıyla entegrasyonunun hayvancılıkta üretkenliği artırdığını ve sektöre yönelik yatırım çekiciliğini güçlendirdiğini vurgulamaktadır [64]. Bu bağlamda IoT, çevresel sürdürülebilirlik ve gıda güvenliği hedeflerine ulaşmada da önemli bir araç haline gelmiştir.

Sonuç olarak, IoT'nin dijital dönüşümle bütünleşmesi yalnızca teknolojik bir değişim değil, aynı zamanda stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. İşletmeler, IoT çözümlerini benimseyerek operasyonel süreçlerini sadeleştirmekte, müşteri deneyimlerini geliştirmekte ve yenilik kapasitesini artırmaktadır. Bu durum, sektörler arası dijital dönüşümü hızlandırmakta ve endüstriyel ekosistemleri veri odaklı, esnek ve sürdürülebilir yapılar haline getirmektedir.

Tablo 1'de dijital dönüşüm alanlarındaki çalışmaların odak noktası ve literature katkıları gösterilmektedir.

Tablo 1. Dijital dönüşüm alanlarında literatür özeti

Tematik Alan	Kaynak (Yazar-Yıl)	Çalışmanın Odak Noktası	Temel Katkıları
İleri Düzey Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu	Nguyễn et al. (2022); Nadeem et al. (2018) [1],[2]	Yapay zekâ, bulut bilişim, büyük veri ve dijitalleşmenin sektörler arası etkisi	Dijital teknolojilerin hizmet kalitesi ve müşteri etkileşimini artırdığı; operasyonel verimlilikte belirgin iyileşme sağladığı belirtilmiştir.
	Mulyani et al. (2023); Mohammadi et al. (2023) [10],[12]	Dijital dönüşümün yönetsel ve stratejik boyutları	Başarılı dijital dönüşümün teknoloji kadar kültürel değişim ve örgütsel adaptasyon gerektirdiği öne sürülmüştür.
Akıllı Üretim ve Dijital İkiz Teknolojisi	Chen et al. (2024); Schmetz et al. (2020) [22],[23]	Dijital ikizlerin üretim sistemlerinde veri entegrasyonu ve yaşam döngüsü yönetimi	Dijital ikizlerin operasyonel süreçleri gerçek zamanlı izleme ve optimizasyon kapasitesini artırdığı gösterilmiştir.
	Tang et al. (2023); Liu et al. (2022) [24],[25]	Kestirimci bakım ve kaynak planlama için dijital ikiz modelleri	Gerçek zamanlı karar desteği sağlayarak üretim planlamasında esneklik kazandırdığı ifade edilmiştir.
	Methuselah (2024); Badakhshan & Ball (2021); Huang et al. (2022) [26],[28],[29]	Dijital ikizlerde yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamaları	AI destekli dijital ikizlerin kestirimsel analiz gücünü ve ürün geliştirme hızını artırdığı vurgulanmıştır.
Sağlık Sektöründe Dijital Dönüşüm	Leonardsen et al. (2020) [32]	E-sağlık sistemlerinin uygulanmasında bağlamsal uyumun önemi	Teknolojinin sağlık personeli ve hasta etkileşimleriyle uyumlu biçimde tasarlanmasının kritik olduğu belirtilmiştir.
	Țucmeanu et al. (2022); Sony et al. (2023) [33],[34]	COVID-19 sonrası dijital sağlık uygulamaları ve	Pandemi sonrası dijitalleşmenin hızlandığı ve

