



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

Üretim ve İşlemler Yönetimi Bilim Dalı

**ELEKTRONİK ÜRETİM SEKTÖRÜNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN
TEDARİK ZİNCİRİ SÜREÇLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

İsa AKSU

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2026

ELEKTRONİK ÜRETİM SEKTÖRÜNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN TEDARİK ZİNCİRİ
SÜREÇLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

İsa AKSU

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Anabilim Dalı

Üretim ve İşlemler Yönetimi Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2026

KABUL VE ONAY

İsa AKSU tarafından hazırlanan “Elektronik Üretim Sektöründe Dijital Dönüşümün Tedarik Zinciri Süreçleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, 10.09.2026 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ayşegül Taş (Başkan)

Prof. Dr. Mine Ömürgönülşen (Üye)

Doç.Dr.Hatice Çalıpınar (Üye)

Prof. Dr. Mehmet Soysal (Üye)

Dr. Öğr. Üyesi Bülent Çekiç (Danışman)

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Uğur ÖMÜRGÖNÜLŞEN

Enstitü Müdürü

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H.Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ... ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

10/09/2026

İsa AKSU

¹ “Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü tezle ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir *. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlerle ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.
Madde 7.2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir

* Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu, **Dr. Öğr. Üyesi Bülent ÇEKİÇ** danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığını beyan ederim.

İsa AKSU

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince, hayatımın her anında olduğu gibi desteğini ve sevgisini yanımda hissettiren, bu süreci sabır ve anlayışla benimle birlikte paylaşan canım eşim İlvenur Aksu'ya ve kıymetli aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca bilgi birikimi, yönlendirmeleri ve değerli akademik katkılarıyla bana yol gösteren, kıymetli zamanını ve tecrübelerini benden esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bülent Çekiç'e teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Ayrıca, yüksek lisans sürecim boyunca edindiğim akademik ve mesleki birikimin oluşmasında katkısı bulunan tüm hocalarıma ve bu süreçte dolaylı ya da doğrudan destek veren herkese teşekkür ederim.

ÖZET

AKSU, İsa. *Elektronik Üretim Sektöründe Dijital Dönüşümün Tedarik Zinciri Süreçleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2026.

Dijital dönüşüm, son yıllarda literatürde yoğun biçimde ele alınmakla birlikte, elektronik üretim sektörü özelinde kalite performansı ve tedarik zinciri etkileşimi bağlamında nicel verilerle desteklenen uygulama çalışmalarının sınırlı olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasının amacı, elektronik üretim ortamında gerçekleştirilen veri odaklı dijital dönüşüm uygulamalarının kalite odaklı performans göstergeleri ve tedarik zinciri yönetimi üzerindeki etkilerini, gerçek fabrika verilerine dayalı bir proje uygulaması kapsamında incelemektir. Çalışma kapsamında dijital dönüşüm; üretim süreçlerinin veri temelli izlenebilirlik, karar destek ve sürekli iyileştirme yaklaşımıyla yeniden yapılandırılması olarak ele alınmıştır. Elektronik üretim hatlarından elde edilen operasyonel veriler kullanılarak, dijitalleşme öncesi ve sonrası süreçler kalite performans göstergeleri üzerinden karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analizler doğrudan üretim ve kalite yönetimi ekseninde gerçekleştirilmiştir. Araştırma yöntemi, ikincil kurumsal verilere dayalı tekil vaka çalışması ve nicel analiz yaklaşımı çerçevesinde yapılandırılmıştır. Dijital dönüşüm öncesi ve sonrası performans göstergeleri; öncesi-sonrası karşılaştırmalar, yüzde değişim, trend ve sektör bazlı analizler yoluyla değerlendirilmiş; aylık gözlem bulunan kalite göstergelerinde ise karşılaştırmalı değerlendirmeyi desteklemek amacıyla segmentli doğrusal regresyon analizinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda, ölçülen kalite göstergelerinin yalnızca operasyonel çıktılar olarak değil, aynı zamanda yönetsel karar mekanizmalarını destekleyen stratejik araçlar olarak ele alınması hedeflenmiştir. Araştırma sürecinde, Avrupa Birliği destekli dijital dönüşüm ve endüstriyel Ar-Ge projelerinde edinilen metodolojik ve yönetsel deneyimden yararlanılmış; bu birikim, başarı metriği tanımlama, veri bütünlüğü sağlama ve performans değerlendirme yaklaşımının şekillendirilmesinde referans alınmıştır. Elde edilen bulgular, dijital dönüşüm uygulamalarının devreye alınmasını izleyen dönemde kalite performansında ölçülebilir iyileşmeler gözlemlendiğini, süreç şeffaflığını artırdığını ve tedarik zinciriyle ilişkili üretim kararlarının daha etkin biçimde yönetilmesine olanak tanıdığını göstermektedir. Ayrıca, kalite odaklı dijitalleşmenin müşteri taleplerine yanıt verme hızını ve müşteri kazanımı süreçlerini dolaylı ancak stratejik biçimde desteklediği tespit edilmiştir. Bu tez çalışması, elektronik üretimde dijital dönüşümün kalite temelli somut etkilerini fabrika verileriyle ortaya koyması ve üretim ve işlemler yönetimi literatürüne uygulamaya dönük yönetsel çıkarımlar sunması açısından özgün bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar sözcükler

Elektronik Üretim, Dijital Dönüşüm, Tedarik Zinciri Yönetimi, Kalite Performansı, Segmentli Regresyon

ABSTRACT

AKSU, İsa. *Digital Transformation in the Electronics Manufacturing Industry and Its Effects on Supply Chain Processes: An Analysis*, Master's Thesis, Ankara, 2026.

Digital transformation has become a prominent topic in literature. However, quantitative empirical studies focusing on quality performance and supply chain interaction remain limited, particularly in the electronics manufacturing sector. This thesis examines the effects of data-driven digital transformation applications on quality-oriented performance indicators and supply chain management through a project-based case study using real factory data. Digital transformation is addressed not merely as the adoption of new technologies, but as the restructuring of production processes through data-driven traceability, decision-support mechanisms, and continuous improvement practices. Operational data from electronics production lines were used to compare pre- and post-digitalization periods based on quality indicators such as rework rates, defect density, process stability, and traceability. The analyses were conducted within the framework of production and quality management. The research was structured as a single-case study based primarily on secondary organizational data and a quantitative analytical approach. Performance indicators were evaluated through before-and-after comparisons, percentage changes, trend analyses, and sector-based comparisons. For quality indicators with monthly observations, segmented linear regression was also employed to support the comparative assessment. The indicators were considered both as operational outputs and as tools supporting managerial decision-making. Methodological and managerial experience gained from European Union-funded digital transformation and industrial R&D projects was utilized in defining KPIs, ensuring data integrity, and establishing the performance evaluation framework. The findings indicate that digital transformation applications are associated with measurable improvements in quality performance, increased process transparency, and more effective management of supply chain-related production decisions. Furthermore, quality-oriented digitalization was observed to support responsiveness to customer demands and customer acquisition processes. This thesis contributes to the literature by demonstrating the tangible effects of digital transformation on quality performance in electronics manufacturing using factory-level data and by providing practice-oriented managerial implications for production and operations management.

Keywords

Electronics Manufacturing, Digital Transformation, Supply Chain Management, Quality Performance, Segmented Regression

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI	ii
ETİK BEYAN	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
GRAFİKLER DİZİNİ	xiii
ÖNSÖZ.....	xiv
GİRİŞ	xv
1. BÖLÜM KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE LİTERATÜR TARAMASI.....	1
1.1. DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN TEMELLERİ	4
1.1.1. Endüstri 4.0 Unsurları	6
1.1.1.1. Nesnelerin İnterneti	6
1.1.1.2. Akıllı Fabrikalar	7
1.1.1.3. Siber-fiziksel sistemler	7
1.1.1.4. Eklemeli İmalat	7
1.1.1.5. Büyük veri ve analizi.....	7
1.1.1.6. Bulut Bilişim.....	8
1.1.1.7. Siber Güvenlik.....	8
1.1.1.8. Otonom Robotlar	8
1.1.1.9. Artırılmış Gerçeklik	8
1.1.1.10. Simülasyon.....	9
1.1.1.11. Sistem Entegrasyonu	9
1.1.1.12. Yapay Zeka	9
1.1.2. Endüstri 5.0 Geçişİ	10
1.1.3. Dünyadaki dijital dönüşüm	13
1.1.4. Türkiye’de Dijital Dönüşümün Güncel Durumu	16
1.2. DÜNYADA ELEKTRONİK ÜRETİM SEKTÖRÜ	19

1.3. TÜRKİYE’DE ELEKTRONİK ÜRETİM SEKTÖRÜ.....	21
1.4. TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM ETKİSİ.....	27
1.4.1. Elektronik Üretimde Tedarik Zinciri Zorlukları	29
1.4.2. Dijital Dönüşümün Tedarik Zinciri Yönetimine Etkileri	32
1.4.3. Performans Göstergeleri ve Ölçülebilir Etkiler.....	35
1.5. LİTERATÜR TARAMASI.....	36
1.6. DEĞERLENDİRME VE UYGULAMA ÇALIŞMASIYLA İLİŞKİSİ	54
2. BÖLÜM METODOLOJİ VE ANALİZ.....	56
2.1. ARAŞTIRMANIN GENEL TASARIMI	56
2.2. VERİ ANALİZİ YÖNTEMİ.....	57
2.3. ARAŞTIRMANIN ETİK KAPSAMI	63
2.4. FİRMA TANITIMI VE YAPISI.....	63
2.5. ELEKTRONİK ÜRETİM SÜREÇLERİNİN GENEL YAPISI	65
2.6. XYZ FİRMASI ÖRNEĞİ ÜZERİNDEN ELEKTRONİK ÜRETİM YAPISININ İNCELENMESİ.....	66
2.6.1. Elektronik Üretimin Genel Akışı ve Yapısal Çerçevesi.....	67
2.6.2. Tam Otomatik Dizgi Hatları (SMT Hatları)	68
2.6.3. Otomatik Hatlardan Yarı Otomatik Hatlara Geçiş Noktasının Analizi.....	71
2.6.4. Malzeme Hazırlık ve Hat Besleme Süreçleri	72
2.6.5. Manuel Montaj ve Operatör Rollerini	72
2.6.6. Görsel Kontrol, Kamera Destekli İnceleme	73
2.6.7. Üretim Kayıtları ve İzlenebilirlik.....	73
2.6.8. Roller, Yetkinlikler ve İnsan Faktörünün Üretim Sürecindeki Etkisi	73
2.6.9. Tanımlar ve Süreç Sözlüğü	75
2.6.10. UML Tabanlı Süreç Modelinin Açıklanması.....	79
2.6.11. Mevcut Durumun Genel Değerlendirmesi	80
2.7. DİJİTAL DÖNÜŞÜM UYGULAMALARI	80
2.7.1. Mevcut Durumun Sayısallaştırılması ve Süreç Şeffaflığının Sağlanması.....	81
2.7.2. Fiziksel Üretim Alanı Yerleşiminin Dijital Temelli İyileştirilmesi	82
2.7.3. Depo–Üretim Entegrasyonu ve Dijital Malzeme Yönetimi	82
2.7.4. Üretim Alanı Yerleşiminin Dijital Analiz ve Optimizasyon Yoluyla İyileştirilmesi	83
2.7.5. İş Emri Tabanlı Stok Kontrolü ve Planlama Entegrasyonu	85
2.7.6. Magazin, Market ve Yarı Mamul Akışının Dijital Takibi	85
2.7.7. Ağırlık Bazlı Magazin Takibi ve Kart Bazlı Çalışma Süresi Analizi	86

2.7.8.	İnsan ve Kritik Ekipman Takibine Yönelik Dijital Hazırlıklar	89
2.7.9.	Montaj Hattı Uygunluğunun İzlenmesi ve Üretim Ataması	90
2.7.10.	Sevkiyat Terminine Dayalı Önceliklendirilmiş Üretim Planlama	90
2.7.11.	Dijital İkiz, Yapay Zeka ve Analitik Yetkinliklerin Geliştirilmesi	91
2.7.12.	5G Destekli Endüstriyel IoT Altyapısına Yönelik Devam Eden Çalışmalar ...	92
2.8.	BÖLÜM DEĞERLENDİRMESİ	93
3.	BÖLÜM BULGULAR.....	94
3.1.	DİJİTAL DÖNÜŞÜM ÖNCESİ VE SONRASI GENEL PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI.....	94
3.2.	BAŞARI METRİKLERİNİN ZAMAN İÇİNDEKİ DEĞİŞİMİ.....	95
3.3.	KARŞILAŞTIRMALI TREND VE REGRESYON ANALİZİ	106
	SONUÇ VE TARTIŞMA	110
	KAYNAKÇA.....	114
	EK1 ORJİNALLİK FORMU	124
	EK 2 ETİK KURUL MUAFİYET FORMU	126

KISALTMALAR DİZİNİ

ERP	Kurumsal Kaynak Planlaması
ESD	Elektrostatik Deşarj
EUM	Elektronik Üretim Merkezi
FIFO	İlk Giren İlk Çıkar
KPI	Anahtar Performans Göstergesi
MTK	Üretim Süreci İzleme Etiketli
ODÜM	Otomatik Dizgi Üretim Merkezi
OEE	Toplam Ekipman Etkinliği
PPM	Milyonda Hata Sayısı
Rework	Yeniden İşleme
SCM	Tedarik Zinciri Yönetimi
SMT	Yüzeye Montaj Teknolojisi
UML	Birleşik Modelleme Dili
VIP	Özel Depolama Alanı
MES	Üretim Yürütme Sistemi
WMS	Depo Yönetim Sistemi
PLM	Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi
QMS	Kalite Yönetim Sistemi
ECO	Mühendislik Değişiklik Emri

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1 Endüstri Devrimleri Zaman Dilimi Tablosu	5
Tablo 2 Endüstri 4.0'ın Faydaları Tablosu	10
Tablo 3 Endüstri 4.0 ve 5.0 Kıyaslama Tablosu	12
Tablo 4:	37-43
Üretimde Dijital Dönüşüm Uygulamalarına İlişkin Literatür İncelemesi	
Tablo 5:	43-49
Elektronik Üretimde Dijital Dönüşüm Uygulamalarına İlişkin Literatür İncelemesi	
Tablo 6:	50-54
Elektronik Üretimde Dijital Dönüşüm Uygulamalarına İlişkin Yazılan Tezlerin İnceleme	
Tablo 7 Araştırmada Kullanılan Veri ve Performans Göstergeleri	61
Tablo 8 EUM (Tüketici Elektroniği), Kalite Ret Hata Pareto Analizi	97
Tablo 9 EUM (Tüketici Elektroniği), Müşteri İade Hata Pareto Analizi	98
Tablo 10 Savunma, Kalite Ret Hata Pareto Analizi	99
Tablo 11 Savunma, Müşteri İade Hata Pareto Analizi	100
Tablo 12 Otomotiv, Kalite Ret Hata Pareto Analizi	101
Tablo 13 Otomotiv, Müşteri İade Hata Pareto Analizi	102
Tablo 14 Telekomünikasyon, Kalite Ret Hata Pareto Analizi	103
Tablo 15 Temel Kalite Göstergelerinin 2023-2025 Dönemindeki Değişimi	106
Tablo 16 Aylık Kalite Göstergelerine İlişkin Regresyon Bulgularının Özeti	107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1 Geleneksel tedarik zincirinden dijital tedarik ağına geçiş	33
Şekil 2 UML Tabanlı Süreç Modelleme	78
Şekil 3 Hat Performans Ekranı	84
Şekil 4 Ağırlık Bazlı Magazin Takibi	86
Şekil 5 Kart Bazlı İşlem Süresi Dağılımı	87
Şekil 6 Kalite İç Ret Oranı	94
Şekil 7 Otomotiv, Kalite Performans PPM Oranı	101

GRAFİKLER DİZİNİ

Grafik 1 ODÜM Genel Hata Oranı	95
Grafik 2 Elektromekanik Üretim, Genel Hata Oranı	95
Grafik 3 Elektromekanik Üretim, Müşteri İade Oranı	96
Grafik 4 EUM (Tüketici Elektroniği), Kalite Performansı	97
Grafik 5 Savunma, Kalite Performans Oranı	99
Grafik 6 Telekomünikasyon, Kalite Performans Oranı	103
Grafik 7 EUM Performans Göstergeleri	104

ÖNSÖZ

Dijital dönüşüm, günümüz üretim işletmelerinde yalnızca teknolojik bir değişim süreci değil, aynı zamanda üretim ve kalite anlayışının yeniden yapılandırılmasını gerektiren bütüncül bir dönüşüm alanı olarak öne çıkmaktadır. Özellikle elektronik üretim sektörü; yüksek ürün çeşitliliği, kısa yaşam döngüleri ve kalite hassasiyeti nedeniyle dijitalleşmenin etkilerinin somut olarak gözlemlenebildiği önemli bir uygulama alanı sunmaktadır. Bu tez çalışması, dijital dönüşümün elektronik üretim ortamındaki yansımalarını, üretim ve işlemler yönetimi perspektifiyle ele alma ihtiyacından doğmuştur.

Çalışma sürecinde dijital dönüşüm, yalnızca teknoloji yatırımları kapsamında değil; üretim süreçlerinin izlenebilirliği, kalite performansının ölçülmesi ve karar alma mekanizmalarının veri temelli hale getirilmesi bağlamında değerlendirilmiştir. Tez kapsamında, gerçek bir elektronik üretim işletmesinde yürütülen proje uygulamasından elde edilen fabrika verileri kullanılarak kalite odaklı performans göstergeleri üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Odak, doğrudan üretim ve kalite yönetimi süreçleri ile sınırlandırılmıştır.

Bu çalışma, uygulamaya dayalı yapısı ve fabrika içi gerçek verilerle desteklenen analizleri sayesinde, dijital dönüşümün elektronik üretim sektöründeki somut etkilerinin anlaşılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Elde edilen bulguların, benzer dönüşüm süreçlerini planlayan üretim işletmeleri ve bu alanda çalışma yapan araştırmacılar için yol gösterici nitelikte olduğu değerlendirilmektedir.

Bu tez, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı Üretim ve İşlemler Yönetimi Bilim Dalı kapsamında, yüksek lisans eğitimi sürecinde edinilen teorik bilgi birikiminin uygulama ile bütünleştirilmesi amacıyla hazırlanmıştır.

GİRİŞ

Son yıllarda dijital dönüşüm; işletmelerin, kamu kurumlarının ve bireylerin çalışma biçimlerini köklü bir şekilde değiştirmiştir. Yapay Zeka (AI), büyük veri analitiği, bulut bilişim ve nesnelerin interneti (IoT) gibi teknolojiler, kurumsal süreçlerin merkezinde yer almakta ve operasyonel verimliliği artırmada kritik roller üstlenmektedir (Frank vd., 2019). Özellikle COVID-19 pandemisi sonrası dönemde hızlanan dijitalleşme dalgası, işletmelerin dinamik pazar koşullarına uyum sağlaması ve tedarik zinciri performansını koruması adına büyük ölçekli kurumsal dönüşümlere yol açmıştır (Mubarik vd., 2024).