		sürdürülebilir inovasyon	teknoloji odaklı yeniliklerin kalıcılaştığı ifade edilmiştir.
	Busse et al. (2022); Wieslander et al. (2024) [36],[37]	Dijital sağlık okuryazarlığı ve katılımcı yaklaşımlar	Kullanıcı katılımı ve dijital yetkinliğin hizmet kalitesiyle doğrudan ilişkili olduğu ortaya konmuştur.
	Mather & Almond (2022); Mather et al. (2023); Al-Jaroodi et al. (2020) [38]-[40]	Sağlıkta dijital yönetim ve politika esnekliği	Sağlık dijitalleşmesinde esnek ve kişi merkezli politika çerçevelerinin gerekliliği vurgulanmıştır.
Elektronik Ölçüm ve Enstrümantasyon Teknikleri	Amini et al. (2018); Wu et al. (2018) [41],[42]	Biyoimpedans temelli hücre ölçüm teknikleri	Elektriksel ölçümün biyolojik yapılar üzerinde non-invaziv değerlendirme olanağı sağladığı gösterilmiştir.
	Almeida et al. (2023); Ducommun et al. (2001) [43],[44]	Elektriksel parametre ölçümü ve enerji sistemleri optimizasyonu	Geliştirilen sistemlerin yüksek doğruluk ve verimlilik sunduğu belirtilmiştir.
	Lanza et al. (2021); Wang et al. (2020); Hernández et al. (2017) [46]-[48]	Kalibrasyon ve zorlu çevrelerde ölçüm	Yeni kalibrasyon protokollerinin ve dayanıklı sensör sistemlerinin doğruluk ve güvenilirliği artırdığı vurgulanmıştır.
Siber Güvenlik ve Dijital Yönetişim	Al-Hawamleh (2024) [49]	E-devlet hizmetlerinde siber güvenlik kalitesi	Güçlü güvenlik önlemlerinin vatandaş güvenini ve hizmet kalitesini artırdığı ortaya konmuştur.
	Siampondo & Chansa (2023); Nnenna et al. (2024); Yamada (2024) [50]-[52]	Kamu güvenliği ve veri koruma politikaları	Siber suçlarla mücadelede yasal düzenlemelerin ve kapsamlı güvenlik stratejilerinin önemi vurgulanmıştır.
	Benjamin et al. (2024); D'Amico et al. (2020) [54],[55]	KOBİ'lerde siber olgunluk ve katılımcı yönetim	Paydaş katılımına dayalı modellerin güvenlik performansını artırdığı sonucuna varılmıştır.
	Ayodele & Petla (2024) [56]	Uluslararası siber güvenlik iş birliği	BRICS Dijital Ekonomi Ortaklığı çerçevesinde veri paylaşımı ve koruma konularında kolektif yaklaşımlar önerilmiştir.
Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Dijital Dönüşüm	Sánchez et al. (2022); Adhichandra et al. (2024) [57],[58]	IoT ve Endüstri 4.0 entegrasyonu	IoT'nin KOBİ'lerde verimlilik ve müşteri etkileşimini artırdığı belirtilmiştir.
	Liu et al. (2021); Romanova & Igishev (2025) [59],[60]	IoT tabanlı üretim sistemleri	IoT ve bulut bilişimin operasyonel optimizasyon ve süreç yönetimini geliştirdiği saptanmıştır.
	Hamed & Farah (2025); Krotkiewicz et al. (2025) [61],[62]	IoT'nin sağlık sistemlerindeki kullanımı	IoT'nin sağlık verilerinin bütünsel yönetimini kolaylaştırdığı, hasta etkileşimini artırdığı ifade edilmiştir.
	Pasupuleti (2024); Widiarta (2025) [63],[64]	IoT'nin tarım ve sürdürülebilirlik uygulamaları	IoT tabanlı hassas tarımın üretkenliği artırdığı ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığı belirtilmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Mevcut literatür, dijital dönüşümün farklı sektörlerdeki etkisini kapsamlı biçimde incelemiş olsa da, çalışmalar genel olarak bazı yapısal ve metodolojik eksiklikler taşımaktadır. Öncelikle, ileri düzey dijital teknolojilerin entegrasyonuna ilişkin araştırmalarda bütüncül bir referans çerçevesi bulunmamaktadır. Yapay zekâ, bulut bilişim, blokzincir, büyük veri ve IoT gibi teknolojiler çoğunlukla birbirinden bağımsız biçimde ele alınmakta; bu teknolojilerin etkileşimlerini ve birleşik etkilerini modelleyen sistematik mimariler yeterince geliştirilememiştir. Ayrıca, bu teknolojilerin işletme verimliliği, maliyet optimizasyonu veya sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini nedensel olarak ortaya koyan uzunlamasına ve karşılaştırmalı çalışmalar sınırlıdır. İnsan faktörü, örgütsel dönüşüm ve dijital yetkinlik konuları çoğunlukla nitel düzeyde tartışılmakta, ölçülebilir metriklerle desteklenmemektedir.

Akıllı üretim ve dijital ikiz teknolojileri alanında yapılan çalışmalar, kavramsal düzeyde önemli bir ilerleme kaydetmiş olsa da, model doğrulama, gerçek zamanlı veri senkronizasyonu ve belirsizlik yönetimi gibi teknik konularda eksiklikler devam etmektedir. Dijital ikizlerin fiziksel sistemlerle tam senkronizasyonunu sağlayacak standart protokoller henüz yeterince gelişmemiştir. Bunun yanında, Endüstri 4.0 ekosisteminde birlikte çalışabilirliği (interoperability) tanımlayan uluslararası standartların sınırlı düzeyde uygulanması, farklı üretim sistemleri arasında veri bütünlüğünü zorlaştırmaktadır. Literatürde dijital ikiz teknolojilerinin ekonomik faydalarına dair sayısal veriler sunan karşılaştırmalı saha çalışmaları da oldukça azdır.

Sağlık sektöründeki dijital dönüşüm çalışmalarında ise en belirgin boşluk, birlikte çalışabilirlik ve veri yönetimi konularında ortaya çıkmaktadır. E-sağlık sistemlerinin birbirleriyle ve hastane altyapılarıyla entegrasyonunu kolaylaştıracak açık standartlar henüz tam anlamıyla yerleşmemiştir. Ayrıca, dijital sağlık okuryazarlığının artırılmasına yönelik sistematik eğitim çerçeveleri ve bu müdahalelerin etkinliğini ölçen kanıta dayalı çalışmalar eksiktir. Dijital sağlık uygulamalarının eşitsizlikleri azaltma veya sağlık hizmetlerine erişimi artırma potansiyeli teorik olarak vurgulansa da, düşük ve orta gelirli ülkelerde bu dönüşümün erişim adaleti ve veri önyargısı üzerindeki etkileri yeterince araştırılmamıştır. Klinik çıktılar üzerindeki doğrudan etkileri inceleyen deneysel veya yarı-deneysel çalışmalar da oldukça sınırlıdır.

Elektronik ölçüm ve enstrümantasyon alanında, yeni geliştirilen sensör ve ölçüm cihazlarının izlenebilir kalibrasyon zincirleri, belirsizlik analizleri ve uzun dönem dayanıklılık karakterizasyonları konusunda eksiklikler mevcuttur. Yüksek sıcaklık, manyetik gürültü veya kimyasal açıdan zorlu ortamlar için geliştirilen sistemlerin uzun süreli güvenilirliği yeterince test edilmemektedir. Ayrıca çoklu ölçüm tekniklerinin (örneğin biyoimpedans, dielektrik spektroskopi, elektriksel tomografi) birlikte kullanıldığı veri füzyonu çalışmaları oldukça azdır. Gerçek zamanlı veri toplama süreçlerinde örnekleme hızı, senkronizasyon ve gecikme analizleri çoğu zaman göz ardı edilmekte, ölçüm doğruluğuna ilişkin açık veri kümeleri ve yeniden üretilebilir karşılaştırmalar sınırlı kalmaktadır.