Dijital dönüşümün son yıllarda en dikkat çekici yönlerinden biri, Yapay Zeka destekli otomasyonun yaygınlaşmasıdır. Özellikle üretimde Yapay Zeka tabanlı sistemler, operasyonel karar alma süreçlerini hızlandırmakta ve hata oranlarını yapısal olarak azaltmaktadır (Rashid ve Rasheed, 2026). Ayrıca, büyük veri ve makine öğrenmesi algoritmalarının gelişimi; çok aşamalı imalat hatlarında anomali tespiti yürütme, kestirimci bakım stratejileri kurgulama ve karmaşık operasyonel süreçleri optimize etme konusunda işletmelere yeni fırsatlar sunmaktadır (Manta-Costa vd., 2024). Bu dönüşüm süreci; özellikle çok katmanlı tedarik ağlarına, kısa ürün yaşam döngülerine, yüksek ürün çeşitliliğine ve yüksek kalite gereksinimlerine sahip elektronik üretim sektöründe daha kritik bir hâl almaktadır (Buer vd., 2021).

Ancak dijital dönüşümün getirdiği avantajların yanı sıra, siber güvenlik tehditleri ve veri gizliliği sorunları da giderek daha önemli hale gelmektedir. Dijital üretim ekosisteminin karmaşıklığı arttıkça, güvenlik ihlalleri ve veri hırsızlığı gibi siber risklerin etkisi de büyümekte, bu durum işletmeleri daha esnek ve güçlü güvenlik önlemleri almaya zorlamaktadır (Kumar vd., 2022). Özellikle dönüşümün getirdiği teknolojik adaptasyon süreçlerinde doğru insan kaynağını bulma, finansman/bilgi eksikliği ve kurumsal zihniyet değişimi gibi faktörlerin yanı sıra entegrasyon platformlarındaki kontrolsüz bilgi akışının yarattığı dikkat dağınıklığı, daha sürdürülebilir ve güvenli dijital politikaların benimsenmesini gerekli kılmaktadır (Barros ve Ramos, 2025).

Dijital dönüşümün bir diğer önemli bileşeni ise güncel (5G destekli IoT ve Yapay Zeka) teknolojilerin üretim süreçlerine entegrasyonudur. Akıllı üretim sistemleri siber-fiziksel

katmanların iş birliği sayesinde geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek verimlilik ve esneklik sağlamaktadır (ElMaraghy vd., 2021). Özellikle 5G teknolojisinin sunduğu düşük gecikme süresi ve yüksek bant genişliği, endüstriyel IoT cihazlarının gerçek zamanlı veri iletimi yapmasını ve dijital ikiz çözümlerinin üretim katmanıyla senkronize çalışmasını mümkün kılmaktadır (Nguyen vd., 2021). Bu gelişmeler, elektronik üretim başta olmak üzere birçok yüksek teknoloji sektöründe operasyonel verimliliği artırmakta, coğrafi konum tabanlı izlenebilirlik altyapısıyla tedarik zinciri yönetimini ve malzeme akışını optimize etmekte ve kaynak kullanımını daha sürdürülebilir hale getirmektedir (Beliatı vd., 2021).

Yapay Zeka ve derin öğrenme destekli üretim hatlarında gerçekleştirilen analizler, Otomatik Optik Muayene (AOI) doğruluğunu artırarak kalite kontrol süreçlerini iyileştirmekte, parça aşınmalarını tahmin ederek hat verimliliğini desteklemekte ve üretim sürekliliğini sağlamaktadır (Chen vd., 2022). Bu bağlamda, üst yönetim desteği ve departmanlar arası entegrasyon yeteneğiyle kurgulanan 5G ve IoT'nin sunduğu fırsatlar, dijital dönüşümün imalat sanayindeki etkisini derinleştirmekte ve akıllı üretim modellerinin yaygınlaşmasını hızlandırmaktadır (Huang vd., 2026).

Dijital dönüşüm ve akıllı üretim teknolojilerinin potansiyel faydalarını ele alan çalışmalar yaygın olmakla birlikte, elektronik imalat sektöründe bu teknolojilerin üretim, kalite ve tedarik zinciri performansı üzerindeki bütünsel etkilerini gerçek veriler ve proje uygulaması üzerinden inceleyen ampirik araştırmalar sınırlıdır. Bu doğrultuda çalışmada, güncel dijital dönüşüm uygulamalarının gerçekleştirildiği bir elektronik üretim tesisinde üretkenlik ve verimlilik, kaynak yönetimi, ürün kalitesi ve müşteri hizmet seviyesindeki etkiler incelenmiştir. Araştırma soruları doğrultusunda mevcut durum değerlendirilmiş ve dijital dönüşüm uygulamalarının söz konusu alanlardaki etkileri elde edilen bulgular çerçevesinde ele alınmıştır.

- Dijital dönüşüm uygulamaları, incelenen elektronik üretim işletmesinin tedarik zinciri süreçlerini nasıl etkilemiştir?
- Dijital dönüşüm uygulamaları sonrasında işletmenin kalite metriklerinde ne tür değişimler gözlenmiştir?

- Dijital dönüşüm uygulamalarının tedarik zinciri ve kalite performansı üzerindeki etkileri, işletmenin üretim gerçekleştirdiği farklı alt endüstriyel sektörlerde (savunma, otomotiv vb.) göre nasıl farklılaşmaktadır?

1. BÖLÜM

KAVRAMSAL ÇERÇEVE ve LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde dijital dönüşümün kavramsal temelleri, elektronik üretim sektörünün yapısı ve tedarik zinciri yönetimi ile dijital dönüşüm arasındaki ilişki ilgili literatür çerçevesinde ele alınmaktadır. Bu doğrultuda öncelikle dijital dönüşümün gelişimi, Endüstri 4.0 ve Endüstri 5.0 yaklaşımları ile temel teknolojik unsurları incelenmiş; ardından dünyada ve Türkiye’de dijital dönüşümün ve elektronik üretim sektörünün mevcut durumu değerlendirilmiştir. Devamında, elektronik üretimde karşılaşılan tedarik zinciri zorlukları, dijital dönüşümün tedarik zinciri yönetimine etkileri ve bu etkilerin değerlendirilmesinde kullanılan performans göstergeleri ele alınmıştır. Son olarak, konuya ilişkin ulusal ve uluslararası çalışmalar incelenerek mevcut literatür ile bu tez kapsamında gerçekleştirilen uygulama çalışması arasındaki ilişki ortaya konulmuştur.

Dijital dönüşüm, literatürde yalnızca işletmelerin bilgi teknolojileri altyapılarını yenilemesi olarak değil; iş süreçlerinin, organizasyonel yapıların ve değer yaratma mekanizmalarının veri temelli biçimde yeniden yapılandırılmasını kapsayan bütüncül bir dönüşüm süreci olarak ele alınmaktadır (Frank, Dalenogare & Ayala, 2019; Singh, Sharma & Dhir, 2021). Endüstri 4.0 yaklaşımıyla birlikte bu dönüşüm; siber-fiziksel sistemler, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri analitiği ve akıllı üretim teknolojileri aracılığıyla üretim sistemlerinin yatay ve dikey entegrasyonunu hedefleyen bir yapıya kavuşmuştur (Garay-Rondero et al., 2020; Leng et al., 2021).

İmalat sanayindeki dijitalleşme politikaları ve güncel endüstriyel yönelimler incelendiğinde, dijital dönüşüm çalışmalarının makro düzeyde stratejik planlamalarla desteklendiği; buna karşın üretim ve operasyon yönetimi perspektifinden, fabrika içi gerçek verilere dayanan ve elektronik imalat hatlarına odaklanan uygulamalı çalışmaların görece sınırlı kaldığı görülmektedir (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2025). Bu durum, özellikle yüksek karmaşıklık, hassasiyet ve lot bazlı izlenebilirlik gerektiren elektronik üretim ortamlarında dijital dönüşümün somut etkilerinin daha ayrıntılı biçimde ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Bu çerçevede, üretim ve işlemler yönetimi kapsamında planlama, kontrol, esneklik ve performans değerlendirme süreçleri; işletmelerin rekabetçi yapılarının sürdürülebilirliği ve tedarik ağlarındaki kırılganlıkların azaltılması açısından önemli bir rol üstlenmektedir (Buer et al., 2021; Sanders, 2013). Özellikle yüksek ürün çeşitliliği ve değişken talep yapısına sahip üretim ortamlarında, geleneksel kontrol mekanizmalarının yerini alan dijital izleme altyapıları, operasyonel kısıtların aşılmasında ve sürdürülebilir performans artışının sağlanmasında kritik bir kaldıraç işlevi görmektedir (Buer et al., 2021).

Üretim ortamlarında dijital dönüşüm, literatürde ağırlıklı olarak verimlilik artışı, hata oranlarının azaltılması, süreç şeffaflığının sağlanması ve izlenebilirliğin artırılması hedefleriyle ilişkilendirilmektedir. Bu kapsamda üretim ve depo yönetim sistemlerinde dijital dönüşümü uygulamalı olarak ele alan çalışmalarda; üretim istasyonlarında barkod ve radyo frekansı ile tanımlama (RFID) tabanlı otomatik veri toplama, iş emri başlangıç ve bitişlerinin dijital ortamda izlenmesi, operatör onaylarının sistem üzerinden alınması ve üretilen mamullerin depo süreçleriyle entegre biçimde takip edilmesi gibi dinamik uygulamalara yer verilmektedir (Beliatis et al., 2021; Fatima et al., 2022).

Bu tür uygulamalar, üretim süreçlerinde gerçekleştirilen faaliyetlerin gerçek zamanlı olarak izlenmesine olanak tanımaktadır ve üretim-depo entegrasyonunu güçlendirmektedir (Beliatis et al., 2021). Benzer şekilde, üretim firmalarına yönelik dijital dönüşüm stratejilerini ele alan çalışmalarda, dijital dönüşümün yalnızca fabrika içi otomasyonla sınırlı bir yapı sunmadığı; tedarik zincirinin tamamını kapsayan bütünlük ve dikey-yatay ekseninde entegre bir yaklaşımı gerektirdiği vurgulanmaktadır (Frank et al., 2019; Garay-Rondero et al., 2020).

Dijital dönüşümün üretim işletmelerinde sürdürülebilir biçimde uygulanabilmesi için, mevcut durumun ölçülmesi ve dönüşüm sürecinin planlı biçimde yürütülmesi gerekmektedir. Bu bağlamda literatürde dijital olgunluk modelleri ve dönüşüm yol haritaları önemli bir yer tutmaktadır (Frank et al., 2019). İmalat işletmelerine yönelik yapılan çalışmalarda, dijital olgunluk değerlendirmelerinin organizasyonel yapı, üretim yönetimi, tedarik zinciri entegrasyonu ve müşteri ilişkileri gibi boyutlar üzerinden gerçekleştirildiği görülmektedir (Garay-Rondero et al., 2020).

Yol haritası geliştirmeye odaklanan çalışmalarda, dijital dönüşümün işletmeye özgü bir süreç olduğu; teknoloji yatırımlarının işletmenin hazır bulunuşluk düzeyi, sahip olduğu kaynaklar ve tedarik zinciri yapısı dikkate alınarak planlanması gerektiği vurgulanmaktadır (Singh et al., 2021). Bu yaklaşım, elektronik üretim gibi kalite, teslimat ve izlenebilirlik gereksinimlerinin yüksek olduğu sektörlerde dijital dönüşüm projelerinin başarıyla hayata geçirilmesi açısından kritik bir altyapı sunmaktadır.

İncelenen literatürde dijital dönüşümün tedarik zinciri yönetimine etkileri; görünürlük, izlenebilirlik, envanter doğruluğu ve entegrasyon kavramları etrafında ele alınmaktadır (Frank et al., 2019; Garay-Rondero et al., 2020). Üretim istasyonlarından elde edilen gerçek zamanlı verilerin depo ve stok yönetim sistemleriyle bütünleştirilmesi, tedarik zinciri boyunca bilgi akışının hızlanmasını ve karar alma süreçlerinin veri temelli yürütülmesini mümkün kılmaktadır.

Bu durum, özellikle çok sayıda bileşen ve tedarikçi ile çalışılan elektronik üretim ortamlarında, tedarik zinciri risklerinin azaltılmasına ve teslimat performansının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır (Garay-Rondero et al., 2020). Üretim firmalarına yönelik dijital dönüşüm stratejilerinde ise tedarik zinciri yönetiminin dönüşümün temel bileşenlerinden biri olarak ele alınması, dijitalleşmenin işletme genelinde bütünleşik bir yapı içerisinde kurgulanması gerektiğini ortaya koymaktadır (Frank et al., 2019).

Dijital dönüşüm projeleri, teknoloji yatırımlarının ötesinde proje yönetimi, değişim yönetimi ve organizasyonel uyum gerektiren karmaşık süreçlerdir. Proje yönetimi perspektifinden ele alınan çalışmalarda, dijital dönüşüm projelerinin karşılaştığı temel zorluklar; dijital yetkinlik eksikliği, veri yönetimi sorunları ve organizasyonel direnç olarak tanımlanmaktadır (Singh et al., 2021).

Bu çalışmalarda ayrıca, üst yönetim desteği, paydaş katılımı, etkin iletişim ve dönüşüm sürecinin sistematik biçimde yönetilmesinin, dijital dönüşüm projelerinin başarısını belirleyen temel faktörler olduğu vurgulanmaktadır (Singh et al., 2021). Bu bulgular, elektronik üretimde yürütölen dijital dönüşüm projelerinin, üretim ve tedarik zinciri süreçlerini kapsayan çok paydaşlı yapısı göz önünde bulundurulduğunda, proje yönetimi yaklaşımının önemini ortaya koymaktadır.

Web of Science veri tabanında gerçekleştirilen taramalar, dijital dönüşüm ve üretim ilişkisini ele alan Türkiye adresli uluslararası yayınların sayısının sınırlı olduğunu göstermektedir. Mevcut yayınların büyük bir bölümünün kavramsal çerçeve, model önerisi veya belirli teknolojilerin potansiyel etkileri üzerine yoğunlaştığı; gerçek üretim ortamlarında, ölçülebilir performans göstergelerine dayalı uygulama analizlerine sınırlı düzeyde yer verdiği görülmektedir.

Bu bulgu, YÖK Ulusal Tez Merkezindeki üretim odaklı tezlerin dağılımı ile birlikte değerlendirildiğinde, elektronik üretimde dijital dönüşüm uygulamalarının tedarik zinciri yönetimine etkilerini proje uygulama çalışması üzerinden ele alan araştırmaların literatürde sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır.

Bu bölümde gerçekleştirilen literatür taraması, dijital dönüşümün üretim sistemlerinde veri temelli yönetim, görünürlük ve entegrasyon üzerinden değer yarattığını ve bu değer tedarik zinciri yönetimi süreçlerine yansıdığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, elektronik üretim özelinde dijital dönüşüm uygulamalarının tedarik zinciri yönetimine etkilerini fabrika içi gerçek veriler ve somut bir proje uygulaması çerçevesinde ele alan çalışmaların literatürde sınırlı olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, “Elektronik Üretim Sektöründe Dijital Dönüşümün Tedarik Zinciri Süreçleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu tez, elektronik üretim ortamında gerçekleştirilen dijital dönüşüm uygulamalarını üretim, depo ve tedarik zinciri entegrasyonu bağlamında inceleyerek ulusal ve uluslararası literatürde tespit edilen bu boşluğa katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Literatür taraması sonucunda ortaya konulan bu çerçeve doğrultusunda, izleyen kısımda dijital dönüşümün kavramsal ve teknolojik temelleri ele alınmaktadır.

1.1. DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN TEMELLERİ

Dijital dönüşüm kavramının günümüzde ulaştığı kapsamın anlaşılabilmesi için, üretim sistemlerinin sanayi devrimleri boyunca geçirdiği teknolojik dönüşümün tarihsel gelişimiyle birlikte ele alınması gerekmektedir.

Endüstri devrimleri, üretim süreçlerinin zaman içindeki evrimini yansıtarak, teknolojik ilerlemelerin iş yapış biçimlerini nasıl dönüştürdüğünü göstermektedir (Rao ve Prasad, 2018).

Sanayi devrimlerinin ilki olan **Endüstri 1.0**, 18. yüzyılın sonlarında buhar gücünün keşfi ile başlamış ve üretim süreçlerinde el işçiliğinden mekanik sistemlere geçişi sağlamıştır. Su ve buhar gücüne dayalı makineler, üretimi daha verimli hale getirerek endüstrinin temel taşlarını oluşturmuştur. Özellikle dokuma tezgahları ve buhar motorları gibi yenilikler, üretim sistemlerinde köklü değişimlere yol açmıştır. (Rao ve Prasad, 2018).

Endüstri 2.0, 19. yüzyılın sonlarına doğru elektriğin üretimde kullanılmasıyla birlikte ortaya çıkmıştır. Elektrik enerjisi, üretim tesislerinin daha verimli çalışmasını sağlamış ve sanayileşmenin hızlanmasına neden olmuştur. Bu dönemin en önemli gelişmelerinden biri, Henry Ford'un montaj hattı sistemini geliştirmesiyle seri üretimin yaygınlaşması olmuştur. Montaj hatları, ürünlerin daha hızlı ve düşük maliyetle üretilmesini mümkün kılarak sanayi sektörüne büyük katkı sağlamıştır. (Rao ve Prasad, 2018).

20. yüzyılın ortalarına gelindiğinde **Endüstri 3.0** ortaya çıkmış ve üretim süreçleri bilgisayarlar ve programlanabilir mantıksal denetleyiciler (PLC) ile otomatik hale getirilmiştir. Bu dönemde dijitalleşme ve otomasyon kavramları üretim süreçlerine entegre edilmiş, bilgisayar destekli üretim sistemleri sayesinde insan müdahalesine duyulan ihtiyaç azalmıştır. Böylece verimlilik artarken, hata oranları düşürülmüş ve üretim süreçleri daha kontrollü bir hale gelmiştir. (Rao ve Prasad, 2018; Banger, 2017)

Tablo 1 Endüstri Devrimleri Zaman Dilimi Tablosu

Paradigma	Zaman Dilimi	Karakteristik
1.0	1780	Mekanizasyon
2.0	1870	Elektrifikasyon
3.0	1970	Otomasyon
3.5	1980	Küreselleşme
4.0	2000	Dijitalleşme
5.0	2025+	Kişiselleştirme

Endüstri 4.0, Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri analitiği, Yapay Zeka ve 5G gibi teknolojilerin üretime entegrasyonu ile şekillenmektedir. 5G teknolojisi, düşük gecikme süresi ve yüksek bant genişliği ile akıllı fabrikaların altyapısını oluştururken, sensörlerle

donatılmış üretim sistemleri sayesinde makineler birbirleriyle haberleşmekte ve otonom çalışabilmektedir. Bunun sonucunda, üretim süreçleri daha esnek, verimli ve bağlantılı hale gelmekte, aynı zamanda tedarik zinciri yönetimi daha etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. (Rübmann, vd., 2015)

1.1.1. Endüstri 4.0 Unsurları

- Nesnelerin İnterneti
- Akıllı Fabrikalar
- Siber Fiziksel Sistemler
- Üç Boyutlu Yazıcılar (Eklemeli Üretim)
- Büyük Veri
- Bulut Bilişim Sistemi
- Siber Güvenlik
- Sistem Entegrasyonu
- Otonom Robotlar
- Artırılmış Gerçeklik
- Simülasyon
- Yapay Zeka

1.1.1.1. Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin İnterneti, her şeyi ve herkesi herhangi bir zamanda ve herhangi bir yerde iletişim sağlanmasını amaçlayan yeni bir teknolojik paradigmadır ve bu, yenilikçi uygulamalar ve hizmetlerin ortaya çıkmasına neden olur. IoT vizyonu, algılama teknolojileri ve akıllı bileşenlerle donatılmış bir ‘akıllı dünya’nın vizyonudur. (Wan, Cai ve Zhou, 2015)

Makinelerin birbiriyle etkileşebilmesi için gerekli olan bilgi kanallarına da nesnelerin interneti dense de aslında kavram, objeler, araçlar, binalar veya tüm diğer cihazlar arasında bilgi alışverişinin yapıldığı ağları ifade etmektedir. Bu cihazların birbirleriyle etkileşimi sonucunda elde edilen veriler ile gerçek zamanlı karar verme mümkün olmaktadır. Nesnelerin interneti, gerçek/fiziksel ve dijital/sanal dünyalar arasındaki etkileşimi sağladığından, fiziksel varlıkların dijital benzerleri ve sanal temsilleri vardır ve

bu nesneler iletişim kurabilir; etkileşime girebilir; veri ve bilgi alışverişinde bulunabilirler. (Wan, Cai ve Zhou, 2015; Leng vd., 2021)

Akıllı ve otonom makinelerin ve cihazların birbirine bağlı olduğu ve verimliliğin, etkinliğin ve güvenilirliğin artırılması için makine ve insan gücü iş birliğine dayalı yeni bir ekosistem oluşturmasıyla nesnelerin interneti yürütülmektedir. (Wan, Cai ve Zhou, 2015)

1.1.1.2. Akıllı Fabrikalar

Akıllı fabrikalar geleceğin fabrikaları kavramı ile adlandırılmaktadır (Hozdic, 2015: 31). Akıllı fabrikalar, fiziksel ve sanal dünyanın entegrasyonunu sağlayan, veri değişiminin gerçekleşmesini sağlayan ve akıllı üretim yapabilen oldukça zeki bir organizma biçimidir (Salik Ata, N. (2024)

1.1.1.3. Siber-fiziksel sistemler

Siber-fiziksel sistem kavramı ilk defa 2006'da ABD'de, fiziksel dünya ile bilgisayar ağları üzerine kurulu sanal ortamların giderek yakınlaşan ilişkisini vurgulamak amacıyla Lee (2008) tarafından dile getirilmiştir. Fiziksel dünya ile siber dünya arasındaki koordinasyonu ve iletişimi sağlayan yapılar bütünü olarak ifade edilmektedir. Bu sistemin temel rolü, değişen üretim ihtiyaçlarını karşılamak ve endüstrinin etkinliğini ve üretkenliğini artırmaktır (Nguyen vd., 2021)

1.1.1.4. Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat; üç boyutlu şekilde hazırlanan bilgisayar destekli tasarımlardan direkt el ile tutulur fiziksel modeller elde etmeyi sağlayan imalat teknolojisidir. Bu yöntemde tabandan başlayarak fiziksel modeller katman katman yüzeylerin üst üste eklenmesi ile oluşturulmaktadır (Aktimur ve Gökpınar, 2015: 464).

1.1.1.5. Büyük veri ve analizi

Büyük veri ve analizi kuruluşlarda karar verme süreçlerini destekleyebilen, büyük hacimli verilerin analizini ve yararlı bilgiye dönüştürülmesini sağlamaktadır. Büyük veri ve

analizi, gerçek zamanlı kritik bilgilere erişim sağladığından, kuruluşlar proaktif davranmak için bu bilgiler kullanılmaktadır (Marinagi vd., 2023: 12).

1.1.1.6. Bulut Bilişim

Bulut bilişim, bir arama motoru platformundan doğmuş olup, düşük maliyet ve yüksek performans sunabilen bir bilgi işlem teknolojisidir (Zhou vd., 2015: 2149). Bulut bilişim; neredeyse her türlü ağa dâhil olabilen cihazların bağlanabildiği, internet aracılığıyla donanımsal ve yazılımsal anlamda var olan doküman ve kaynaklarımızın, hizmet ve servis sağlayıcılar ile kullanıcılara ve cihazlara aktif şekilde paylaştırılabildiği bir internet platformu şeklinde tanımlanmaktadır (Yazır, 2018: 9).

1.1.1.7. Siber Güvenlik

Siber güvenlik topluluğu, siber tehditlerin tamamen ortadan kaldırılamayacağını kabul etmektedir. Bu nedenle, siber saldırıların zararlı etkilerini azaltmak için araştırma ve teknoloji geliştirme esastır (Azambuja vd., 2023: 3). Siber güvenlik, siber ortamda kullanıcı, kuruluş ve kurumların varlıklarını korumak amacı ile kullanılan politikalar, araçlar, güvenlik teminatları, güvenlik kavramları, risk yönetimi yaklaşımları, kılavuzlar, eğitimler, faaliyetler, teknolojiler ve uygulamalar bütünüdür (Karacı vd., 2017: 2079).

1.1.1.8. Otonom Robotlar

Endüstri 3.0 döneminde kullanılan geleneksel endüstriyel robotların aksine, Endüstri 4.0 kapsamında geliştirilen robotlar insanlarla iş birliği içerisinde çalışabilecek şekilde tasarlanmakta ve bu sayede insan kaynaklı riskler ile fiziksel iş yükü azaltılmaktadır. Otonom robotlar; esnek üretim sistemlerinin oluşturulması, üretim hatlarının yeniden yapılandırılabilirliğinin artırılması ve insan-makine iş birliğinin geliştirilmesi açısından Endüstri 4.0'ın temel teknolojik bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Rüßmann vd., 2015).

1.1.1.9. Artırılmış Gerçeklik

Artırılmış gerçeklik gerçek zamanlı olarak sanal unsurlarla birleştirilmiş gerçek dünyadaki fiziksel ortamı görüntülemek için elektronik cihazları kullanmaktadır. Artırılmış gerçeklik hizmet, üretim, satış ve pazarlama, tasarım, operasyonlar, kalite

doğrulama ve personel eğitimi ve desteğine uygulanabilmektedir (Marinagi vd., 2023: 11). Sanal gerçeklikte tam anlamıyla sanal bir dünya yaratılırken artırılmış gerçeklik uygulamasında (tıpkı insanların anime karakterler ile birlikte oynadıkları filmlerdeki gibi) sanal ve gerçek olan beraber iç içe yer almaktadır (Banger, 2017: 157).

1.1.1.10. Simülasyon

Simülasyon, gerçek zamanlı bilgilerden yararlanarak fiziksel dünyayı, insanları, ürünleri ve makineleri sanal bir formda yansıtmaktadır.(Rübmann, vd., 2015). Bir sistemin ya da nesnenin hareketlerini, müdahalelerini ve bunları optimize etmek amacı ile işlenmesini incelemek için sanal simülasyonunu içermekte, uygulama ve üretimden önce potansiyel sorunları azaltmaktadır.

1.1.1.11. Sistem Entegrasyonu

Sistem entegrasyonu, yatay , dikey ve uç uca dijital entegrasyonların birlikte gerçekleşmesi ile olanaklı hale gelmektedir. *Yatay entegrasyon*, çeşitli bilişim teknolojilerinin bir firma içinde üretimin (tedarik, üretim ve sevkiyat lojistiği vb.) farklı aşamalarına entegre edilme sürecini, *dikey entegrasyon* çeşitli bilişim teknolojilerinin farklı hiyerarşik düzeylere (imalat ve yönetim aşaması, üretim yönetimi aşaması ve şirket planlama aşamaları vb.) entegrasyonunu ve *uç uca dijital entegrasyon* ise, tüm mühendislik süreci boyunca sağlanan entegrasyonun dijital ve gerçek dünyada bir ürünün tüm değer zinciri boyunca ve farklı firmalar arasında sağlanmasını ifade etmektedir.

1.1.1.12. Yapay Zeka

Yapay Zeka, büyük miktardaki verinin analiz edilmesi, karar verme süreçlerinin desteklenmesi ve operasyonel faaliyetlerin daha etkin biçimde yürütülmesi amacıyla kullanılan teknolojik sistem ve uygulamaları kapsamaktadır. Endüstri 4.0 kapsamında Yapay Zeka; üretim süreçlerinden elde edilen verilerin işlenmesi ve anlamlandırılması yoluyla karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine, süreçlerin izlenmesine ve operasyonel etkinliğin artırılmasına katkı sağlayan önemli teknolojik unsurlardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bu sistemlerin kullanımında sağlanan operasyonel faydaların yanı sıra doğruluk, güvenilirlik, güvenlik, izlenebilirlik, şeffaflık ve hesap verebilirlik gibi unsurlar da önem taşımaktadır (Executive Office of the President, 2020).

1.1.2. Endüstri 5.0 Geçişi

Endüstri 4.0 ile üretim süreçlerinde dijitalleşme, otomasyon ve veri temelli uygulamaların yaygınlaşması; işletmelere verimlilik, esneklik, kalite ve maliyet açısından önemli kazanımlar sağlamıştır. Bununla birlikte, üretim sistemlerinde teknolojik gelişmelerin yanı sıra insan faktörü, sürdürülebilirlik ve değişen koşullara uyum sağlama yeteneği de önem kazanmıştır. Bu doğrultuda Endüstri 5.0, Endüstri 4.0'ın teknolojik altyapısını insan odaklılık, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık boyutlarıyla geliştiren bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır.

Tablo 2 Endüstri 4.0'ın Faydaları Tablosu

Faydalar	Açıklama
Verimlilik	Ekonomik faaliyetlere daha az insan dahil oluyor çünkü daha hızlı karar verme süreçlerini ve yüksek verimliliği sağlayan otomasyon daha fazla kullanılıyor. Otomasyon ayrıca yüksek kaliteyi koruma ve üretim sorunlarını azaltma eğiliminde.
Çeviklik	Yüksek standardizasyon ve küçük üretim miktarı odaklı Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde yüksek esneklik sağlıyor.
İnovasyon	Endüstri 4.0 üretim hattı, karışık malzemelerle ve düşük hacimlerde üretimi uygun kıldığından, bu durum yeni ürün tanıtımları ve tasarım deneyimlerine uygunluk sağlıyor.
Müşteri servisi	Müşteri ihtiyaçları üzerine hassas ve uygun bilgilere sahip olduğundan, müşterilere ürün ve hizmetler zamanında teslim edilebiliyor.
Maliyet azaltma	Geçiş için yapılan ilk yatırımdan sonra maliyetler düşüyor. Daha az kalite sorunu; daha az malzeme israfı, daha az personel ve daha düşük işletme maliyetleri sonucunu doğuruyor.

Rekabet Avantajı	Daha iyi kalite, daha düşük maliyetler ve müşterilere hizmet etme yeteneği, Endüstri 4.0'ı günümüz müşterilerinin tedarikçisi olmak için öne çıkarıyor. Bu aynı zamanda müşteriye özel pazarlama, ürün sunma ve hizmetlerle daha büyük bir pazara hitap etmenin yolunu açıyor.
------------------	--

Kaynak: Almada-Lobo (2017)'den uyarlanmıştır.

Yukarıda yer alan Tabloda açıklandığı üzere, Endüstri 4.0'la birlikte verimlilik ve üretim maliyetlerinde düşüşler kaydedilmektedir. Ortalama maliyet düşüşleri şöyledir (Nahavandi, 2019):

- Üretim maliyeti: %10-30
- Lojistik maliyeti: %10-30
- Kalite yönetimi maliyeti: %10-20

Bu faydaların yanı sıra Endüstri 4.0, iş gücü yapılarının dönüşümü, organizasyonlar arası iş birliğinin artması, gelişmiş siber güvenlik ihtiyaçlarının ortaya çıkması ve yüksek teknoloji yatırımlarının gerekliliği gibi önemli değişimleri de beraberinde getirmektedir (Rüßmann vd., 2015).

Diğer yanda, Endüstri 4.0 uygulamasındaki başlıca aksaklıklar da şöyle sıralanabilir (Mekunnel, 2019:17):

- Endüstri 4.0 tam olarak uygulandığında, birçok eğitimsizin veya eğitimsiz işçinin işsiz kalacak olması
- Endüstri 4.0'ı uygulamak için yüksek vasıflı fabrika mühendislerine ihtiyaç duyulması, bu nedenle yüksek eğitimli insan ihtiyacı
- BT (IT) güvenlik sorunları: Endüstri 4.0 büyük ölçüde BT'ye bağlı olduğundan, BT güvenliğini verimli bir şekilde korumanın önemi
- BT hatalarından korkma: BT'nin ani ve geçici arızalanma olasılığından dolayı önemli, gizli süreçlerin deforme hale gelebilirliği
- Endüstri 4.0 standartlarına göre istikrar ve genel performans düzeyinde makineden makineye iletişimde güvenilirlik sorunları

Endüstri 5.0, teknoloji merkezli büyümeden insan ve çevre odaklı bir dönüşüme geçişi temsil etmektedir. Bu yeni yaklaşım, sadece dijitalleşmeyi değil, aynı zamanda değer yaratmayı da yeniden tanımlamayı amaçlamaktadır. Endüstri 5.0, insan merkezlilik, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık ilkeleri çerçevesinde sanayi ekosisteminin yeniden şekillendirilmesini öngörmektedir. İnsan-makine iş birliğini güçlendirmek için gelişmiş Yapay Zeka ve robotik sistemler entegre edilmekte, çalışanların yetkinliklerini artırmak için akıllı cihazlar ve giyilebilir teknolojiler kullanılmaktadır. Üretim süreçlerinin daha verimli hale gelmesi için dijital ikiz teknolojileri ve veri analitiği gibi ileri düzey araçlar devreye alınmaktadır. Ayrıca, çalışanların karar alma süreçlerine daha aktif katılımını teşvik eden kapsayıcı yönetim modelleri benimsenmekte ve daha esnek çalışma yapıları oluşturulmaktadır. Bu geçiş sürecinde, insan merkezli tasarımı teşvik eden yeni standartlar ve sertifikasyonlar geliştirilmekte, kamu ve özel sektör iş birliği ile Ar-Ge faaliyetleri desteklenmektedir. Endüstri 5.0'ın temel hedefleri arasında çalışan refahının artırılması, çevreye duyarlı üretim yöntemleriyle sürdürülebilir büyümenin sağlanması ve krizlere karşı daha dirençli bir sanayi ekosistemi oluşturulması yer almaktadır. Böylece, sanayi sektörü yalnızca teknolojik ilerlemeyle değil, aynı zamanda kültürel ve sosyal bir dönüşüm ile daha kapsayıcı ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşmaktadır.

Tablo 3 Endüstri 4.0 ve 5.0 Kıyaslama Tablosu

Endüstri 4.0	Endüstri 5.0
Dijital bağlantı ve Yapay Zeka yoluyla artırılmış verimlilik üzerine odaklanır.	Rekabetçilik ve sürdürülebilirliği birleştiren bir çerçeve sunarak, sanayinin dönüşümün temel direklerinden biri olarak potansiyelini gerçekleştirmesini sağlar.
Teknoloji, siber-fiziksel hedeflerin ortaya çıkışı etrafında şekillenir.	Alternatif (teknoloji) yönetim modellerinin etkisini vurgular.
İş modellerinin mevcut sermaye piyasası dinamikleri ve ekonomik modeller doğrultusunda optimize edilmesine odaklanır. Yani, esas olarak maliyetlerin en aza indirilmesi ve hissedarlar için kârın	Sürdürülebilirlik ve dayanıklılık için iş modellerine yeni bir bakış açısı kazandırır.

maksimize edilmesine yöneliktir.	
Sistemsel dönüşüm için gerekli olan tasarım ve performans boyutlarına odaklanmaz. Kaynak ve malzeme kullanımının çevresel, iklimsel ve sosyal etkilerden ayrıştırılmasına önem vermez.	Dijital cihazların kullanımıyla çalışanları güçlendirerek insan odaklı bir teknoloji yaklaşımını benimser.

Kaynak: European Commission (2022)'den uyarlanmıştır.

1.1.3. Dünyadaki **dijital** dönüşüm

Dijital dönüşüm, küresel ölçekte endüstriyel rekabetin belirleyici unsurlarından biri hâline gelmiş; üretim sistemlerinde yalnızca otomasyon ve bilişim altyapısı modernizasyonu ile sınırlı olmayan, iş modeli, organizasyonel yetkinlikler, veri yönetimi ve değer zinciri yönetimi boyutlarını kapsayan çok katmanlı bir dönüşüm süreci olarak ele alınmıştır. Literatürde dijital dönüşüm; dijital teknolojilerin yarattığı kesintiler ve fırsatlar karşısında işletmelerin stratejik yanıtlar geliştirdiği, bu yanıtların ise teknolojik yatırımların ötesinde yönetim, yetenek yönetimi, veri mimarisi ve değişim yönetimi gerektirdiği bir dönüşüm mantığına işaret etmektedir (Vial, 2019). Benzer biçimde dijital dönüşümün disiplinler arası niteliği; digitization–digitalization–digital transformation ayrımı üzerinden kavramsallaştırılmakta ve her aşamanın farklı kabiliyet setleri, performans göstergeleri ve kurumsal düzenlemeler gerektirdiği vurgulanmaktadır (Verhoef et al., 2021).

2024–2025 döneminde üretim sektöründe dijital dönüşümü hızlandıran temel faktörler üç ekseninde yoğunlaşmaktadır:

- Yapay Zeka ve ileri analitik ile verimlilik/kalite artışı,
- tedarik zinciri kırılganlıkları karşısında dayanıklılık (resilience),
- sürdürülebilirlik ve düzenleyici uyum.

OECD'nin dijital ekonomi değerlendirmeleri, dijital dönüşümün etkilerinin ülke ve sektör bazında farklılaştığını; ancak dönüşümün bütüncül biçimde değerlendirilebilmesi için altyapı–yenilik–güven üçlüsünün (dijital altyapı, dijital inovasyon kapasitesi,

güven/yönetişim mekanizmaları) birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (OECD, 2024).