Siber güvenlik ve dijital yönetim literatüründe de önemli metodolojik boşluklar göze çarpmaktadır. Kamu kurumları ve küçük işletmeler için geliştirilen siber güvenlik olgunluk modelleri bağlamdan bağımsız ve genelleştirilmiş düzeyde kalmakta, sektörel farklılıkları yeterince yansıtmamaktadır. Siber güvenlik politikalarının e-devlet hizmet kalitesi, vatandaş güveni veya işlem verimliliği üzerindeki doğrudan etkilerini ölçen ampirik bulgular oldukça sınırlıdır. Ayrıca, insan faktörü ve örgüt kültürünün güvenlik davranışları üzerindeki uzun vadeli etkilerini değerlendiren çalışmalar yetersizdir. Uluslararası düzeyde veri paylaşımı, siber suçların sınır ötesi takibi ve çok taraflı müdahale mekanizmaları için oluşturulan işbirliği modelleri de uygulama düzeyinde yeterince test edilmemiştir.

Nesnelerin İnterneti (IoT) ve dijital dönüşüm ilişkisini ele alan çalışmalar ise çoğunlukla teknolojik uygulama düzeyinde kalmakta, güvenlik, enerji verimliliği ve veri gizliliği arasındaki dengeyi sistematik biçimde ele alan araştırmaların eksik olduğu görülmektedir. IoT sistemlerinin geniş ölçekli uygulamalarında cihaz yaşam döngüsü yönetimi, yazılım güncellemeleri ve versiyon kontrolü gibi operasyonel konular sınırlı biçimde ele alınmaktadır. Ayrıca, uç (edge) ve bulut (cloud) bilişim arasındaki görev paylaşımının optimizasyonu ve bunun maliyet, gecikme ve doğruluk üzerindeki etkilerini analiz eden karar modelleri yeterince geliştirilmemiştir. Farklı üreticilerden gelen verilerde semantik uyum ve ontolojik bütünlük sorunları devam etmekte, veri kalitesi standardizasyonu henüz tam olarak

sağlanamamaktadır. Tarım ve sağlık sektörlerinde ise IoT uygulamalarının ekonomik veya çevresel etkilerini uzun vadeli olarak değerlendiren ampirik araştırmaların azlığı dikkat çekmektedir.

Tablo 2’de dijital dönüşüm elektroniği ile ilgili çalışmaların eksiklikleri ve yenilik önerileri gösterilmektedir.

Tablo 2. Dijital dönüşüm literatürünün tematik özeti

Tematik Alan	Literatürün Odak Noktası	Belirlenen Eksiklikler	Yenilik Önerileri
İleri Düzey Dijital Teknolojilerin Entegrasyonu	Yapay zekâ, bulut bilişim, büyük veri ve blokzincir teknolojilerinin işletme verimliliği, inovasyon ve rekabet gücü üzerindeki etkileri incelenmiştir.	Teknolojiler arası entegrasyon modelleri eksik; dijital dönüşüm yatırımlarının ekonomik ve çevresel etkileri yetersiz analiz edilmiştir; insan-örgüt etkileşimi az incelenmiştir.	Çok katmanlı hibrit entegrasyon mimarileri geliştirmek; dijital olgunluk göstergeleriyle ROI ve sürdürülebilirlik ölçümlerini birleştiren karar destek sistemleri tasarlamak; sosyo-teknik dönüşüm endeksleri oluşturmak.
Akıllı Üretim ve Dijital İkiz Teknolojisi	Dijital ikizlerin üretim hatlarında verimlilik, kestirimci bakım ve optimizasyon üzerindeki rolü araştırılmıştır.	Model doğrulama ve veri senkronizasyonu eksik; ekonomik etkiyi kanıtlayan saha verileri az; güvenli model güncelleme ve siber-fiziksel dayanıklılık sınırlı incelenmiştir.	Gerçek zamanlı senkronizasyonu sağlayan düşük gecikmeli iletişim altyapıları geliştirmek; güvenli dijital ikiz güncellemeleri için blokzincir ve yapay zekâ tabanlı doğrulama mekanizmaları tasarlamak; sürdürülebilir üretim etkilerini kantitatif olarak analiz etmek.
Sağlık Sektöründe Dijital Dönüşüm	E-sağlık sistemleri, tele-tıp, elektronik kayıt sistemleri ve AI tabanlı teşhis araçları üzerinde yoğunlaşmıştır.	Veri bütünlüğü, standart eksikliği, dijital okuryazarlık farkı, etik yönetim ve erişim adaleti sınırlı ele alınmıştır; klinik etkiler ampirik olarak az incelenmiştir.	HL7-FHIR tabanlı açık kaynaklı sağlık bilgi sistemleri geliştirmek; dijital sağlık eğitimi için etkileşimli öğrenme platformları tasarlamak; etik ve açıklanabilir yapay zekâ modelleriyle hasta güvenliğini güçlendirmek.
Elektronik Ölçüm ve Enstrümantasyon Teknikleri	Biyoimpedans, dielektrik spektroskopisi, ERT ve yüksek hassasiyetli sensör sistemleri üzerine odaklanılmıştır.	Uzun dönem kalibrasyon, belirsizlik analizi ve yüksek sıcaklık gibi zorlu ortamlarda dayanıklılık verileri eksiktir; veri füzyonu ve açık kıyas setleri yetersizdir.	Kendini kalibre eden sensör ağları geliştirmek; yapay zekâ destekli hata tespiti ve veri füzyonu algoritmaları tasarlamak; açık erişimli kalibrasyon veri setleri oluşturarak yeniden üretilebilirlik sağlamak.
Siber Güvenlik ve Dijital Yönetişim	E-devlet hizmetlerinde siber güvenlik politikalarının ve yönetim stratejilerinin etkileri incelenmiştir.	Ampirik etki analizleri az; davranışsal güvenlik ve insan faktörü ihmal edilmiş; sınır ötesi veri paylaşımı ve risk tabanlı yönetim modelleri sınırlıdır.	Yapay zekâ destekli tehdit tespiti ve risk tahmin sistemleri kurmak; insan merkezli, katılımcı yönetim modelleri geliştirmek; uluslararası düzeyde veri koruma iş birliklerini güçlendirmek.
Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Dijital Dönüşüm	IoT’nin üretim, sağlık ve tarım gibi sektörlerde operasyonel verimlilik ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır.	Güvenlik, enerji verimliliği ve veri gizliliği arasında dengenin incelenmemesi; cihaz yaşam döngüsü yönetimi ve veri standardizasyonu eksikliği; semantik uyum sorunları.	Kaynak kısıtlı cihazlar için hafif kriptografi ve enerji duyarlı iletişim protokolleri geliştirmek; uç-bulut bilişim görev paylaşımını optimize eden karar modelleri tasarlamak; sektörler arası