Bu dönemde üretim işletmelerinin dönüşüm gündemini somutlaştıran bulgular, endüstri araştırmalarında da görünürdür. Örneğin Deloitte'un 2025 tarihli akıllı üretim odaklı çalışması, üreticilerin akıllı üretim uygulamalarını yaygınlaştırdığını; ancak ölçekleme aşamasında yetenek açığı, veri bütünlüğü, entegrasyon ve dönüşüm yönetişimi gibi engellerin kritiklediğini raporlamaktadır (Deloitte, 2025). PwC'nin operasyon ve tedarik zinciri odaklı 2025 yayınları ise dönüşümün “fabrika içi” bir proje olmaktan çıkıp operasyon stratejisi ve dijital tedarik zinciri mimarisiyle giderek daha fazla bütünleştiğini göstermektedir (PwC, 2025).

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, dijital dönüşümün küresel üretimde giderek “teknoloji projeleri” değil, kurumsal rekabetçilik programları kapsamında ele alındığı anlaşılmaktadır.

Küresel literatürde yaygın bir değerlendirme çerçevesi, Endüstri 4.0/dijital dönüşümün olgunluk modelleri üzerinden izlenmesidir. Bu modeller, işletmelerin teknoloji entegrasyonu, veri yönetişimi, süreç standardizasyonu, insan kaynağı ve organizasyonel çeviklik gibi boyutlarda hangi aşamada olduğunu belirlemeyi hedefler (Hess et al., 2016). Bu çerçevede literatürün öne çıkardığı temel sorunlardan biri, pilot projelerde elde edilen kazanımların kurumsal ölçeğe taşınamaması; yani “pilot sıkışması”dır. Bu durum, özellikle veri mimarisinin parçalı olduğu, ekipman parkının heterojen olduğu ve OT/IT entegrasyonunun sınırlı kaldığı üretim ortamlarında daha belirginleşmektedir. Olgunluk tartışmaları, dönüşüm başarısında “teknolojiye erişim” kadar yönetişim, standartlaşma, süreç sahipliği ve değişim yönetimi eksenlerinin belirleyici olduğunu göstermektedir (Hess et al., 2016; Verhoef et al., 2021).

Küresel dönüşüm dinamikleri, teknolojik bileşenler düzeyinde üç ana kümeye ayrılabilir:

- Bağlanabilirlik ve veri toplama katmanı: IIoT sensörleri, edge/cloud altyapısı, OT/IT bütünleşmesi ve siber güvenlik gereksinimleri (OECD, 2024).

- Analitik ve zekâ katmanı: kestirimci bakım, kalite analitiği (özellikle görüntü işleme), planlama optimizasyonu ve Yapay Zeka Destekli uygulamalar (Deloitte, 2025).
- Otonomi ve kapalı çevrim iyileştirme: dijital ikiz/simülasyon ve gerçek zamanlı geri besleme ile süreçlerin optimize edilmesi; bunun ölçeklenmesi için veri standardizasyonu ve süreç disiplininin gerekliliği (OECD, 2024; Verhoef et al., 2021).

Otomasyonun küresel görünümü, endüstriyel robot kurulumlarının artışıyla da izlenebilmektedir. IFR'nin 2025 "World Robotics" bulguları, robot talebinin son on yılda belirgin biçimde arttığını ve küresel kurulumların yüksek seviyelerde seyrettiğini göstermektedir (International Federation of Robotics, 2025).

Üretimde dijital dönüşümün kritik yansımalarından biri, değer zinciri boyunca uçtan uca görünürlük ve izlenebilirlik hedefidir.

2025 itibarıyla küresel yaklaşım;

- talep–arz eşleştirmesini gerçek zamanlı veriye dayandırma,
- tedarik risklerini proaktif yönetme
- sürdürülebilirlik hedeflerini (emisyon/enerji/atık) üretim sistemlerine entegre etme yönünde evrilmiştir (OECD, 2024; PwC, 2025).

Bu çerçeve, elektronik üretim gibi çok katmanlı tedarik ağlarına sahip sektörlerde daha da kritik bir içerik kazanmakta; lot/seri izlenebilirliği, kalite güvence, tedarikçi performans yönetimi ve mühendislik değişikliklerinin (ECO) yönetimi gibi başlıklarda dijitalleşme ihtiyacını artırmaktadır.

2025 yılı itibarıyla dünya literatüründe dijital dönüşüm giderek ikiz dönüşüm (digital + green transition) perspektifiyle ele alınmaktadır. Türkiye’de de yayınlanan 2025 tarihli resmi politika raporlarında ikiz dönüşüm vurgusu görünür hâle gelmiştir; bu durum, küresel literatürle yön uyumuna işaret etmektedir (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2025).

Bununla birlikte, dönüşümün ölçeklenmesinde en kritik darboğazlardan biri beceri/yetenek açığıdır. OECD raporları, güvenilir dijital altyapı ve veri yönetimi kadar insan kaynağı kapasitesinin de dönüşümün taşıyıcı kolonu olduğunu vurgulamaktadır (OECD, 2024). Bu nedenle dijital dönüşümün “teknoloji kurulumundan” çok, yetenek, yönetim ve işletim modeli tasarımı meselesi olduğu yaklaşımı güçlenmektedir (Vial, 2019; Verhoef et al., 2021).

1.1.4. Türkiye’de Dijital Dönüşümün Güncel Durumu

Türkiye’de dijital dönüşüm, bir yandan kamuda dijital devlet kapasitesini geliştiren uygulamalarla kurumsallaşırken, diğer yandan imalat sanayinde Endüstri 4.0 uygulamalarının sektörel yoğunlaşma ve firma ölçeğine bağlı farklı olgunluk düzeylerinde ilerlediği bir görünüm sergilemektedir. YÖK Ulusal Tez Merkezi’nde “dijital dönüşüm” anahtar kelimesiyle listelenen kapsamlı tez havuzu, konunun Türkiye literatüründe belirgin biçimde yaygınlaştığını göstermektedir.

Bu havuzun son sayfasında görüldüğü üzere dijital dönüşüm çalışmaları; kamu yönetimi, insan kaynakları, bankacılık, eğitim, yerel yönetimler ve üretim gibi çok farklı alanlara dağılmaktadır.

Bu bölüm, Bölüm 2’de oluşturulan Türkiye literatür haritasını tekrar etmekten ziyade; 2024–2025 döneminde Türkiye’de dijital dönüşümün endüstriyel uygulama gerçekliği, politika araçları ve dönüşümün yaygın darboğazları üzerinden değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

Türkiye’de imalat sanayinin dijital dönüşümünü hızlandırmaya dönük kurumsal çerçeve, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı koordinasyonunda yürütülen dijital dönüşüm programları ve ekosistem girişimleri üzerinden şekillenmektedir. Dijital Dönüşüm Destek Portalı; imalat sanayinde faaliyet gösteren işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerini destekleme, başvuru adımlarını ve destek kapsamını tanımlama amacıyla konumlandırılmıştır (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2025).

Buna ek olarak, Sanayide Dijital Dönüşüm Platformu yaklaşımı; sanayinin rekabet gücünün artırılması, üretimde verimlilik artışı sağlanması, işgücü niteliğinin iyileştirilmesi ve akıllı üretim sistemlerinin yaygınlaştırılması hedefleriyle 2016'dan itibaren çok paydaşlı bir yapı olarak tanımlanmaktadır (Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı [TTGV], 2025).

Bu politika çerçevesi, pratikte iki noktada belirleyici olmaktadır:

- dönüşüm yatırımlarının finansmanı ve ölçeklenmesi,
- standartlar ve yetkinlik geliştirme (özellikle KOBİ'ler için).

Türkiye'de imalat sanayinde dijital dönüşüm, sektörler arasında farklı hızlarda ilerlemektedir. Otomotiv, savunma ve elektronik üretim gibi kalite gereksinimlerinin yüksek olduğu ve küresel tedarik zincirlerine entegrasyonun güçlü olduğu sektörlerde dijitalleşme baskısı daha yüksektir. Bu farklılaşmayı açıklamak açısından “olgunluk” yaklaşımı işlevseldir.

Türkiye örneğinde otomotiv sektörü için geliştirilen değer zinciri temelli Endüstri 4.0 değerlendirme modeli, dönüşümün yalnızca üretim otomasyonu değil; değer zinciri faaliyetleri boyunca entegrasyon ve ölçümleme gerektirdiğini göstermektedir (Sert, 2020).

Buna karşılık, küçük ve orta ölçekli işletmeler açısından dijital dönüşümün önündeki temel engeller yalnızca teknoloji yatırımlarının finansmanı değildir. İşletmelerin bilgi teknolojileri altyapısı, çalışan yetkinlikleri, organizasyonel hazırlık düzeyi ve dönüşüm süreçlerini yönetebilecek kurumsal kapasitesi, dijitalleşmenin başarısını belirleyen kritik unsurlar arasında yer almaktadır. Mevcut Sanayi 4.0 olgunluk modellerinin önemli bir kısmının büyük ölçekli işletmelerin ihtiyaçları dikkate alınarak geliştirildiği, bu nedenle KOBİ'lerin dönüşüm sürecinde ilave zorluklarla karşılaştığı belirtilmektedir (Baki ve Serdar, 2020).

Bu durum, dijital dönüşümde kritik eşiğin yalnızca yeni teknolojilerin edinilmesi değil; kurumsal hazırlık, insan kaynağı yetkinlikleri, organizasyonel yapı ve dönüşüm

programlarının etkin biçimde yönetilmesi olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla sektörler arasındaki dijital olgunluk farklılıkları, teknoloji yatırımlarının büyüklüğünden çok işletmelerin bu dönüşümü yönetecek kurumsal kapasiteye sahip olup olmamalarıyla ilişkilidir.

Türkiye'nin dijital dönüşüm performansı, literatürde sıklıkla endeksler üzerinden tartışılmaktadır, Türkiye'de KOBİ'lerin dijital dönüşümünü değerlendirirken Dünya Dijital Rekabetçilik göstergeleri ile Küresel İnovasyon Endeksi gibi ölçütleri birlikte ele almakta; böylece dönüşümün yalnızca işletme içi süreçlerle sınırlı görülmemesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Bu yaklaşım, OECD'nin dijital ekonomi değerlendirmeleriyle de uyumludur. Dijital dönüşümün üretim sektörü üzerindeki etkisini sağlıklı izleyebilmek için dijital altyapı, inovasyon kapasitesi, veri yönetimi ve güven unsurlarının birlikte ele alınması gerekir (OECD, 2024). Dolayısıyla Türkiye'de endüstriyel dijital dönüşümün değerlendirilmesi, fabrika içi otomasyon göstergelerinin ötesinde; insan kaynağı, Ar-Ge, altyapı ve yönetim bileşenlerini birlikte içeren bütüncül bir çerçeve gerektirmektedir.

Türkiye'de dijital dönüşüm uygulamalarında en sık karşılaşılan zorluklar; veri yönetimi ve standardizasyon, dijital beceri açığı ve değişim yönetimi eksenlerinde yoğunlaşmaktadır. Proje yönetimi bağlamında dijital dönüşüm süreçlerini ele alan tez çalışması, dijital dönüşümün önündeki engelleri; dijital teknolojinin maliyeti, dönüşüm riskleri, destekleyici kültür eksikliği, dijital beceri eksikliği, veri yönetimi ve standardizasyon zorluğu şeklinde sınıflandırmaktadır.

Aynı çalışmada dijital dönüşümün başarı faktörleri olarak; çevik kültür, iyi yönetilen dönüşüm faaliyetleri, veri yönetimi, liderlik, çalışan katılımı ve geleceğin işgücü yetkinliklerinin geliştirilmesi gibi sosyo-teknik unsurların öne çıktığı belirtilmektedir.

Bu bulgular, Türkiye'de dönüşümün sürdürülebilir değere dönüşmesi için teknoloji yatırımı kadar yönetim ve performans ölçüm sistemi kurulmasının kritik olduğunu göstermektedir.

2025 tarihli resmi politika belgeleri, Türkiye imalat sanayinde dijital dönüşümün aynı zamanda ikiz dönüşüm ve olgunluk/ölçülebilirlik gündemiyle birlikte ele alındığını göstermektedir. T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından yayımlanan “İmalat Sanayii Politikaları ÖİK Raporu”, imalat sanayiinin küresel ölçekte karşılaştığı zorluklar arasında ikiz dönüşümün hız kazanmasına özel vurgu yapmaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2025).

Ayrıca Türkiye’nin endüstriyel ölçekte üretim performansını izlemeye dönük resmi istatistik altyapısı da dijitalleşme yatırımlarının etkilerini değerlendirmek açısından önem taşımaktadır. TÜİK’in 2024 “Yıllık Sanayi ve Hizmet İstatistikleri” yayını, imalat sanayinin üretim ölçeğine dair güncel bir çerçeve sunmakta; dönüşüm programlarının “etki” değerlendirmesi için makro düzeyde referans oluşturmaktadır (Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK], 2024).

Bu çerçeve, elektronik üretim gibi kalite-yoğun ve tedarik zinciri karmaşıklığı yüksek sektörlerde dijital dönüşümün; izlenebilirlik, kalite güvence, tedarikçi performansı ve teslimat güvenilirliği gibi göstergelerle birlikte ele alınması gerektiğini güçlendirmektedir. Bu nedenle tez kapsamında yürütülen proje uygulama çalışmasında izlenen başarı metrik seti ve elde edilen bulgular, Türkiye’nin endüstriyel dijital dönüşüm gündemini mikro ölçekte somutlaştıran bir örnek olay niteliği taşımaktadır.

1.2. DÜNYADA ELEKTRONİK ÜRETİM SEKTÖRÜ

Elektronik üretim sektörü; yarı iletkenler, pasif/aktif komponentler, baskılı devre kartları (PCB), elektronik kart montajı (PCBA/EMS), nihai ürün montajı (OEM/ODM) ve satış sonrası servis/onarım gibi halkalardan oluşan çok katmanlı bir küresel değer zinciri üzerinde şekillenmektedir. Bu zincirin ayırt edici özelliği, ürün mimarisinin modülerliği ve çok sayıda ara bileşen/tedarikçi katmanı nedeniyle yüksek tedarik karmaşıklığı ve kalite-izlenebilirlik gereksinimlerinin eş zamanlı olarak yönetilmesidir (TESİD, 2025).

Küresel ölçekte elektronik, dış ticaret hacmi ve değer zincirinin yaygınlığı bakımından en stratejik sektörler arasında konumlanmaktadır. TESİD’in sektöre genel bakış dokümanında, elektronik sektörünün 2023 yılı dış ticaret hacminin yaklaşık 3,6 trilyon

ABD doları seviyesinde gerçekleştiği ve küresel dış ticaret içinde anlamlı bir paya sahip olduğu belirtilmektedir (TESİD, 2025). Bu büyüklük; tüketici elektroniği, endüstriyel elektronik, savunma–havacılık elektroniği, otomotiv elektroniği (özellikle elektrikli araç ekosistemi), telekom/5G-6G altyapıları ve veri merkezi/AI donanımlarındaki büyüme ile yakından ilişkilidir.

Elektronik üretim ekosisteminin “çekirdeğinde” yer alan yarı iletken endüstrisi, 2024–2025 döneminde Yapay Zeka altyapıları ve veri merkezi yatırımlarının etkisiyle hızlanan bir büyüme eğilimi göstermiştir. Örneğin, yarı iletken pazarına ilişkin sektör istatistiklerinde 2024’te küresel satışların 630,5 milyar ABD doları seviyesine ulaştığı; 2025 için ise artış beklentilerinin sürdüğü belirtilmektedir (Semiconductor Industry Association [SIA], 2025). Ayrıca WSTS güncellemeleri, 2025 ilk yarıyılında küresel yarı iletken pazarında çift haneli büyümeyi ve özellikle mantık (logic) ile bellek (memory) segmentlerinde güçlü artışları raporlamaktadır (World Semiconductor Trade Statistics [WSTS], 2025). Bu büyüme, elektronik üretim değer zincirinin üst katmanlarında (komponent temini, test/ölçüm, montaj ve nihai ürün üretimi) kapasite planlama ve tedarik risk yönetimini doğrudan etkilemektedir.

Küresel elektronik üretimde coğrafi kümelenme, “Doğu Asya merkezli yüksek yoğunluklu üretim” ve “bölgesel çeşitlendirme/nearshoring” ikiliği üzerinden okunabilir. Yarı iletken ve ileri üretim ekipman yatırımlarında Asya’nın ağırlığı sürerken; jeopolitik riskler, tedarik sürekliliği hedefleri ve düzenleyici zorunluluklar nedeniyle farklı bölgelerde üretim ayak izini çeşitlendirme eğilimi güçlenmektedir. Bu bağlamda, tedarik zinciri dayanıklılığı, teknolojik yetkinlik ve sürdürülebilirlik baskıları aynı anda artmaktadır (Reuters, 2025; SIA, 2025). Özellikle yüksek teknoloji ürünlerinde izlenebilirlik, siber güvenlik ve kalite güvencesi; maliyet kadar kritik rekabet parametrelerine dönüşmektedir.

Bu küresel dinamikler elektronik üretim açısından iki temel sonucu öne çıkarır:

- Üretim/tedarik zinciri performansı artık yalnızca kapasite ve maliyetle değil; veriye dayalı görünürlük, çok katmanlı kalite yönetimi ve hızlı mühendislik değişikliklerini (ECO) yönetebilme kabiliyeti ile belirlenmektedir.

- Dijital dönüşüm; ERP–MES–PLM entegrasyonu, gerçek zamanlı izleme, kalite analitiği ve tedarikçi performans yönetimi gibi uygulamalar üzerinden, rekabetçiliğin doğrudan belirleyicisi hâline gelmektedir (TESİD, 2025; SIA, 2025; WSTS, 2025).

1.3. TÜRKİYE’DE ELEKTRONİK ÜRETİM SEKTÖRÜ

Türkiye’de elektronik üretim, geniş bir ürün ailesini kapsayan “elektrik–elektronik” üst başlığı içinde; tüketici elektroniğinden endüstriyel elektroniğe, savunma elektroniğinden telekom/altyapı bileşenlerine uzanan çok parçalı bir yapı göstermektedir. Bu alanın stratejik yönü, teknolojik bağımlılık ve katma değer tartışmalarıyla doğrudan ilişkilidir. Nitekim Strateji ve Bütçe Başkanlığı’nın Elektronik Sanayii Çalışma Grubu Raporu; elektronik endüstrisindeki teknolojik gelişmelerin (yarı iletkenler, Yapay Zeka, 5G/6G, IoT vb.) sektörel dönüşümü hızlandırdığını, pandemi döneminde yaşanan tedarik şoklarının ise elektronik değer zincirinde kırılganlıkları görünür kıldığını vurgulamaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı [SBB], 2025).

Türkiye’nin sektörel görünümünü değerlendirmede, hem üretim kapasitesi/işletme yapısı hem de dış ticaret performansı belirleyicidir. TÜİK’in sanayi istatistikleri, imalat sanayi genelinde ciro, üretim değeri ve katma değer gibi göstergeleri ortaya koyarak sektörlerin makro ölçekte izlenmesine imkân sağlar (Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK], 2024). Elektronik özelinde ise sektörel raporlar ve ihracatçı birliklerinin istatistikleri (ürün grupları, pazar dağılımı, yıllar itibarıyla değişim) daha ayrıntılı bir resim sunmaktadır.