			semantik veri standartları ve ontolojiler oluşturmak.
--	--	--	---

Yapılan literatür incelemesi, dijital dönüşümün farklı sektörlerde önemli ilerlemelere yol açtığını göstermesine karşın, çalışmaların genelinde parçalı ve teknoloji merkezli bir yaklaşımın öne çıktığını ortaya koymaktadır. Yapay zekâ, IoT, blokzincir, dijital ikiz veya bulut bilişim gibi teknolojiler çoğunlukla birbirinden bağımsız ele alınmakta; bu durum, dijital dönüşümün çok boyutlu doğasını bütüncül biçimde anlamayı zorlaştırmaktadır. Literatürde özellikle birlikte çalışabilirlik, veri standardizasyonu, ölçülebilir etki analizi ve insan–organizasyon etkileşimi konularında belirgin boşluklar bulunmaktadır. Çoğu araştırma kavramsal veya teknik düzeyde kalmakta, uzun dönemli saha çalışmaları, ekonomik fizibilite değerlendirmeleri ve sürdürülebilirlik etkileri açısından sınırlı kalmaktadır. Bu durum, dijital dönüşümün yalnızca teknolojik bir değişim değil, aynı zamanda kurumsal ve kültürel bir yeniden yapılanma süreci olduğunu göz ardı eden bir eğilimi ortaya koymaktadır. Öte yandan, akıllı üretim ve dijital ikiz uygulamalarında model doğrulama, veri güvenliği ve ekonomik etki ölçümü, sağlık alanında veri yönetimi ve dijital okuryazarlık, enstrümantasyonda ölçüm güvenilirliği ve kalibrasyon izlenebilirliği, siber güvenlikle davranışsal faktörlerin entegrasyonu, ve IoT alanında enerji verimliliği ile gizlilik dengesinin sağlanması gibi konuların hâlen yeterince olgunlaşmadığı görülmektedir. Bu nedenlerle, mevcut literatür daha çok teknolojik başarı hikâyelerine odaklanmakta; ölçülebilir performans, sürdürülebilirlik, insan faktörü ve yönetim bileşenleri arasındaki bütünleşik ilişkileri yeterince açıklayamamaktadır.

Tüm bu temalar birlikte değerlendirildiğinde, dijital dönüşüm literatüründe ortak ve çapraz eksiklikler de göze çarpmaktadır. Öncelikle, farklı disiplin ve sektörleri kapsayan açık veri kümeleri ve karşılaştırmalı değerlendirme standartları yetersizdir. Veri biçimleri, API protokolleri ve ontolojik şemalar arasında bütüncül bir standardizasyon bulunmamaktadır. Yapay zeka tabanlı sistemlerde açıklanabilirlik, adillik ve güvenilirlik boyutlarının derinlemesine incelendiği uygulamalı araştırmalar sınırlıdır. Ayrıca, teknolojik dönüşümün yaşam döngüsü etkileri (özellikle enerji verimliliği, e-atık yönetimi ve döngüsel ekonomi) çoğu çalışmada niteliksel düzeyde ele alınmakta, kantitatif göstergelerle desteklenmemektedir. Son olarak, teknik gelişmeler ile sosyo-politik faktörleri birlikte değerlendiren disiplinlerarası yaklaşımlar henüz yeterince olgunlaşmamıştır.

IV. SONUÇLAR

Dijital dönüşüm literatürü, teknolojik gelişmelerin hızına paralel olarak sürekli genişleyen ve derinleşen bir yapıdadır. Bununla birlikte, mevcut araştırmaların ortaya koyduğu sınırlılıklar, gelecekteki çalışmalar için önemli fırsat alanları sunmaktadır. Bu fırsatlar, yalnızca yeni teknolojilerin geliştirilmesini değil, aynı zamanda bu teknolojilerin sosyo-teknik sistemlerle bütünleşmesini ve sürdürülebilir bir dijital ekosisteme katkı sağlamasını hedeflemektedir.

Öncelikle, ileri düzey dijital teknolojilerin entegrasyonu alanında yapılacak çalışmaların, yapay zekâ, bulut bilişim, blokzincir, büyük veri ve IoT'nin birlikte çalıştığı çok katmanlı hibrit mimariler üzerine yoğunlaşması beklenmektedir. Gelecekteki araştırmalar, bu teknolojilerin eşzamanlı entegrasyonunu kolaylaştıran bütünleşik referans modeller ve dijital olgunluk çerçeveleri geliştirmelidir. Ayrıca, dijital dönüşüm yatırımlarının ekonomik ve çevresel etkilerini ölçebilecek nicel performans göstergeleri (örneğin ROI, enerji verimliliği endeksleri, karbon azaltım oranları) tanımlanarak karar destek mekanizmalarına entegre edilmelidir. İnsan faktörünü daha görünür kılmak amacıyla, organizasyonel değişim ve dijital yetkinlik gelişimini ölçen sosyoteknik endekslerin geliştirilmesi de gelecekteki çalışmalar için önemli bir araştırma yönü olacaktır.

Akıllı üretim ve dijital ikiz teknolojileri bağlamında gelecekteki araştırmalar, fiziksel ve dijital varlıklar arasındaki gerçek zamanlı veri senkronizasyonunu artıracak düşük gecikmeli iletişim altyapılarına ve kenar bilişim (edge computing) tabanlı adaptif kontrol sistemlerine odaklanmalıdır. Dijital ikizlerin doğrulama ve güvenlik boyutlarında, siber-fiziksel saldırı dayanıklılığı, güvenli model güncelleme ve açıklanabilir simülasyon modelleri gibi yeni araştırma eksenleri geliştirilmelidir. Ayrıca, dijital ikiz

teknolojilerinin ekonomik etkilerini ölçen deneysel saha çalışmaları ve bu sistemlerin karbon ayak izi üzerindeki etkilerini değerlendiren sürdürülebilirlik analizleri literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

Sağlık sektöründe dijital dönüşüm alanında gelecekteki çalışmalar, birlikte çalışabilirlik sorununu aşmak için HL7-FHIR, ISO 82304 gibi uluslararası standartlara dayalı, açık kaynaklı ve modüler sağlık bilgi sistemleri geliştirmeye yönelmelidir. Dijital sağlık okuryazarlığını artırmak için eğitim ve simülasyon tabanlı öğretim platformlarının geliştirilmesi; bu platformların etkinliğini ölçen uzunlamasına (longitudinal) çalışmaların yürütülmesi önemlidir. Ayrıca, yapay zekâ destekli teşhis sistemlerinin etik, açıklanabilir ve güvenli kullanımını garanti altına alan yönetim çerçevelerinin geliştirilmesi, gelecekteki literatürde öne çıkması beklenen konulardan biridir. Sağlık hizmetlerinin dijitalleşmesi sürecinde eşitsizliklerin azaltılmasına ve erişim adaletine odaklanan sosyoekonomik çalışmalar da bu alana yenilikçi bir boyut kazandıracaktır.

Elektronik ölçüm ve enstrümantasyon teknikleri açısından, gelecekteki araştırmaların yüksek sıcaklık, manyetik gürültü ve kimyasal etkileşim gibi zorlu koşullarda çalışabilecek dayanıklı sensör malzemeleri ve akıllı kalibrasyon algoritmaları geliştirmeye yönelmesi beklenmektedir. Gerçek zamanlı ölçüm sistemlerinde yapay zekâ destekli hata tespiti, kendini kalibre eden sensör ağları ve veri füzyonuna dayalı çok modaliteli ölçüm yaklaşımları öne çıkacaktır. Ayrıca, ölçüm doğruluğunu artırmak amacıyla açık erişimli kalibrasyon veri setleri ve yeniden üretilebilir deney protokolleri oluşturulması, literatürün metodolojik güvenilirliğini güçlendirecektir.

Siber güvenlik ve dijital yönetim alanında gelecekteki yeniliklerin, teknik ve hukuki alanların ötesine geçerek insan merkezli, katılımcı yönetim modellerine odaklanması gerekmektedir. Kamu kurumları, KOBİ'ler ve kritik altyapı sektörleri için bağlama duyarlı siber güvenlik olgunluk modelleri ve risk tabanlı önceliklendirme sistemleri geliştirilmelidir. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı proaktif tehdit tespit sistemleri, geleceğin siber güvenlik literatüründe belirleyici rol oynayacaktır. Ayrıca, uluslararası düzeyde veri paylaşımı ve siber suçlarla mücadeleyle yönelik bölgesel iş birliği ağları (örneğin BRICS, AB Siber Dayanıklılık çerçeveleri) genişletilerek karşılıklı güven ve müdahale kapasitesi güçlendirilebilir.

Nesnelerin İnterneti (IoT) temelli dijital dönüşüm çalışmalarında ise gelecek araştırmaların yönü, güvenlik, enerji verimliliği ve veri gizliliği arasındaki optimum dengeyi sağlayan mimarilerin tasarımına odaklanmalıdır. Bu doğrultuda, kaynak kısıtlı cihazlar için hafif kriptografi çözümleri, enerjiye duyarlı veri iletim protokolleri ve otonom ağ yönetim sistemleri geliştirilebilir. Ayrıca, uç (edge) ve bulut (cloud) bilişim arasındaki görev dağılımını optimize eden uyarlanabilir karar modelleri ve yapay zekâ tabanlı kaynak planlama algoritmaları geliştirilmelidir. IoT verilerinin standardizasyonu için semantik veri modelleri ve sektörler arası ontolojiler oluşturmak, farklı üretici sistemleri arasındaki birlikte çalışabilirliği güçlendirecektir. Tarım ve sağlık gibi alanlarda IoT uygulamalarının çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik etki analizlerine yönelik uzun dönemli ampirik çalışmalar da gelecekteki araştırma gündeminde yer almalıdır.