Dış ticaret açısından elektrik–elektronik sektörünün ihracat performansı, Türkiye’nin küresel değer zincirlerine entegrasyonunun önemli göstergelerinden biridir. Örneğin Anadolu Ajansı’nda yer alan sektörel haberde, elektrik ve elektronik sektörünün 2025 yılı Ocak–Ekim döneminde 14,5 milyar ABD doları ile tüm zamanların en yüksek ihracat seviyelerine ulaştığı ifade edilmektedir (Anadolu Ajansı, 2025). Daha uzun dönemli ürün/ülke kırılımlarında ise, OEC verileri Türkiye’nin “Electrical machinery and electronics” kategorisinde 2023 yılı ihracatını ve başlıca hedef pazarları raporlamaktadır (OEC, 2025). Bu tür göstergeler; elektronik üretimin Türkiye açısından hem ihracat geliri

hem de teknolojik dönüşüm kapasitesi bakımından kritik bir alan olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye’de sektörel bilgi üretimi ve görünürlüğü açısından TESİD gibi derneklerin yayınladığı raporlar, hem dünyadaki eğilimlerin Türkiye’ye yansımaları hem de alt sektörlerin dinamiklerini değerlendirmek için önemli bir başvuru kaynağıdır. TESİD’in sektöre genel bakış dokümanı, elektronik sektörünün küresel ölçekli gelişimini, alt sektörleri ve dış ticaret büyüklüğü gibi göstergeleri çerçeveleyerek Türkiye’deki sektörel tartışmalar için referans bir zemin oluşturmaktadır (TESİD, 2025). Ayrıca SBB’nin 12. Kalkınma Planı hazırlıkları kapsamında yayınladığı raporlar, elektronik sanayiine ilişkin politika araçlarını ve yapısal ihtiyaçları (Ar-Ge, insan kaynağı, teknoloji geliştirme, tedarik zinciri dayanıklılığı) daha üst düzey bir stratejik çerçeveye taşımaktadır (SBB, 2025).

Bu bulgular bir arada değerlendirildiğinde Türkiye’de elektronik üretim; (i) ihracat performansını artırmaya dönük rekabet baskısı, (ii) yüksek teknoloji ve katma değer üretimini güçlendirme hedefi ve (iii) küresel tedarik şoklarına karşı dayanıklılık ihtiyacı eksenlerinde şekillenmekte; bu üç eksen ise dijital dönüşümü “tamamlayıcı” değil, “kurucu” bir yetkinlik alanına dönüştürmektedir (SBB, 2025; TESİD, 2025; Anadolu Ajansı, 2025).

Elektronik üretimde dijital dönüşümün kritikliği, sektörün ürün ve süreç karakteristiğinden kaynaklanır. Elektronik üretim hatları; yüksek ürün çeşitliliği, sık mühendislik revizyonları, tedarik kaynaklı değişkenlik, kısa ürün yaşam döngüsü ve kalite maliyetlerinin (yeniden işleme, hurda, müşteri iadesi, garanti) yüksekliği nedeniyle veri temelli süreç yönetimi gerektirir. Bu nedenle dijital dönüşüm; yalnızca otomasyon yatırımı değil, uçtan uca izlenebilirlik, kalite analitiği, tedarikçi performans yönetimi ve planlama doğruluğu gibi konularda rekabet avantajı üreten bir çerçeve olarak ele alınmalıdır.

Türkiye bağlamında da SBB’nin elektronik sanayi raporu, tedarik zinciri kesintilerinin ve yarı iletken kıtlığı gibi şokların etkisini vurgulayarak, elektronik endüstrisinin tedarik

sürekliliği ve stratejik teknoloji yönetimi açısından önemini ortaya koymaktadır (SBB, 2025). Küresel ölçekte yarı iletken pazarındaki hızlı büyüme ve yatırımlar ise elektronik üretimin kritik girdilerinde arz–talep dengesizliklerinin sürebileceğini; dolayısıyla işletmelerin tedarik riskini dijital araçlarla yönetmesinin önemini artırmaktadır (SIA, 2025; WSTS, 2025).

Elektronik sektörü için dijital dönüşümün en belirgin çıktıları üç grupta toplanabilir:

- Operasyonel mükemmellik ve kalite: Hata kök neden analizi, proses parametre takibi, AOI/SPI/X-Ray gibi kalite verilerinin bütünleştirilmesi ve Milyonda Hata Sayısı/yeniden işleme gibi başarı metriklerinin anlık izlenmesi.
- İzlenebilirlik ve uyum: Parti/lot bazında bileşen izlenebilirliği, seri numarası takibi, değişiklik yönetimi (ECO/ECN) ve müşteri/standart gereksinimlerine uygun raporlama.
- Tedarik zinciri görünürlüğü: Malzeme bulunurluğu, tedarikçi teslimat/kalite performansı, planlama senaryoları ve risk erken uyarı mekanizmaları.

Bu üç alanın ortak noktası, veri mimarisinin bütünlüğü (ERP–MES–PLM–QMS entegrasyonu), süreç standardizasyonu ve yönetim kapasitesidir. Bu tez kapsamında elektronik üretimde dijital dönüşümün tedarik zinciri yönetimine etkilerinin ele alınması, doğrudan bu kesişim alanında konumlanmaktadır.

Elektronik üretimde Toplam Kalite Yönetimi, yalnızca "nihai ürün muayenesi" ile sınırlı değildir; tasarımdan tedarikçiye, üretimden test süreçlerine ve müşteri geri bildirimlerine uzanan bir yaşam döngüsü yaklaşımıyla ele alınır. Elektronik sektörde kalite yönetiminin ayırt edici yönleri şunlardır:

- Mikron seviyesinde üretim hassasiyeti ve süreç kararlılığı ihtiyacı
- Bileşen çeşitliliği nedeniyle tedarikçi kalitesinin kritikliği
- Ürün güvenilirliği ve saha arızalarının maliyetinin yüksek olmasıdır.

Bu nedenle elektronik üretimde TKY uygulamaları çoğunlukla iki tamamlayıcı araç seti üzerinden kurumsallaşır:

- Süreç temelli kalite güvencesi ve standartlar

Elektronik montaj kalitesinde kabul kriterlerini tanımlayan endüstri standartları, muayene dilinin ortaklaştırılması ve tedarik zinciri boyunca kalite beklentilerinin netleştirilmesi açısından kritik rol oynar. IPC-A-610 standardı, elektronik montajların görsel kabul edilebilirlik kriterlerini tanımlayan yaygın bir referans olarak ele alınmakta; ANSI'nin standard tanıtım içeriklerinde IPC-A-610'un elektronik endüstrisinde en yaygın kabul standartlarından biri olduğu vurgulanmaktadır (ANSI, 2024). Benzer biçimde J-STD-001; lehimli elektrik/elektronik montajlarda malzeme, yöntem ve doğrulama kriterleri üzerinden süreç gereksinimlerini çerçeveleyen bir standart ailesi olarak eğitim ve uygulama içeriklerinde açıklanmaktadır (Jet Propulsion Laboratory [JPL], n.d.).

- Ölçümleme, sürekli iyileştirme ve kapalı çevrim yönetim

Elektronik üretimde TKY'nin etkinliği, Milyonda Hata Sayısı, yeniden işleme oranı, first pass yield (FPY), teslimat performansı ve müşteri iade oranları gibi göstergeler üzerinden izlenir. Burada dijital dönüşüm, TKY'nin “ölç–analiz et–iyileştir” döngüsünü hızlandıran bir kaldıraçtır: veri toplama otomasyonu, gerçek zamanlı başarı metrik panoları ve kök neden analizini destekleyen analitik katmanlar, sürekli iyileştirme disiplininin sürdürülebilirliğini artırır.

TKY'nin güncel boyutlarından biri de sürdürülebilirlik ve izlenebilirlik entegrasyonudur. Elektronik üretimde ürün bileşenlerinin izlenebilirliği; kalite kadar geri çağırma yönetimi, uyum (müşteri gereklilikleri/standartlar) ve tedarik riskleri açısından önem taşırken, aynı altyapı enerji–atık–emisyon gibi sürdürülebilirlik metriklerinin üretim verisiyle eşleştirilmesine de imkân verir. Bu yaklaşım, özellikle çok katmanlı tedarik zincirine sahip elektronik sektöründe “kalite + sürdürülebilirlik” gereksinimlerini birlikte yönetmeyi mümkün kılar (SBB, 2025; TESİD, 2025).

Elektronik üretim sektörü, çıktılarının hizmet ettiği endüstrilere göre farklı kalite, izlenebilirlik ve güvenilirlik gereksinimleriyle karşılaşır. Bu nedenle dijital dönüşüm ve TKY uygulamaları, sektör bazında farklı önceliklerle kurgulanır:

Otomotiv ekosistemi, tedarik zinciri çok katmanlı ve seri üretim yoğun olduğu için varyasyon azaltma, hata önleme ve tedarik zinciri boyunca standartlaşma gereksinimlerini öne çıkarır. Otomotivde kalite yönetimi yaklaşımı, ISO 9001 tabanına ek otomotiv şartlarını getiren çerçevelerle güçlendirilir. IATF'nin yayımladığı güncel dokümanlar, otomotiv tedarik zincirinde kalite yönetim sistemi gelişim seviyelerinin ve ISO 9001 uyumunun önemine işaret etmektedir (International Automotive Task Force [IATF], 2025). Ayrıca belgelendirme/standart kuruluşlarının açıklamalarında, IATF 16949'un ISO 9001 üzerine inşa edilerek tedarik zincirinde hata önleme, varyasyon azaltma ve sürekli iyileştirme odağını güçlendirdiği vurgulanmaktadır (DNV, n.d.). Bu çerçeve, otomotiv elektroniğinde izlenebilirliği ve süreç disiplinini “zorunlu” bir rekabet koşulu hâline getirir.

Savunma-havacılık uygulamalarında ürün güvenilirliği, konfigürasyon yönetimi, dokümantasyon ve izlenebilirlik gereksinimleri çok daha katıdır. IAQG tarafından yayımlanan açıklamalarda, 9100 serisinin havacılık/uzay/savunma tedarik zinciri boyunca kalite yönetim sistemi gereksinimlerini standardize ederek kalite-zamanlama-maliyet performansında iyileştirmeyi hedeflediği ifade edilmektedir (International Aerospace Quality Group [IAQG], n.d.). Bu sektörlerde TKY yaklaşımı; üretim proses yeterliliği kadar, tedarikçi uygunluğu, değişiklik kontrolü, test doğrulama kayıtları ve ürün yaşam döngüsü dokümantasyonu ile bütünleşir. Dolayısıyla dijital dönüşüm yatırımları, çoğunlukla izlenebilirlik, kayıt yönetimi ve kalite güvencesi altyapısını güçlendirme motivasyonu ile hız kazanır.

Savunma sanayiinde kalite gereksinimleri oldukça yüksek olup, bu gereksinimler çok aşamalı ve sistematik bir denetim süreci ile desteklenmektedir. Sektörün doğası gereği yüksek güvenilirlik, izlenebilirlik ve standartlara uyum zorunluluğu, üretim süreçlerinde kapsamlı kalite yönetim sistemlerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, savunma sanayiinde faaliyet göstermek isteyen firmaların belirli yeterlilik kriterlerini sağlaması beklenmektedir. Özellikle ana yüklenici firmalara tedarikçi olabilmek için, Endüstriyel Yetkinlik Değerlendirme ve Destekleme Programı (EYDEP) gibi programlar kapsamında belirli bir olgunluk seviyesine ulaşılması ya da firmaların kendi kalite denetim süreçlerinden başarıyla geçilmesi gerekmektedir.

Savunma sanayiine yönelik üretim faaliyetleri yalnızca yüksek kalite standartlarının sağlanmasını değil, aynı zamanda çok katmanlı kontrol ve doğrulama süreçlerinin uygulanmasını da içermektedir. Bu kapsamda; seri üretim öncesi tasarım ve proses onayları, üretim sürecinde ve sonrasında gerçekleştirilen yerinde kontrol ve kabul faaliyetleri, giriş kalite kontrol süreçleri ve üretim öncesi tekrar doğrulama adımları gibi çeşitli kalite güvence mekanizmaları uygulanmaktadır. Bu çok aşamalı yapı, üretim süreçlerinin güvenilirliğini artırmakta ve hata riskini minimize etmektedir. Nitekim savunma ve havacılık sektörlerinde üretim süreçlerinin yüksek teknoloji, yüksek maliyet ve kritik kalite gereksinimleri nedeniyle sıkı kontrol mekanizmalarına tabi olduğu belirtilmektedir (Tokel, 2023). Ayrıca, mühendislik siparişine dayalı üretim sistemlerinde kalite kontrol, doğrulama ve izlenebilirlik süreçlerinin üretim sisteminin ayrılmaz bir parçası olduğu ifade edilmektedir (Akdoğan, 2023).

Bu doğrultuda, savunma sanayiinde uygulanan çok katmanlı kalite kontrol ve denetim süreçleri, hem ürün güvenilirliğinin sağlanması hem de sektörel standartlara uyumun sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Tüketici elektroniğinde pazara çıkış süresi (time-to-market), yüksek hacim, maliyet hassasiyeti ve ürün yaşam döngüsünün kısalığı belirleyicidir. Bu sektörde kalite yönetimi; yüksek hacimli üretimde hata oranlarını minimize ederken, aynı zamanda hızlı ürün revizyonlarını yönetebilme becerisine dayanır. Tüketici elektroniği üretiminde IPC tabanlı kabul kriterleri (montaj kabulü ve lehimleme gereksinimleri) ve ISO 9001/ISO 14001 gibi genel yönetim sistemleri, tedarikçi ağında ortak bir kalite dilinin kurulmasına destek olur (ANSI, 2024; JPL, n.d.). Dijital dönüşüm ise özellikle talep dalgalanmalarının yönetimi, malzeme/yarı mamul görünürlüğü ve kalite verisinin hızlı geri beslemesi açısından kritik değer üretir.

Bu üç sektör birlikte değerlendirildiğinde; elektronik üretimde dijital dönüşüm ve TKY uygulamalarının ortak paydası izlenebilirlik, standartlaşma ve veri temelli yönetim olmakla birlikte; otomotivde “seri üretim ve varyasyon azaltma”, savunmada “yüksek güvenilirlik ve kayıt/konfigürasyon disiplini”, tüketici elektroniğinde ise “hız ve çeviklik” ön plana çıkmaktadır (DNV, n.d.; IAQG, n.d.; IATF, 2025; ANSI, 2024). Dolayısıyla elektronik üretim firmalarının dijital dönüşüm yol haritaları, hizmet ettikleri

pazar/sektör karmaşasına göre farklı başarı metrik setleri ve süreç mimarileriyle tasarlanmalıdır.

1.4. TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ VE DİJİTAL DÖNÜŞÜM ETKİSİ

Tedarik zinciri yönetimi (Supply Chain Management – SCM), bir işletmenin hammadde temininden nihai ürünün müşteriye ulaştırılmasına kadar geçen süreçte yer alan tüm faaliyetlerin; bilgi, malzeme ve finansal akışlar dikkate alınarak uçtan uca ve bütüncül bir yaklaşımla planlanması, koordine edilmesi ve kontrol edilmesini ifade etmektedir. Modern tedarik zinciri anlayışı, yalnızca lojistik ve satın alma faaliyetlerini kapsayan dar bir operasyonel bakıştan ziyade; strateji, organizasyon, teknoloji ve iş birliklerini içeren çok boyutlu bir yönetim alanı olarak ele alınmaktadır (Christopher, 2016).

Literatürde tedarik zinciri, genellikle tedarikçiler, üreticiler, dağıtıcılar ve müşterilerden oluşan bir ağ yapısı olarak tanımlanmakta; bu ağın etkinliği ise aktörler arasındaki bilgi paylaşımı, süreç uyumu ve karar mekanizmalarının bütünlük biçimde çalışmasına bağlı görülmektedir (Mentzer et al., 2001). Bu çerçevede tedarik zinciri yönetimi; işletme sınırlarını aşan, çok aktörlü ve çok katmanlı bir koordinasyon problemi olarak değerlendirilmekte; zincirin herhangi bir halkasında yaşanan aksaklığın tüm sistem performansını etkileyebileceği vurgulanmaktadır.

Tedarik zinciri yönetiminin kapsamı, yaygın olarak kabul gören SCOR (Supply Chain Operations Reference) modeli üzerinden; planlama (plan), kaynak sağlama (source), üretim (make), teslimat (deliver) ve iade (return) süreçleri etrafında tanımlanmaktadır (APICS, 2017). Bu süreçler yalnızca fiziksel malzeme akışını değil, aynı zamanda talep bilgisi, üretim planları, kalite kayıtları ve finansal veriler gibi bilgi akışlarını da içermektedir.

Planlama aşamasında talep tahmini, kapasite planlama ve envanter seviyelerinin belirlenmesi gibi kararlar alınırken; kaynak sağlama sürecinde tedarikçi seçimi, sözleşme yönetimi ve satınalma faaliyetleri yürütülmektedir. Üretim süreci, planlanan girdilerin ürünlere dönüştürüldüğü aşama olup; süreç yeterliliği, kalite güvencesi ve verimlilik bu

aşamada kritik rol oynamaktadır. Teslimat süreci, dağıtım ve lojistik faaliyetlerini kapsarken; iade süreci ise hatalı ürünler, geri çağırımlar ve yeniden işleme gibi tersine lojistik faaliyetlerini içermektedir.

Bu süreçlerin etkin yönetimi, özellikle elektronik üretim gibi yüksek ürün çeşitliliği, kısa ürün yaşam döngüsü ve yüksek kalite gereksinimi bulunan sektörlerde, rekabet avantajının temel belirleyicilerinden biri hâline gelmiştir.

Tedarik zinciri yönetiminin temel amacı, müşteri taleplerini istenen kalite ve teslimat performansı ile karşılarken toplam sistem maliyetini minimize etmektir. Ancak çağdaş SCM literatürü, bu amacı çok boyutlu bir performans çerçevesi içinde ele almaktadır. Bu çerçevede öne çıkan stratejik hedefler şu şekilde özetlenebilir:

- Maliyet etkinliği: Envanter, taşıma, satınalma ve kalite maliyetlerinin kontrol altına alınması
- Teslimat performansı: Zamanında ve eksiksiz teslimat (On-Time Delivery – OTD)
- Kalite ve güvenilirlik: Tedarikçi ve üretim kaynaklı hataların minimize edilmesi
- Esneklik: Talep dalgalanmalarına ve ürün değişikliklerine hızlı uyum sağlama
- Dayanıklılık (resilience): Tedarik kesintileri ve dış şoklar karşısında sistemin sürekliliğini koruma
- Sürdürülebilirlik: Çevresel ve sosyal etkilerin tedarik zinciri kararlarına entegre edilmesi

Bu hedefler arasında doğal gerilimler bulunmaktadır. Örneğin yüksek servis seviyesi hedefi, çoğu durumda daha yüksek envanter maliyetlerini beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenle tedarik zinciri yönetimi, tekil performans göstergelerinin optimizasyonu yerine, dengeleyici ve bütüncül bir performans yaklaşımı gerektirmektedir (Chopra & Meindl, 2023).