Bütün bu temalar birlikte ele alındığında, geleceğin dijital dönüşüm literatürünün yalnızca teknolojik ilerlemelere odaklanmakla kalmayıp; sosyo-teknik bütünleşme, sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve etik yönetim unsurlarını merkeze alan daha bütüncül bir yapıya evrilmesi gerekmektedir. Disiplinler arası iş birlikleriyle yürütülecek, hem teknik doğruluk hem de toplumsal etkiyi ölçen yeni nesil çalışmalar; dijital dönüşümün sürdürülebilir, güvenli ve insan odaklı bir geleceğe yönelmesini sağlayacaktır.

Gelecekteki araştırmaların, teknoloji odaklı yaklaşımlardan öteye geçerek insan, kurum ve çevre arasındaki etkileşimi bütüncül biçimde ele alan sosyo-teknik ve disiplinler arası modeller geliştirmesi gerekmektedir. Böylelikle dijital dönüşüm, yalnızca üretim süreçlerinin değil, aynı zamanda toplumsal yapının da sürdürülebilir biçimde yeniden şekillendiği bir paradigma haline gelebilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Nguyen, Hoang Viet, et al. "Evaluating the impact of e-service quality on customer intention to use video teller machine services." *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 8.3 (2022): 167.

- [2] Nadeem, A., Abedin, B., Cerpa, N., & Chew, E. (2018). Digital transformation & digital business strategy in electronic commerce-the role of organizational capabilities. *Journal of theoretical and applied electronic commerce research*, 13(2), i-viii.
- [3] Cao, X., Xu, L., & Duan, Q. (2022). EM Algorithm-Based Enterprise Digital Transformation: Green Innovation Efficiency of Enterprise Investment. *Mathematical problems in engineering*, 2022(1), 8782652.
- [4] Novitasari, D., Bangun, W., & Malinda, M. (2025). Transforming healthcare performance: the intersection of digital innovation and organizational commitment in laboratory and radiology departments. *International Journal of Social Science Humanity & Management Research*, 04(01). <https://doi.org/10.58806/ijsshmr.2025.v4i1n06>.
- [5] Negro-Calduch, E., Azzopardi-Muscat, N., Krishnamurthy, R. S., & Novillo-Ortiz, D. (2021). Technological progress in electronic health record system optimization: Systematic review of systematic literature reviews. *International journal of medical informatics*, 152, 104507.
- [6] Faifer, M., Toscani, S., & Ottoboni, R. (2011). Electronic combined transformer for power-quality measurements in high-voltage systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(6), 2007-2013. <https://doi.org/10.1109/tim.2011.2115650>.
- [7] Feng, Q. L. and Zhang, H. (2012). Design of an electronic voltage transformer suitable for digital transformer substation. *Applied Mechanics and Materials*, 182-183, 665-669. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.182-183.665>.
- [8] Zhang, M., Li, K., Wang, J., & He, S. (2014). An on-site calibration system for electronic instrument transformers based on labview. *Metrology and Measurement Systems*, 21(2), 257-270. <https://doi.org/10.2478/mms-2014-0022>.
- [9] Binsaeed, R. H., Yousaf, Z., Grigorescu, A., Samoila, A., Chițescu, R. I., & Nassani, A. A. (2023). Knowledge sharing key issue for digital technology and artificial intelligence adoption. *Systems*, 11(7), 316. <https://doi.org/10.3390/systems11070316>.
- [10] Mulyani, R. H. S., Gaol, F. L., & Matsuo, T. (2023). Digital transformation governance at the organization using it infrastructure library framework. *Emerging Science Journal*, 7(6), 1954-1975. <https://doi.org/10.28991/esj-2023-07-06-07>.
- [11] Chaplaev, H. G., Mazhiev, K., & Идигова, Л. (2023). Use of digital technologies in human resources management. *SHS Web of Conferences*, 164, 00027. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202316400027>.
- [12] Mohammadi, S., Heidari, A., & Navkhsi, J. (2023). Proposing a framework for the digital transformation maturity of electronic sports businesses in developing countries. *Sustainability*, 15(16), 12354. <https://doi.org/10.3390/su151612354>.
- [13] Yao, L., Liu, Y., Wang, T., Han, C., Li, Q., You, X., ... & Wang, Y. (2025). Global trends of big data analytics in health research: a bibliometric study. *Frontiers in Medicine*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1456286>.
- [14] Srisawat, S., Wannapiroon, P., & Nilsook, P. (2024). Distributed digital enterprise architecture for transformation of educational organizations. *TEM Journal*, 1645-1657. <https://doi.org/10.18421/tem132-77>.
- [15] Liu, Z. (2023). Research on the path of digital transformation in chinese higher education. *Adult and Higher Education*, 5(18). <https://doi.org/10.23977/aduhe.2023.051814>.
- [16] Marino, A., Pariso, P., & Picariello, M. (2024). Digital twin in smes: implementing advanced digital technologies for engineering advancements. *Macromolecular Symposia*, 413(3). <https://doi.org/10.1002/masy.202300176>.
- [17] Olanipekun, A. O. and Sutrisna, M. (2021). Facilitating digital transformation in construction—a systematic review of the current state of the art. *Frontiers in Built Environment*, 7. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.660758>.
- [18] Stennikov, V., Voropai, N., Barakhtenko, E., Sokolov, D., Voitov, O., & Zhou, B. (2020). Application of digital technologies for expansion planning of integrated energy systems. *E3S Web of Conferences*, 209, 02003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020902003>.
- [19] Liao, J. (2024). Enabling a sustainable digital transformation. *Journal of Latin American Sciences and Culture*, 6(9), 33-43. <https://doi.org/10.52428/27888991.v6i9.1192>.
- [20] Hsiao, M. (2024). Resource integration and firm performance through organizational capabilities for digital transformation. *Digital Transformation and Society*. <https://doi.org/10.1108/dts-07-2023-0050>.
- [21] Choori, A. and Kazemi, S. (2023). Strategic management in the digital age: a review of decision-making frameworks. *International Journal of Innovation Management and Organizational Behavior*, 3(2), 21-32. <https://doi.org/10.61838/kman.ijimob.3.2.4>.
- [22] Chen, J., Zhao, Y., Huo, D., Ma, Z., Xi, B., & Ma, C. (2024). Design and modeling of process manufacturing-oriented digital twin system.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5244060/v1>.
- [23] Schmetz, A., Lee, T. H., Hoeren, M., Berger, M., Ehret, S., Zontar, D., ... & Brecher, C. (2020). Evaluation of industry 4.0 data formats for digital twin of optical components. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7(3), 573-584. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00196-5>.
- [24] Tang, Q., Wu, B., Chen, W., & Yue, J. (2023). A digital twin-assisted collaborative capability optimization model for smart manufacturing system based on elman-ivif-topsis. *IEEE Access*, 11, 40540-40564. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3269577>.
- [25] Liu, H., Xia, M., Williams, D., Sun, J., & Yan, H. (2022). Digital Twin-Driven Machine Condition Monitoring: A Literature Review. *Journal of Sensors*, 2022(1), 6129995.
- [26] Methuselah, J. M. J. (2024). Digital twin technology for smart manufacturing. *Journal of Technology and Systems*, 6(4), 52-65. <https://doi.org/10.47941/jts.2143>.

- [27] He, B. and Bai, K. (2020). Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review. *Advances in Manufacturing*, 9(1), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00302-5>.
- [28] Badakhshan, E. and Ball, P. (2021). Reviewing the application of data driven digital twins in manufacturing systems: a business and management perspective. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 256-265. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85910-7_27.
- [29] Huang, S., Wang, G., Lei, D., & Yan, Y. (2022). Toward digital validation for rapid product development based on digital twin: a framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(3-4), 2509-2523. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08475-4>.
- [30] Kenett, R. S. and Bortman, J. (2021). The digital twin in industry 4.0: a wide-angle perspective. *Quality and Reliability Engineering International*, 38(3), 1357-1366. <https://doi.org/10.1002/qre.2948>.
- [31] Song, M., Wang, S., Fei, Y., & Jiao, J. (2023). Digital twin enhanced smart assembly system design and analysis for resilient operations. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. <https://doi.org/10.46254/au02.20230274>.
- [32] Leonardsen, A. L., Hardeland, C., Helgesen, A. K., & Grøndahl, V. A. (2020). Patient experiences with technology enabled care across healthcare settings- a systematic review. *BMC Health Services Research*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12913-020-05633-4>.
- [33] Tucmeanu, R. E., Tucmeanu, A. I., Iliescu, M. G., Żywiołek, J., & Yousaf, Z. (2022). Successful management of it projects in healthcare institutions after covid-19: role of digital orientation and innovation adaption. *Healthcare*, 10(10), 2005. <https://doi.org/10.3390/healthcare10102005>.
- [34] Sony, M., Antony, J., & Tortorella, G. L. (2023). Critical success factors for successful implementation of healthcare 4.0: a literature review and future research agenda. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4669. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054669>.
- [35] Schmitter, P. and Ashworth, S. (2023). Digitally transforming facility management in healthcare: a systematic review of key digital technologies and systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1176(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1176/1/012012>.
- [36] Busse, T. S., Nitsche, J., Kernebeck, S., Jux, C., Weitz, J., Ehlers, J. P., ... & Bork, U. (2022). Approaches to improvement of digital health literacy (ehl) in the context of person-centered care. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14), 8309. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148309>.
- [37] Wieslander, L., Bäckström, I., & Häggström, M. (2024). Participation in the digital transformation of healthcare: a review of qualitative studies. *International Journal of Health Care Quality Assurance*, 37(3/4), 68-84. <https://doi.org/10.1108/ijhcqa-03-2024-0021>.
- [38] Mather, C. and Almond, H. (2022). Using compass (context optimisation model for person-centred analysis and systematic solutions) theory to augment implementation of digital health solutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7111. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127111>.
- [39] Mather, C., Bailey, J. F., & Almond, H. (2023). Digital transformation of health professionals: using the context optimisation model for person-centred analysis and systematic solutions (compass) implementation model use case. *Knowledge*, 3(4), 679-687. <https://doi.org/10.3390/knowledge3040042>.
- [40] Al-Jaroodi, J., Mohamed, N., & AbuKhoua, E. (2020). Health 4.0: on the way to realizing the healthcare of the future. *IEEE Access*, 8, 211189-211210. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3038858>.
- [41] Amini, M., Hisdal, J., & Kalvøy, H. (2018). Applications of bioimpedance measurement techniques in tissue engineering. *Journal of Electrical Bioimpedance*, 9(1), 142-158. <https://doi.org/10.2478/joeb-2018-0019>.
- [42] Wu, H., Zhou, W., Yang, Y., Jia, J., & Bagnaninchi, P. (2018). Exploring the potential of electrical impedance tomography for tissue engineering applications. *Materials*, 11(6), 930. <https://doi.org/10.3390/ma11060930>.
- [43] Almeida, E. C., Pereira, G. G., Reis, W. M. d., & Silva, J. C. d. (2023). Study of equipment to measure quantities related to electricity in a three-phase engine. *Academic Journal on Computing, Engineering and Applied Mathematics*, 4(2), 13-16. <https://doi.org/10.20873/ufc.2675-3588.2023.v4n2.p13-16>.
- [44] Ducommun, P., Kadouri, A., Stockar, U. v., & Marison, I. W. (2001). On-line determination of animal cell concentration in two industrial high-density culture processes by dielectric spectroscopy. *Biotechnology and Bioengineering*, 77(3), 316-323. <https://doi.org/10.1002/bit.1197>.
- [45] Cilliers, J., Xie, W., Neethling, S., Randall, E., & Wilkinson, A. (2001). Electrical resistance tomography using a bi-directional current pulse technique. *Measurement Science and Technology*, 12(8), 997-1001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/8/302>.
- [46] Lanza, L. G., Merlone, A., Cauteruccio, A., Chinchella, E., Stagnaro, M., Dobre, M., ... & Parrondo, M. (2021). Calibration of non-catching precipitation measurement instruments: a review. *Meteorological Applications*, 28(3). <https://doi.org/10.1002/met.2002>.
- [47] Wang, D., Hu, R., Xie, P., & Li, Z. (2020). A novel calibration method for atmospheric no3 radical via high reflectivity cavity. *Measurement Science and Technology*, 31(8), 085801. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab8833>.
- [48] Hernández, D., Boeck, T., Karcher, C., & Wondrak, T. (2017). Numerical and experimental study of the effect of the induced electric potential in lorentz force velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 29(1), 015301. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9095>.