Tedarik zinciri performansının ölçülmesi, yönetim kararlarının etkinliğini değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. Literatürde performans ölçümü; maliyet, zaman, kalite ve esneklik gibi boyutları kapsayan çok kriterli bir yapı olarak ele

alınmaktadır. En yaygın kullanılan göstergeler arasında; stok devir hızı, servis seviyesi, teslimat süresi, talep tahmin doğruluğu, tedarikçi teslimat performansı, kalite hata oranları ve yeniden işleme oranları yer almaktadır (Gunasekaran et al., 2001).

Elektronik üretim bağlamında bu göstergelerin önemi daha da artmaktadır. Çünkü tedarikçi kaynaklı küçük bir kalite problemi, üretim hattında duruşlara, yeniden işleme faaliyetlerine ve teslimat gecikmelerine yol açarak zincirleme etki yaratabilmektedir. Bu nedenle performans ölçümü, yalnızca sonuç göstergelerini değil, süreç içi erken uyarı sinyallerini de kapsayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Geleneksel tedarik zinciri yönetimi yaklaşımları, çoğu zaman fonksiyonel silolar üzerinden yapılandırılmış; satınalma, üretim, depo ve lojistik fonksiyonları arasında sınırlı bilgi paylaşımı ile yürütülmüştür. Bu yapı, özellikle belirsizlik ve talep dalgalanmasının yüksek olduğu sektörlerde, karar gecikmelerine ve sistem genelinde performans kayıplarına neden olabilmektedir.

Literatürde bu olgu, talep bilgisinin zincir boyunca gecikmeli ve bozulmuş biçimde aktarılması sonucunda sipariş varyansının katmanlar arasında büyümesi şeklinde açıklanmakta; küçük talep değişimlerinin upstream katmanlarda daha yüksek dalgalanmalara yol açtığı gösterilmektedir (Lee et al., 1997). Elektronik üretimde kısa ürün yaşam döngüsü ve hızlı teknoloji değişimi dikkate alındığında, bu tür bilgi gecikmelerinin maliyeti daha da artmaktadır.

Bu sınırlılıklar, tedarik zinciri yönetiminde şeffaflık, entegrasyon ve gerçek zamanlı bilgi paylaşımı gereksinimini ön plana çıkarmakta; dijital dönüşüm bu gereksinimlerin karşılanmasında kritik bir kaldıraç olarak konumlanmaktadır.

1.4.1. Elektronik Üretimde Tedarik Zinciri Zorlukları

Elektronik üretim sektörü, ürün mimarisi, teknoloji yoğunluğu ve küresel entegrasyon düzeyi nedeniyle tedarik zinciri yönetimi açısından en karmaşık endüstriyel yapılardan biri olarak değerlendirilmektedir. Yüksek ürün çeşitliliği, kısa ürün yaşam döngüleri, çok

katmanlı tedarik ağı ve sık mühendislik değişiklikleri, elektronik üretimde tedarik zinciri performansını doğrudan etkileyen yapısal zorluklar yaratmaktadır. Bu bölümde, elektronik üretime özgü tedarik zinciri zorlukları literatür ve sektörel uygulamalar ışığında sistematik biçimde ele alınmaktadır.

Elektronik ürünler, genellikle yüzlerce hatta binlerce farklı bileşenden oluşan karmaşık ürün ağaçlarına (BOM) sahiptir. Bu bileşenlerin önemli bir bölümü, sınırlı sayıda küresel tedarikçi tarafından üretilmekte; bazı kritik komponentler ise tek veya az sayıda kaynağa bağımlı hâlde tedarik edilmektedir. Yarı iletkenler, mikrodenetleyiciler, güç modülleri ve özel entegre devreler bu kapsama giren tipik örneklerdir.

Bu yapı, tedarik zincirinde yüksek bağımlılık riski yaratmakta; tek bir bileşende yaşanan gecikme veya kalite problemi, tüm üretim planını aksatabilmektedir. Literatürde bu durum, elektronik üretimde tedarik riskinin diğer birçok sektöre kıyasla daha yüksek olmasının temel nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir (Chopra & Meindl, 2023). Özellikle pandemi sonrası dönemde yaşanan yarı iletken arz sorunları, elektronik tedarik zincirlerinin kırılganlığını açık biçimde ortaya koymuştur.

Elektronik üretimde talep yapısı, yüksek oynaklık (volatility) göstermektedir. Tüketici elektroniğinde hızlı model değişimleri ve kampanya bazlı satış dalgalanmaları; endüstriyel ve savunma elektroniğinde ise proje bazlı sipariş yapıları ve düzensiz talep profilleri söz konusudur. Bu durum, talep tahmin hatalarının üretim ve tedarik zinciri üzerinde çarpan etkisi yaratmasına neden olmaktadır.

Ayrıca elektronik ürünlerin yaşam döngüsü, birçok sektöre kıyasla oldukça kısadır. Yeni teknolojilerin hızlı biçimde pazara girmesi, mevcut ürünlerin kısa sürede demode olmasına ve stok risklerinin artmasına yol açmaktadır. Talep tahminindeki küçük sapmalar dahi, fazla stok, hurda veya acil tedarik gibi maliyetli sonuçlar doğurabilmektedir. Bu bağlamda elektronik üretimde tedarik zinciri yönetimi, klasik dengeleyici yaklaşımların ötesinde hızlı ve veri temelli karar mekanizmaları gerektirmektedir (Lee et al., 1997).

Elektronik üretimin ayırt edici özelliklerinden biri, mühendislik değişikliklerinin (Engineering Change Order – ECO) üretim ve tedarik zinciri süreçleri ile sürekli etkileşim hâlinde olmasıdır. Tasarım revizyonları, komponent değişiklikleri veya müşteri spesifikasyon güncellemeleri; satınalma, stok, üretim ve kalite süreçlerinde eş zamanlı güncellemeler gerektirmektedir.

ECO süreçlerinin etkin yönetilememesi durumunda; yanlış malzeme kullanımı, hatalı montaj, yeniden işleme ve müşteri şikâyetleri gibi sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Literatürde elektronik üretimde konfigürasyon yönetiminin, yalnızca mühendislik fonksiyonunun değil, tedarik zinciri yönetiminin de ayrılmaz bir parçası olduğu vurgulanmaktadır (Christopher, 2016). Bu durum, bilgi akışının ve sistem entegrasyonunun önemini artırmaktadır.

Elektronik üretimde kalite gereksinimleri, sektörlere göre farklı olmakla birlikte genel olarak yüksektir. Özellikle otomotiv, savunma ve medikal elektronik uygulamalarında; parti/lot bazlı izlenebilirlik, sertifikasyon, test kayıtları ve tedarikçi uygunluğu gibi unsurlar zorunlu hâle gelmektedir. Tedarik zincirinin herhangi bir noktasında oluşan kalite problemi, üretim hattında duruşlara ve zincirleme etkilere neden olabilmektedir.

Elektronik ürünlerde hata maliyetlerinin yüksekliği (saha arızaları, geri çağırımlar, garanti maliyetleri), tedarik zinciri boyunca kalite güvencesinin kritik önem taşımaya yol açmaktadır. Bu nedenle kalite yönetimi, elektronik üretimde yalnızca üretim aşamasına değil; tedarikçi seçimi, giriş kalite kontrolü ve süreç içi izleme faaliyetlerine entegre edilmelidir (Gunasekaran et al., 2001).

Elektronik üretim tesislerinde malzeme akışı, genellikle yüksek hızda ve karmaşık bir yapıdadır. Yarı mamul ve komponentlerin doğru zamanda, doğru hatta ve doğru miktarda bulunmaması; üretim planlarının bozulmasına ve hat duruşlarına yol açmaktadır. Özellikle SMT hatları gibi yüksek otomasyon seviyesine sahip üretim ortamlarında, küçük bir malzeme eksikliği dahi üretim kayıplarına neden olabilmektedir.

Bu bağlamda depo yönetimi, malzeme besleme, yarı mamul takibi ve üretim hattı–depo entegrasyonu, elektronik tedarik zincirinin kritik operasyonel zorlukları arasında yer almaktadır. Literatürde bu tür sorunlar, çoğunlukla bilgi gecikmeleri ve fonksiyonel silo yapılarıyla ilişkilendirilmektedir (Mentzer et al., 2001).

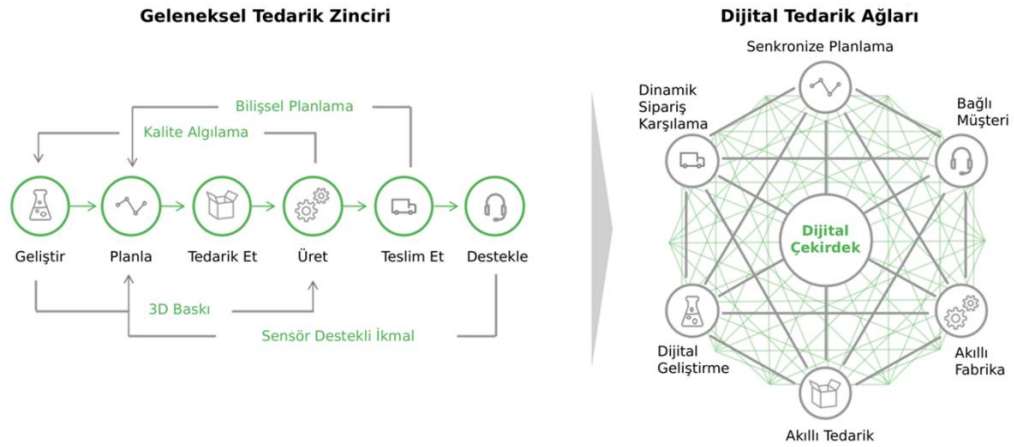
Elektronik üretim, küresel tedarik ağlarına yüksek düzeyde bağımlıdır. Jeopolitik gelişmeler, lojistik aksamalar, doğal afetler ve ticaret kısıtlamaları; elektronik tedarik zincirlerinde önemli kesintilere yol açabilmektedir. Son yıllarda yaşanan küresel krizler, elektronik sektöründe tedarik zinciri dayanıklılığının (resilience) stratejik bir gereklilik hâline geldiğini göstermiştir.

Dayanıklılık, yalnızca alternatif tedarikçi bulundurmakla sınırlı değildir; tedarik zinciri boyunca risklerin erken tespiti, senaryo bazlı planlama ve hızlı karar alma yetkinliklerini de kapsamaktadır. Bu yetkinliklerin geliştirilmesi ise, büyük ölçüde dijital araçlar ve veri temelli yönetim yaklaşımlarıyla mümkün olmaktadır (Chopra & Meindl, 2023).

1.4.2. Dijital Dönüşümün Tedarik Zinciri Yönetimine Etkileri

Dijital dönüşüm, tedarik zinciri yönetiminde yalnızca süreçlerin otomasyonunu değil; karar alma mekanizmalarının veri temelli hâle getirilmesini, zincir genelinde şeffaflığın artırılmasını ve operasyonel dayanıklılığın güçlendirilmesini hedefleyen bütüncül bir dönüşüm sürecini ifade etmektedir. Elektronik üretim gibi yüksek karmaşıklık, hız ve kalite gereksinimi barındıran sektörlerde dijital dönüşüm, tedarik zinciri performansını belirleyen temel kaldıraçlardan biri hâline gelmiştir (Vial, 2019; Verhoef et al., 2021).

Bu bölümde dijital dönüşümün tedarik zinciri yönetimine etkileri; görünürlük, entegrasyon, analitik kapasite, otomasyon ve dayanıklılık boyutları üzerinden ele alınmaktadır.



Şekil 1. Geleneksel tedarik zincirinden dijital tedarik ağına geçiş (Boyacıoğulları, 2025)

Dijital dönüşümün tedarik zinciri yönetimine en temel katkılarından biri, zincir boyunca uçtan uca görünürlüğün (end-to-end visibility) sağlanmasıdır. Nesnelerin İnterneti (IoT), sensör teknolojileri, RFID/RTLS çözümleri ve üretim sahasından gerçek zamanlı veri toplanmasını mümkün kılan altyapılar sayesinde; stok seviyeleri, yarı mamul akışı, üretim durumu ve lojistik hareketler eş zamanlı olarak izlenebilir hâle gelmektedir.

Literatürde görünürlük artışının, planlama doğruluğunu ve operasyonel karar kalitesini doğrudan etkilediği vurgulanmaktadır. Bilgi gecikmesinin azaltılması, kamçı etkisinin sınırlandırılmasına ve stok-servis seviyesi dengesinin daha etkin kurulmasına olanak sağlamaktadır (Lee et al., 1997; Chopra & Meindl, 2023). Elektronik üretimde bu etki, özellikle malzeme eksikliği kaynaklı hat duruşlarının azaltılması ve teslimat performansının iyileştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Dijital dönüşüm, tedarik zinciri süreçlerinde sıklıkla karşılaşılan fonksiyonel silo problemini aşmayı hedeflemektedir. ERP, MES, WMS, PLM ve QMS gibi kurumsal sistemlerin entegrasyonu; satın alma, üretim, kalite ve lojistik fonksiyonlarının aynı veri seti üzerinden senkronize biçimde çalışmasını mümkün kılmaktadır. Tedarik zinciri planlama süreçlerinde üretim, stok ve kapasite kararlarının bütünleşik bir yapı içerisinde ele alınması, operasyonel uyumun sağlanmasında kritik bir öneme sahiptir (Stadtler, 2015).

Elektronik üretimde entegrasyonun önemi, mühendislik değişiklikleri (ECO), alternatif parça yönetimi ve kalite kayıtlarının tutarlılığı açısından daha da belirgindir. Entegre sistemler sayesinde tasarım değişikliklerinin tedarik zinciri süreçlerine gecikmeden yansıtılması; yanlış malzeme kullanımı, hatalı montaj ve yeniden işleme risklerini azaltmaktadır. Literatürde bu tür entegrasyonların, süreç disiplini ve izlenebilirliği güçlendirdiği belirtilmektedir (Hess et al., 2016).

Dijital dönüşümün bir diğer kritik boyutu, toplanan büyük hacimli verinin analitik ve Yapay Zeka destekli karar mekanizmalarına dönüştürülmesidir. Talep tahmini, tedarik gecikmesi öngörüsü, stok optimizasyonu ve kalite anomalilerinin erken tespiti gibi uygulamalar; tedarik zinciri yönetiminde proaktif bir yaklaşımın benimsenmesini sağlamaktadır.

Özellikle elektronik üretimde kalite verilerinin analizi; hata oranlarının düşürülmesi, yeniden işleme faaliyetlerinin azaltılması ve tedarikçi performansının iyileştirilmesi açısından önemli katkılar sunmaktadır. Güncel literatür, Yapay Zeka destekli analitiğin operasyonel karar alma hızını artırdığını ve belirsizlik altında daha tutarlı sonuçlar ürettiğini göstermektedir (Deloitte, 2025; PwC, 2025).

Dijital dönüşüm, tedarik zinciri yönetiminde yalnızca analitik düzeyde değil; operasyonel iş akışlarında da otomasyonu mümkün kılmaktadır. Elektronik satınalma, tedarikçi onay süreçleri, kalite dokümantasyonu ve sertifikasyon yönetimi gibi süreçlerin dijital platformlar üzerinden yürütülmesi; manuel hataların azaltılmasına ve süreç sürelerinin kısaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu tür dijital iş akışları, özellikle çok sayıda tedarikçi ve komponentle çalışan elektronik üretim işletmelerinde idari yükü azaltmakta; satınalma ve kalite fonksiyonlarının daha stratejik rollere odaklanmasına olanak tanımaktadır (Christopher, 2016).

Dijital dönüşüm, tedarik zinciri dayanıklılığının artırılmasında da önemli bir rol oynamaktadır. Gerçek zamanlı veri, analitik ve senaryo bazlı planlama araçları; tedarik

kesintilerinin erken tespit edilmesini ve alternatif aksiyonların hızlı biçimde devreye alınmasını mümkün kılmaktadır.

Elektronik üretimde tedarik zinciri risklerinin yüksek olması, dayanıklılık kavramını stratejik bir gereklilik hâline getirmiştir. Literatürde dijitalleşmiş tedarik zincirlerinin, kriz dönemlerinde daha hızlı toparlanma (recovery) ve adaptasyon kabiliyeti gösterdiği belirtilmektedir (Chopra & Meindl, 2023).

1.4.3. Performans Göstergeleri ve Ölçülebilir Etkiler

Dijital dönüşümün tedarik zinciri üzerindeki etkilerinin anlamlı biçimde değerlendirilebilmesi için, bu etkilerin ölçülebilir performans göstergeleri üzerinden analiz edilmesi gerekmektedir. Literatürde dijital dönüşüm uygulamalarının özellikle operasyonel çeviklik, süreç görünürlüğü, kalite performansı ve teslimat güvenilirliği üzerinde etkili olduğu belirtilmektedir (Vial, 2019; Verhoef vd., 2021).

Bu kapsamda çalışmada kullanılan performans göstergeleri; teslimat performansı, stok doğruluğu, yeniden işlem oranları, Milyonda Hata Sayısı değerleri ve plan uyumu olarak belirlenmiştir. Teslimat performansı ve plan uyumu göstergeleri üretim sisteminin çeviklik ve planlama etkinliğini, stok doğruluğu dijital izlenebilirlik ve envanter görünürlüğünü, yeniden işleme oranları ile Milyonda Hata Sayısı değerleri ise kalite performansı ve süreç istikrarını temsil etmektedir. Bu göstergeler, tedarik zinciri performansının ölçülmesi ve operasyonel çıktılar üzerindeki etkilerin değerlendirilmesi amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan temel performans kriterleri arasında yer almaktadır (Gunasekaran vd., 2001).

Değişken talep yapısı ve belirsizlik koşulları altında performans göstergelerinin dinamik olarak izlenmesi ve yönetilmesi, üretim ve tedarik zinciri sistemlerinin etkinliği açısından kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Özellikle dijital teknolojiler sayesinde elde edilen veri görünürlüğü, işletmelerin karar alma süreçlerini hızlandırmakta ve operasyonel performansın sürdürülebilir biçimde iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır (Vial, 2019; Verhoef vd., 2021).

Bu bağlamda dijital dönüşüm, tedarik zinciri yönetiminde soyut bir teknoloji yatırımı olmaktan ziyade; performans ölçümü ve sürekli iyileştirme döngülerine entegre edilmiş bir yönetim yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir (Gunasekaran vd., 2001).

1.5. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmanın literatür taraması, dijital dönüşümün elektronik üretim bağlamında tedarik zinciri yönetimine etkilerini bütüncül biçimde ortaya koymak amacıyla ulusal ve uluslararası kaynakların birlikte ve sistematik olarak incelenmesi esasına dayanmaktadır.