- [49] AL-Hawamleh, A. (2024). Investigating the multifaceted dynamics of cybersecurity practices and their impact on the quality of e-government services: evidence from the ksa. *Digital Policy, Regulation and Governance*, 26(3), 317-336. <https://doi.org/10.1108/dprg-11-2023-0168>.
- [50] Siampondo, G. and Chansa, B. (2023). A study on the existing cybersecurity policies and strategies in combating increased cybercrime in zambia. *Journal of Information Security*, 14(04), 294-303. <https://doi.org/10.4236/jis.2023.144017>.
- [51] Nnenna, U. J., Perpetua, U. I., Nchaga, A. M., Hadijah, T., Mabonga, E., & Nyamboga, T. O. (2024). Cybersecurity measures in east african egovernment systems. *Iaa Journal of Social Sciences*, 10(2), 12-24. <https://doi.org/10.59298/iaajss/2024/102.122400000>.
- [52] Yamada, R. (2024). Impact of cybersecurity regulations on corporate compliance practices in japan. *International Journal of Law and Policy*, 9(2), 28-38. <https://doi.org/10.47604/ijlp.2705>.
- [53] Hasegawa, K., O'Brien, N., Prendergast, M., Ajah, C. A., Neves, A. L., & Ghafur, S. (2024). Cybersecurity interventions in health care organizations in low- and middle-income countries: scoping review. *Journal of Medical Internet Research*, 26, e47311. <https://doi.org/10.2196/47311>.
- [54] Benjamin, L. B., Adegbola, A. E., Amajuoyi, P., Adegbola, M. D., & Adeusi, K. B. (2024). Digital transformation in smes: identifying cybersecurity risks and developing effective mitigation strategies. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 19(2), 134-153. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2024.19.2.0084>.
- [55] D'Amico, G., L'Abbate, P., Liao, W., Yiğitcanlar, T., & Ioppolo, G. (2020). Understanding sensor cities: insights from technology giant company driven smart urbanism practices. *Sensors*, 20(16), 4391. <https://doi.org/10.3390/s20164391>.
- [56] Ayodele, O. and Petla, V. (2024). Leveraging the brics digital partnership for collaborative digital governance. *Journal of BRICS Studies*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.36615/feg0h138>.
- [57] Sánchez, D. T. P., Sarmiento, L. H. T., Cuadros, J. D. O., & Guerrero, C. D. (2022). Chief information officer's role for iot-based digital transformation in colombian smes. *Revista Colombiana De Computación*, 23(2), 43-54. <https://doi.org/10.29375/25392115.4607>.
- [58] Adhichandra, I., Tanwir, T., Asfahani, A., Sitopu, J. W., & Irawan, F. (2024). Latest innovations in internet of things (iot): digital transformation across industries. *Innovative: Journal of Social Science Research*, 4(3), 1027-1037. <https://doi.org/10.31004/innovative.v4i3.10551>.
- [59] Liu, Y., Ni, Z., Karlsson, M., & Gong, S. (2021). Methodology for digital transformation with internet of things and cloud computing: a practical guideline for innovation in small- and medium-sized enterprises. *Sensors*, 21(16), 5355. <https://doi.org/10.3390/s21165355>.
- [60] Romanova, I. V. and Igishev, A. V. (2025). Implementation of the industrial internet of things to improve the management efficiency of high-tech production. *Ekonomika I Upravljenje: Problemy, Resheniya*, 6/3(159), 49-59. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.06.03.006>.
- [61] Hamed, K. M. B. and Farah, N. F. (2025). The internet of things applications: its effects, roles, and implications in libyan healthcare system. *Journal of Technology Research*, 5(1), 01-10. <https://doi.org/10.26629/jtr.2025.01>.
- [62] Krotkiewicz, M., Szykaruk, A., & Stachyra, A. (2025). Digital transformation in healthcare management: from artificial intelligence to blockchain. *Wiadomości Lekarskie*, (3), 578-583. <https://doi.org/10.36740/wlek/202445>.
- [63] Pasupuleti, M. K. (2024). Iot-driven transformation: advancing agriculture, smart cities, and digital security. *Smart IoT Solutions: Revolutionizing Agriculture, Urban Infrastructure, and Cybersecurity*, 1-11. <https://doi.org/10.62311/nexs/46059>.
- [64] Widiarta, I. P. G. D. (2025). Socioeconomics transformation through iot and deep learning-based digitalization: enhancing investment attractiveness in the livestock sector. *Journal of Tropical Animal Science and Technology*, 7(2), 30-43. <https://doi.org/10.32938/jtast.v7i2.9579>.