Literatür taraması; Web of Science, Scopus ve YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanlarında ‘digital transformation’, ‘electronic manufacturing’ anahtar kelimeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Web of Science (WoS) veri tabanı üzerinde makro düzeyde bir eğilim analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, küresel literatürün temel yönelimini belirlemek amacıyla "Digital Transformation in the Manufacturing Industry" anahtar kelime grubu üzerinden ilk seviye bir tarama yapılmıştır. Yapılan tarama neticesinde 2681 makaleye ulaşılmıştır. Söz konusu makalelerin yıllara göre dağılımı incelendiğinde, konunun akademik dünyada geçirdiği dönüşüm ve kazandığı ivme nicel verilerle de açıkça kendini göstermektedir: 2020 yılından önce 173 makale yayınlanmıştır. Makale sayıları ise 2020 yılından sonra giderek artmaktadır.

- 2020: 104 makale
- 2021: 213 makale
- 2022: 295 makale
- 2023: 331 makale
- 2024: 491 makale
- 2025: 658 makale
- 2026: 416 makale (Yılın ilk yarısı itibarıyla)

Bu nicel dağılım, imalat sektöründe dijital dönüşüm, izlenebilirlik, esneklik ve kalite yönetimi gibi başlıkların akademik ilgi açısından doğrusal ve üstel bir büyüme trendi içerisinde olduğunu göstermektedir. Makale sayıları bu alandaki bilimsel üretkenliğin ve

güncelliğin hız kesmeden devam ettiğini; imalat sanayiindeki dijitalleşme pratiklerinin günümüz endüstriyel yönetim stratejilerinin en dinamik çalışma sahası olmayı sürdürdüğünü ortaya koymaktadır.

İlgili arama sonucunda listelenen 2681 makale atıf sayılarına göre sıralanmış; çalışma odağı ile yüksek uyum gösteren kaynaklar seçilerek tematik bir çerçevede aşağıdaki tabloda makale yayın yılı geçmişten günümüze olacak şekilde sıralı olarak düzenlenmiştir.

Tablo 4: Üretimde Dijital Dönüşüm Uygulamalarına İlişkin Literatür İncelemesi

No	Araştırma (Yazar & Yıl)	Araştırma Alanı	Veri Seti	Metodoloji	Sonuç ve Temel Bulgular
1	Sarkar, Shardeo, Dwivedi vd. (2024)	Endüstri 4.0'dan Endüstri 5.0'a Geçişin Kritik Başarı Faktörleri (CSF)	Gelişmekte Olan Ülkelerdeki Çelik Üretim Sektörü Karar Vericileri	En Kötü-En İyi Yöntemi (B-BWM)	Değer yaratmak için ileri teknoloji benimsenmesi, akıllı üretim için yüksek analitik yetenek, maliyet/finansman ve siber güvenlik gibi faktörlerin esnek sistemler kurmada kritik olduğunu bulmuştur.
2	Liu, Zheng ve Bao (2024)	Dijital İkiz Tabanlı Üretim Sistemleri (DTMS)	Mevcut DTMS Literatürü	Kapsamlı Literatür Taraması ve Referans Modeli	Dijital ikiz tabanlı üretim sistemlerine yönelik yeni bir referans model sunmuş ve gelecekteki araştırma trendlerini haritalandırmıştır.
3	Narula, Puppala, Kumar vd. (2023)	Yalın Üretim ve Endüstri 4.0 Entegrasyonu	Üretim Sanayii İşletmeleri	Kavramsal Model ve Ampirik Analiz	Endüstri 4.0 teknolojilerinin yalın üretim araçlarını desteklediğini ve dijital dönüşümde kaldıraç görevi gördüğünü ortaya koymuştur.
4	Moghrabi vd. (2023)	Sürdürülebilir Üretim ve Dijital	Bulut Bilişim ve Üretim Verileri	Literatür İncelemesi ve Durum	Bulut bilişim ve veri analitiğinin üretim sektöründe

		Dönüşüm		Analizi	sürdürülebilir iş pratiklerini ve operasyonel verimliliği artırdığını göstermiştir.
5	Tian, Chen, Tian vd. (2023)	Dijital Dönüşüm Pratikleri ve Operasyonel İyileşmedeki Rol	Çinli Üretim Firmalarının 2016-2020 Yılları Arasındaki Resmi Yıllık Raporları	Pratik Tabanlı Görüş, Metin Analizi ve Sabit Etkili Model	Dijital dönüşüm pratiklerinin işgücü verimliliği, fiziksel varlık etkinliği ve işletme sermayesi etkinliği üzerinde anlamlı/pozitif etkisi olduğunu; dış rekabetin bu pozitif ilişkiyi zayıflattığını bulmuştur.
6	Gaglio, Kraemer-Mbula ve Lorenz (2022)	Dijital Dönüşümün İnovasyon ve Verimliliğe Etkisi: MSE Örneği	Johannesburg'daki 711 Mikro ve Küçük Üretim İşletmesi	Orijinal Anket Verisi ve Genişletilmiş Crepon-Duguet-Mairesse Modeli	Sosyal medya ve internet amaçlı iş telefonu gibi erişilebilir dijital iletişim teknolojilerinin inovasyonu, inovasyonun da işgücü verimliliğini doğrudan ve pozitif yönde etkilediğini kanıtlamıştır.
7	Fatima, Tanveer, Waseemullah vd. (2022)	IoT ve Endüstri 5.0 ile Üretim Tesisi ve Depo Otomasyonu	Endüstriyel Sektörlerdeki IIoT Uygulamaları ve Endüstri Verileri	Literatür Taraması, Uygulama Analizi ve Zorluk Değerlendirmesi	IoT'nin veri toplama, envanter yönetimi ve en kısa rotayı hesaplayarak depo otomasyonunu iyileştirdiğini; Endüstri 5.0'ın insan-makine etkileşiminde denge kurarak faydayı maksimize ettiğini açıklamıştır.
8	Akundi, Euresti, Luna vd. (2022)	Endüstri 5.0 Alanındaki Mevcut Araştırma Eğilimleri	IEEE, ScienceDirect ve MDPI Veri Tabanlarından Alınan 196 Makale Özeti	Metin Madenciliği, Frekans Analizi ve Unsupervised Yapay Öğrenme	Literatürü 5 ana temada (tedarik zinciri optimizasyonu, kurumsal inovasyon, akıllı/sürdürülebilir üretim, IoT/AI/Büyük Veri dönüşümü, insan-makine bağlantısı) sınıflandırmış; insan-makine iş birliğinin

					yükseldiğini göstermiştir.
9	Kumar, Agrawal, Wankhede vd. (2022)	Dijital Üretimde Endüstri 4.0'ın Sosyal Kabul Edilebilirliği	Üretim Birimlerinden Toplanan 121 Anket Yanıtı	Açıklayıcı Faktör Analizi ve Bulanık DEMATEL Teknikleri	Endüstri 4.0 boyutlarını güvenlik, psikolojik, davranışsal, mevzuata uyum, kültürel, çalışan ve pazar olmak üzere 7 kategoride incelemiş; "güvenlik ihlalleri" ve "veri hırsızlığının" en kritik boyutlar olduğunu saptamıştır.
10	Khin ve Kee (2022)	Endüstri 4.0 Benimseme Kararını Etkileyen Faktörler	Malezya Üretim Sanayiindeki Firmalarla Yapılan 15 Yüz Yüze Görüşme	Çoklu Durum Çalışması, Tematik Analiz ve Gömülü Teori (Grounded Theory)	Beklenen fayda, pazar fırsatları ve kalitenin "itici"; kaynak ve becerilerin "kolaylaştırıcı"; doğru insan kaynağı bulma, finansman/bilgi eksikliği ve zihniyet değişimi gibi faktörlerin ise "engelleyici" olduğunu bulmuştur.
11	Nguyen, Trestian, To vd. (2021)	Dijital İkiz ve 5G Teknolojileri	Telekomünikasyon ve Endüstriyel Ağlar	Teknolojik İnceleme ve Çerçeve Önerisi	5G ve ötesi ağlarda dijital ikiz teknolojisinin uygulanabilirliğini, karşılaşılan zorlukları ve geleceğe yönelik çözümleri incelemiştir.
12	Wang ve Su (2021)	Dijital Dönüşümün İtici Faktörleri	Çin'deki Üç Ağır Sanayi Üretim İşletmesi	Teknoloji-Organizasyon-Çevre Çerçevesinde Çoklu Durum Çalışması	Yapay Zeka (AI) teknolojilerinin benimsenmesini sağlayan teknolojik, organizasyonel ve çevresel faktörleri keşfetmiş ve üretim sanayii için bir AI iş modeli mekanizması önermiştir.
13	ElMaraghy, Monostori, Schuh vd. (2021)	Üretim Sistemlerini n Evrimi, Dönüşümü ve Geleceği	Ürün, Teknoloji, İş Stratejileri ve Üretim Paradigmaları	Tarihsel Gelişim İncelemesi ve Proaktif Eğilim	Akıllı adaptif sistemlere geçişi incelemiş; insan merkezli karar alma ile zeki sistemlerin ağsal iş birliğine dayanan

			Eksenindeki Vakalar	Analizi	"Adaptif Bilişsel Üretim Sistemi" (ACMS) vizyonunu ortaya koymuştur.
14	Leng, Sha, Wang vd. (2021)	Endüstri 5.0'ın Gelişim Çizgisi, Mimarisi ve Geleceği	Küresel Endüstriyel Dönüşüm ve Endüstri 5.0 Literatürü	Sistematiik Literatür İncelemesi ve Mimari Tasarım	Endüstri 5.0'ın üç temel özelliğini (insan merkezlilik, sürdürülebilirlik, dayanıklılık) tanımlamış; teknik, gerçeklik ve uygulama boyutlarından oluşan üç boyutlu bir sistem mimarisi kurmuştur.
15	Singh, Sharma ve Dhir (2021)	Dijital Dönüşümün Öncülleri ve Firma Performansı na Etkisi	Hindistan Üretim Sanayiindeki Firmalar	Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik Modellemesi	Rekabet baskısı, organizasyonel farklılık, BT hazırlığı ve stratejik uyumun dijital dönüşümü güçlü etkilediğini; dijital dönüşümün de bu öncüller ile firma performansı arasında aracılık ettiğini bulmuştur.
16	Guo ve Xu (2021)	Dijital Dönüşümün Firma Performansı Üzerindeki Maliyet ve Fayda Etkileri	Çin'deki 2254 Üretim Şirketinin 2010-2020 Yılları Arasındaki Panel Verileri	Ekonometrik Panel Veri Analizi ve İstatistiksel Modelleme	Dijital dönüşüm yoğunluğunun operasyonel performansla doğrusal/pozitif; kâr odaklı finansal performansla ise "U-şeklinde" bir ilişkide olduğunu ve operasyonel etkinliğin daha kalıcı olduğunu kanıtlamıştır.
17	Buer, Strandhagen, Semini vd. (2021)	Üretimin Dijitalleşmesi: Üretim Ortamı ve Şirket Büyüklüğün ün Etkisi	212 Norveçli Üretim Şirketine Gönderilen Anket Verileri	İki Yönlü Varyans Analizi	Büyük ölçekli firmaların, KOBİ'lere kıyasla taban dijitalleşmesinde ve BT yetkinliğinde anlamlı derecede ileri olduğunu saptamış; farklı üretim ortamları arasında ise

					anlamalı fark bulamamıştır.
18	Lee, Liu, Trappey vd. (2021)	Gelişmiş Üretim ve Mühendislik te Dijital Dönüşüm Eğilimleri	Üretim ve Mühendislik Literatüründen Seçilen 99 Makale	Makine Öğrenmesi Tabanlı Konu Modelleme ve Bibliyometrik Analiz	Üretim literatürünü 6 başlıkta (akıllı fabrika, sürdürülebilirlik/ürün-hizmet sistemleri, inşaatta dijitalleşme, kamu altyapısı, teknoloji merkezli ve iş modeli merkezli dönüşüm) haritalandırmıştır.
19	Culot, Orzes, Sartor vd. (2020)	Endüstri 4.0 Ekseninde Üretimin Geleceğine Yönelik Senaryolar	Akademi ve Uygulamadan Seçilen 76 Uzman	Değer Zinciri Perspektifli Delphi Tabanlı Senaryo Analizi	Talep yapısı, veri şeffaflığı, eklemeli üretim/robotik olgunluğu ve akıllı ürün yayılımı olmak üzere 4 temel itici güce dayalı, geleceğe yönelik 8 farklı olası üretim senaryosu geliştirmiştir.
20	Ghadge, Kara, Moradlou vd. (2020)	Endüstri 4.0'ın Tedarik Zincirine Etkisi	Stratejik, Organizasyonel, Teknolojik, Yasal ve Etik Boyut Verileri	Kritik Literatür İncelemesi ve Sistem Dinamikleri Simülasyonu Modellemesi	Endüstri 4.0'ın tedarik zinciri parametreleri üzerindeki etkilerini simüle etmiş; bu teknolojik dönüşümün getireceği zorlukları ve fırsatları yönetmek için dinamik bir geçiş çerçevesi tasarlamıştır.
21	Garay-Rondero, Martinez-Flores, Smith vd. (2020)	Dijital Tedarik Zinciri ve Endüstri 4.0	Tedarik Zinciri Bileşenleri	Kavramsal Model Geliştirme	Endüstri 4.0 kapsamında yeni nesil dijital tedarik zincirlerinin temel bileşenlerini ve hızlandırıcı faktörlerini tanımlayan bir model sunmuştur.
22	Rajput ve Singh (2020)	Döngüsel Ekonomi ve Temiz Üretim İçin Endüstri 4.0 Modeli	Özelleştirilmiş ve Üst Düzey Ürün Üretim Verileri	Karışık Tam Sayılı Doğrusal Programlama Matematiksel Modellemesi	Enerji tüketimi ile makine işlem maliyeti arasındaki ödünleşimi optimize eden ve sensörlerle gerçek zamanlı bilgi yakalayarak toplam maliyeti/enerjiyi

					minimize eden bir model test etmiştir.
23	Narula, Prakash, Dwivedy vd. (2020)	Endüstri 4.0 Uygulamalarında Sorumlu Anahtar Faktörler	Mevcut Literatürden Oluşturulan Faktör Havuzu ve Uzman Değerlendirmeleri	Faktör Analizi, Temel Bileşenler Analizi (PCA) ve Madde Analizi	Strateji, liderlik ve kültürün Endüstri 4.0 yolculuğundaki en temel dönüşüm unsurları olduğunu; ayrıca dijital ikiz, sanal test ve simülasyonların tasarımıdaki kritik rolünü ampirik olarak doğrulamıştır.
24	Krykavskyy, Pokhylchenko ve Hayvanovich (2019)	Ukrayna İşletmelerinde Endüstri 4.0 Tedarik Zinciri Gelişim Dinamikleri	Ukrayna'da Farklı Ölçek ve Sektörlerde Faaliyet Gösteren İşletmeler	Tabakalı Orantılı Örneklem (Stratified Proportional Sampling) Yöntemi	Dijital dönüşümün klasik yönetim modellerinin operasyonel/stratejik düzeyleri üzerindeki etkilerini belirlemiş; Ukraynalı işletmelerin dijitalleşmeye hazır olma düzeylerini diğer ülkelerle karşılaştırmıştır.
25	Frank, Dalenogare ve Ayala (2019)	Üretim Firmalarında Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Uygulama Örüntüleri	92 Üretim Şirketi Anket Verileri	Anket Yöntemi ve Ampirik Örüntü Analizi	Endüstri 4.0'ın "ön uç" (Akıllı Üretim, Ürün, Tedarik Zinciri, Çalışma) ve "taban" (IoT, bulut, büyük veri analitiği) teknolojileri ayrımını sunmuş; Akıllı Üretimin merkezi rolünü kanıtlamıştır.
26	Nahavandi (2019)	Endüstri 5.0 Kavramı ve İnsan Merkezli Çözümler	Robotik, Beyin-Makine Arayüzü ve Yapay Zeka Gelişmeleri	Kavramsal İnceleme ve Ekonomik Projeksiyon Analizi	İnsanı üretimden dışlamadan verimliliği artırmak için robotların insan beyniyle entegre çalıştığı Endüstri 5.0'ı tanıtmış; bu paradigmanın işleri yok etmek yerine yeni istihdam yaratacağını tartışmıştır.
27	Ardolino, Rapaccini, Saccani vd. (2018)	Endüstriyel Şirketlerin Hizmet Dönüşümün	Dört Farklı Endüstriyel Şirkete Ait Durum	Veri-Bilgi-İlim-Hikmet (DIKW) Modeli ve	IoT'nin veri toplama için temel olduğunu, Öngörücü Analitiğin performans sağlayıcı

		de Dijital Teknolojilerin Rolü	Uygulamaları	Durum (Vaka) Çalışması	profile geçişte zorunlu olduğunu ve Bulut Bilişimin standartlaştırılmış/tekrarlanabilir hizmet ölçeklemesi sağladığını bulmuştur.
28	Sarvari, Ustundag, Cevikcan vd. (2018)	Endüstri 4.0 Dönüşümü İçin Teknoloji Yol Haritası	Stratejik ve Teknolojik Kurumsal Dönüşüm Dinamikleri	Kavramsal Süreç Modellemesi ve Yol Haritası Tasarımı	Başarılı bir dijital dönüşüm süreci için kurumlara tamamen dijital bir işletme olma yolundaki sonraki adımları planlama ve uygulamada rehberlik edecek doğru bir teknoloji yol haritası sunmuştur.

İlgili literatür araştırmasına Web of Science (WoS) veri tabanı üzerinde mikro düzeyde bir eğilim analizi gerçekleştirilerek devam edilmiştir. Bu kapsamda, küresel literatürün temel yönelimini belirlemek amacıyla "Digital Transformation in the Electronics Manufacturing" anahtar kelime grubu üzerinden bir tarama yapılmıştır. Yapılan tarama neticesinde doğrudan bu alana odaklanan 50 makaleye ulaşılmıştır.

Elde edilen 50 çalışma yayın yıllarına göre sıralanmış ve tek tek incelenmiştir. Araştırmanın kapsamıyla uyumlu bulunan çalışmalar, yayın yılı esas alınarak Tablo 5'te kronolojik olarak sunulmuştur.

Tablo 5: Elektronik Üretimde Dijital Dönüşüm Uygulamalarına İlişkin Literatür İncelemesi

N o	Araştırma (Yazar & Yıl)	Araştırma Alanı	Veri Seti	Metodoloji	Sonuç ve Temel Bulgular
1	Rashid, A. & Rasheed, R. (2026)	Yapay Zeka destekli tedarik zinciri risk yönetimi ve tedarik zinciri esnekliği	Otomotiv, havacılık, elektronik ve endüstriyel imalat sektörlerinden 741 katılımcı	Yapısal Eşitlik Modellemesi ve Dinamik Yetenekler Perspektifi	Yapay Zeka tabanlı otonom esnekliğin örgütsel anlamlandırma süreçlerini güçlendirdiğini ve tedarik zinciri

					kesintilerinden kaynaklanan finansal kayıpları azalttığını doğrulamaktadır.
2	Mukherjee, S., Sharma, R., Panigrahi, R. R. & Shrivastava, A. K. (2026)	Döngüsel Tedarik Zinciri performansında dijital dönüşümün rolü	Scopus veri tabanından seçilen 60 adet hakemli makale	Sistematiik Literatür İncelemesi	IoT, blokzincir, Yapay Zeka ve büyük veri teknolojilerinin; tedarik zincirinde izlenebilirliği, kaynak verimliliğini ve paydaş iş birliğini optimize ettiğini saptamıştır.
3	Huang, S. C., Siao, Z., Gul, M. & Lo, H. W. (2026)	Kurumsal dijital dönüşüm süreçlerinde kritik başarı faktörleri	Elektronik imalatı sektöründeki literatür verileri ve uzman görüşleri	Modifiye Edilmiş Gri Heterojen Etki ve Güç Azaltma yöntemi	Elektronik imalatında dijital başarıyı belirleyen en önemli unsurların; üst yönetim desteği, departmanlar arası entegrasyon yeteneği ve veri paylaşım mimarisi olduğunu göstermiştir.
4	Ayutaya, K. C. N., Thaweechai boonwong, J. & Pimpaporn, T. (2026)	Endüstri 4.0 teknolojileri adaptasyonu ve sürdürülebilir rekabet avantajı	Tayland elektrik-elektronik sektöründeki 240 üretim müdürü	Kaynaklara Dayalı Görüş bağlamında Kovaryans Tabanlı Yapısal Eşitlik Modellemesi	Endüstri 4.0 adaptasyonunun rekabet gücünü doğrudan artırdığını; döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir imalat süreçlerinin bu ilişkide anahtar aracı değişkenler olduğunu göstermiştir.
5	Barros, V. & Ramos, I. (2025)	Bilgi teknolojileri platformlarında kolektif dikkat yüklenmesi	Küresel bir mühendislik ve elektronik firmasının operasyonel birimleri	Nitel yorumlayıcı vaka çalışması analizi	Aşırı bilgi ve kontrolsüz iş birliği platformlarının çalışanlarda odaklanma ve dikkat dağınıklığı yaratarak

					hedeflenen performans artışını engelleyebileceğini ortaya koymuştur.
6	Sandhu, S., Zumeit, A., Tian, Z. Y., Vinciguerra, V. & Dahiya, R. (2025)	Yarı iletken imalatında atık su zorlukları ve çevresel çözümler	Sektörel atık su bileşenleri ve kimyasal atık veri setleri	Çevresel etki incelemesi ve teknik literatür değerlendirmesi	Geleneksel yarı iletken üretiminin yüksek su/enerji tüketimine karşı, toksik kimyasal kullanımını azaltan "Basılı Elektronik" yöntemini sürdürülebilir bir alternatif olarak sunmuştur.
7	Blyler, J. E. & Joshi, S. (2025)	Yarı iletken ekosisteminde sistem mühendisliği ile dijitalleşme	Sektörel ekosistem bileşenleri ve çiplet mimarileri	Model Tabanlı Sistem Mühendisliği ve Dijital İkiz analizi	Otomotiv ve havacılığa kıyasla dijitalleşmede daha yavaş ilerleyen yarı iletken pazarında, sanal/dijital ikiz modellemelerinin entegrasyon sürecini hızlandıracağını açıklamıştır.
8	Zhong, X. L. (2025)	Küresel tedarik zinciri kesintilerinde tedarik riski yönetimi	Senaryo simülasyonları ve elektronik imalatı Malzeme Listesi (BOM) yapıları	Esnek Güvenilirlik Teorisi, ağ analizi ve dijital ikiz simülasyon tekniği	Tahmin, koruma, tamponlama ve kurtarmadan oluşan 4 aşamalı bir modelin, operasyonel maliyetleri artırmadan teslimat istikrarını ve envanter devir hızını iyileştirdiğini göstermiştir.
9	Mubarik, M., Zviniene, S. M., Mubarak,	Endüstri 4.0 ile pandemi sonrası tedarik zinciri performans yönetimi	Malezya elektrik-elektronik sektöründeki 152 geçerli	Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik	Dijital dönüşümün entegrasyon ve iş birliği yeteneklerini geliştirdiğini; süreç inovasyonu ile

	F. M., Ghobakhloo, M. & Evans, R. (2024)		KOBİ verisi	Modellemesi	kırılganlık karşıtlığının performansı yukarı taşıdığını doğrular.
10	Alaniz-Muñoz, J. I., Zepeda, A. S. O. & Ahumada-Tello, E. (2024)	Proje yönetimi metodolojileri ile üretim verimliliğinin artırılması	Telekomünikasyon frekans filtreleri üreten bir firmanın üretim verileri	Kritik Yol Analizi ve Microsoft Project destekli Gantt şeması takibi	Geleneksel planlama yöntemlerinden yapısal proje yönetimi araçlarına geçişin; duruş sürelerini ve israfı azaltarak zamanında teslimat oranını ve satış performansını artırdığını kanıtlar.
11	Zhang, L. M., Gu, F. & He, MK. (2024)	Tedarik zinciri dijital dönüşümünün performans üzerindeki etkisi	Çin'deki makine, elektronik ve beyaz eşya imalat sektörlerinden 379 katılımcı	PLS-SEM ve Bulanık Küme Nitel Karşılaştırmalı Analiz karması	Tedarik zinciri yeniden yapılandırılabilirliğini, dijital dönüşümün performansa olan etkisinde kritik bir aracı rol oynadığını ve yüksek performans için esnek konfigürasyonlar gerektiğini saptar.
12	Manta-Costa, A., Araújo, S. O., Peres, R. S. & Barata, J. (2024)	İmalat sektöründe endüstriyel makine öğrenimi uygulamaları ve trendler	Kestirimci bakım, anomali tespiti ve kalite kontrol literatür verileri	PRISMA kılavuzuna uygun olarak yürütülen Sistematik Literatür İncelemesi	Endüstri 4.0 döneminde makine öğreniminin rolünü özetler; fabrikalarda sürdürülebilir, tekrarlanabilir ve güvenilir performans elde etmek için ölçeklenebilir uygulama stratejileri sunar.
13	Raileanu, S., Borangiu,	Dijital ikiz çözümleri için veri toplama	Gerçek zamanlı üretim ekipman	Açık mimari tasarımı ve siber-fiziksel	Fiziksel ve sanal üretim katmanlarını senkronize eden;

	T., Lentoiu, I., Anton, F. & Negoita, R. (2024)	sistemleri mimarisi	verileri ve nesnelerin interneti ağ modelleri	sistemler entegrasyonu	tüketici elektroniği, otomotiv ve havacılık gibi alanlara kolayca uyarlanabilen modüler bir veri toplama rehberi sunmaktadır.
14	Filz, M. A., Bosse, J. P. & Herrmann, C. (2024)	Çok aşamalı üretim sistemlerinde veri odaklı kalite yönetimi platformu	Elektronik üretim hatlarındaki süreç-ürün etkileşimi ve hat verileri	Teknik platform mimarisi tasarımı ve web uygulaması vaka doğrulaması	İzole ve katı IT çözümlerini ortadan kaldıran bütüncül bir dijital platform yaklaşımı önermekte ve toplanan büyük veri akışlarını kalite yönetimi için ticari değere dönüştürmektedir.
15	Torrecilla-García, J. A. vd. (2023)	Hizmet Olarak İmalat (MaaS) iş modelinde nesnelerin internetinin rolü	Yüksek hassasiyetli elektronik bileşenler üreten iki Avrupa firmasının verileri	Keşfedici çoklu vaka çalışması analizi	IoT altyapısının esnek üretim kapasitesi yaratarak hem MaaS tabanlı organizasyonlar hem de üretim tesisleri için yeni gelir ve verimlilik alanları açtığını göstermiştir.
16	Ates, A. & Acur, N. (2022)	Dijital dönüşüm yoluyla teknolojik demodedir/eskimenin önlenmesi	İngiltere'deki yüksek teknoloji odaklı bir imalat KOBİ'sinin boylamsal verileri	2009-2020 yıllarını kapsayan yorumlayıcı boylamsal vaka çalışması	Firmaların pazardaki dalgalanmalara karşı bilişsel olmayan dinamik yetenekler geliştirerek teknolojik demode olma tuzağından nasıl kaçınabileceklerini açıklayan bütünsel bir çerçeve sunmuştur.
17	Chen, R. L., Chen, X. Z., Wang, L. &	Akıllı üretime dayalı elektronik montaj ve çekirdek sanayi	Devre kartı üretimi ve elektronik montaj	Vaka çalışması ve derin öğrenme	Devre kartlarındaki metal kalıntısı hatalarının kök nedenini bulmak için

	Li, J. X. (2022)	süreçleri	hatlarındaki kalite logları	(Bayesian Ağları ve CNN) deneyleri	Bayesian ağlarını, Otomatik Optik Muayene (AOI) doğruluğunu artırmak için ise CNN modellerini başarıyla uygulamıştır.
18	Mueller, D. & Vogelsang, F. (2021)	Elektronik imalatında akıllı etiket verileri ile akıllı üretim lojistiği	Bir elektronik imalat tesisinin atölye lojistik süreç metrikleri	Disiplinlerarası uzman çalıştayları ve olgunluk seviyesi sınıflandırması	Akıllı etiketlerin (SL) atölye ortamlarının dijital dönüşümünde temel bir unsur olduğunu doğrular ve üretim lojistiğinde veri odaklı yönetim bulguları sunmuştur.
19	Das, A. & Dey, S. (2021)	Küresel üretim değer ağlarında platform ekosistemleri ve Endüstri 4.0	Elektronikten gıdaya farklı sektörlerden 4 büyük çok uluslu şirketin verileri	Keşfedici çoklu vaka incelemesi ve OLI Paradigması analizi	Endüstri 4.0 ve platform modellerinin birleşik gücünün, çok uluslu şirketlerin bilgi asimetrisi ve mülkiyet-konum-içselleştirme (OLI) avantajlarını nasıl yeniden tanımladığını açıklamıştır.
20	Beliatis, M. J. vd. (2021)	Metal ve elektronik imalatında izlenebilirlik için endüstriyel IoT uygulamaları	GPV Group elektronik ve mekanik üretim tesislerindeki ürün takip verileri	Karşılaştırmalı IoT teknolojileri taraması ve yol haritası tasarımı	Üretim adımları boyunca ürünlerin coğrafi konumunun izlenmesinin, iç tedarik zincirinde malzeme akışını ve üretim döngüsü verimliliğini optimize ettiğini göstermektedir.
21	Jayanth, B. V. vd. (2020)	Elektronik imalat sektöründe yalın üretim uygulamaları	Bir Danışmanlık firmasının mühendislik ve yönetim	Ampirik gözlem ve yalın üretim araçlarının canlı hat	Dalgalı ve rekabetçi piyasa koşullarına karşı yalın araçların üretim hatlarına entegrasyonunun,

			hatlarındaki gözlemler	uygulaması	hataları azaltarak verimlilik ve kaliteyi %23 artırdığını ortaya koymuştur.
22	Zinn, J. & Vogel-Heuser, B. (2019)	Elektronik imalatında Endüstri 4.0 kullanım senaryoları ve adaptasyonu	Değer katan somut otomasyon senaryolarına ilişkin mülakat çıktıları	Sanayileşmiş ülkelerdeki 8 elektronik imalat şirketi ile kalitatif uzman mülakatları	Gelişmiş pazarlardaki elektronik üreticilerine en yüksek operasyonel ve finansal katma değeri sağlayan spesifik Endüstri 4.0 uygulamalarını ve mevcut adaptasyon düzeylerini incelemiştir.
23	Janik, A. & Ryszko, A. (2018)	Bibliyometrik analiz ile Endüstri 4.0 alanının haritalandırılması	Web of Science veri tabanından alınan 1990-2018 dönemi yayın metadata verileri	Bibliyometri k ortak kelime ve atıf analizi	Endüstri 4.0 kavramının geçmişten günümüze gelişimini haritalandırarak literatürdeki kavramsal boşlukları, üretim etkinliği ve esneklik odaklı gelecek zorluklarını tanımlamıştır.
24	Benesová, A., Hirman, M., Steiner, F. & Tupa, J. (2018)	Endüstri 4.0 konseptinde elektronik imalatı için eğitim gereksinimleri	Elektronik üretim hatlarındaki çalışan anketleri ve beceri gereksinimleri	Anket analizi ve yarı kantitatif risk değerlendirme matrisi yöntemi	Akıllı fabrikalardaki siber-fiziksel sistemlerin yönetimi için gereken yüksek nitelikli çalışan profillerini tanımlar ve dijitalleşmenin getirdiği eğitim risklerini analiz etmiştir.
25	Balfağih, H. & Yunus, B. (2014)	Elektronik imalat sektöründe tedarik zinciri yönetim performansı	Malezya elektronik imalat sektöründeki lojistik ve	SCOR Çerçevesi ve Sistem Yaklaşımı modelini	Tedarik zincirindeki beş temel faktörün (kalite, zaman, bilgi, esneklik ve entegrasyon)

			operasyon metrikleri	birleştiren bütünleşik analiz	performans üzerindeki etkilerini ampirik olarak inceleyerek imalat pratiklerine katkı sunmuştur.
--	--	--	----------------------	-------------------------------	--

Türkiye’de dijital dönüşüm alanında yazılmış lisansüstü tezlerin tamamını kapsayacak şekilde YÖK Ulusal Tez Merkezi üzerinden “dijital dönüşüm” anahtar kelimesiyle gerçekleştirilen tarama sonuçları incelenmiş; toplam 473 lisansüstü tez başlık, yıl, üniversite ve tez türü bilgileri üzerinden değerlendirilmiştir.

Elde edilen 473 lisansüstü tez yayın yıllarına göre sıralanmış ve tek tek incelenmiştir. Araştırmanın kapsamıyla uyumlu bulunan tezler, yayın yılı esas alınarak Tablo 6’da kronolojik olarak sunulmuştur

Tablo 6: Elektronik Üretimde Dijital Dönüşüm Uygulamalarına İlişkin Yazılan Tezlerin İncelemesi

No	Araştırma (Yazar & Yıl)	Tez Adı	Araştırma Alanı	Sonuç ve Temel Bulgular
1	YÜKSEL DEĞİRME NCİOĞLU DEMİRAL AY (2026)	İnsan-robot etkileşimli montaj hatlarının tasarımı ve dengelenmesi için yeni modeller ve çözüm yaklaşımları	Endüstri Mühendisliği	Endüstri 5.0 ekseninde, montaj hatlarının optimizasyonu için karma tamsayılı doğrusal programlama modelleri ve memetik algoritma tabanlı bir meta-sezgisel çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Gripper maliyetlerini de içeren bu yaklaşımın esnek üretim yapılarında hat dengeleme kararlarına analitik bir zemin sunduğu saptanmıştır.
2	SABİRE ÖZKURT (2026)	Dijital dönüşüm, iş performansı ve iş tatmini üzerine bir alan araştırması	İşletme	İmalat sahasındaki teknolojik adaptasyon algısının çalışan performansı ve iş tatmini üzerinde doğrudan pozitif bir etki yarattığı ampirik olarak kanıtlanmıştır. Ayrıca iş tatmininin bu süreçte kısmi aracılık rolü üstlenerek operasyonel çıktıları

				dolaylı olarak beslediği belirlenmiştir.
3	YAKUP BEDİRHAN MENTEŞE (2026)	Endüstriyel ekipmanlarda Yapay Zeka destekli ön kestirimci bakım stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanması	Mekatronik Mühendisliği	Akıllı fabrikalarda makine güvenilirliğini artırmak adına sensör verilerini XGBoost algoritmasıyla işleyen ön kestirimci bir bakım mimarisi kurgulanmıştır. CNC freze tezgahı verileriyle yapılan uygulamada, bu yaklaşımın plansız duruş sürelerini ve bakım maliyetlerini minimize ederek üretim verimliliğine doğrudan katkı sağladığı görülmüştür.
4	İLKER TÜZÜN (2026)	Küçük ve orta ölçekli tedarikçilerde tedarik 4.0 stratejisinin benimsenmesinin incelenmesi	İşletme	KOBİ'lerin Tedarik 4.0 dönüşüm öncülleri TOE çerçevesinde ampirik olarak değerlendirilmiştir. Veri odaklı ve dijital tabanlı tedarik girişimlerinin, tedarik zinciri entegrasyonunu güçlendirdiği ve bunun da işletmelerin operasyonel performans kriterleri üzerinde belirleyici bir kaldıraç görevi gördüğü ortaya konmuştur.
5	EZGİ KÜÇÜKBAŞ (2025)	Endüstri 4.0 çağında Yapay Zeka teknikleri ile takım ucu konum kestirimi: Sanayide bir dijital dönüşüm örneği	Bilgisayar Mühendisliği	Talaşlı imalatla sensör verilerinden hareketle kesici takım ucu aşınma ve konum tahminleri yürütülmüştür. Derin öğrenme mimarilerinden LSTM algoritmasının en düşük hata skorlarını (MAE ve RMSE) ürettiği, bu sayede ekipman ömrünün uzatılması ve hat verimliliğinin artırılmasında güçlü bir öngörü aracı sunduğu saptanmıştır.
6	HÜMA YİĞİT KOÇAN (2025)	Organizasyonlarda dijital dönüşüm: Liderliğin rolü ve inovasyona etkisi	İşletme	Dijital dönüşüm süreçlerinde liderlik tipolojilerinin inovasyon kabiliyetine etkisi nicel yöntemlerle ele alınmıştır. Teknolojik dönüşümün başarısında, dijital dönüştürücü liderlik yaklaşımının ve üst yönetim farkındalığının, bireysel yenilikçi

				çalışma davranışları ile kurumsal inovasyon çıktıları arasındaki ilişkide kritik bir moderatör rol oynadığı tespit edilmiştir.
7	DOĞAN IRMAK URAL (2024)	Baskı devre kartı (PCB) üretiminde hata tespiti için veri artırma tekniklerinin karşılaştırmalı bir çalışması: Sınırlı veri setleri için en iyi yaklaşımların belirlenmesi	Bilgisayar Mühendisliği	PCB imalatında sınırlı veri setleriyle çalışan derin öğrenme (YOLOv8 ve CNN) tabanlı hata tespit sistemleri incelenmiştir. Gelişmiş veri artırma tekniklerinin modelin öğrenme sürecini destekleyerek kesinlik, duyarlılık ve mAP50 skorlarında anlamlı artışlar sağladığı ve hata yakalama doğruluğunu %88'den %99'a çıkardığı belirlenmiştir.
8	GÖKÇEN SARAY (2024)	Üretimde dijital dönüşüm etkinliğinin değerlendirilmesi için bir performans ölçüm sistemi geliştirilmesi	Endüstri Mühendisliği	İşletmelerin dijitalleşme süreçlerine uyum sağlayabilmesi için özgün bir performans ölçüm modeli tasarlanmıştır. Kriterlerin ağırlıklandırılmasında ÇKKV yaklaşımlarından, performans skorlarının hesaplanmasında ise Gri İlişkisel Analiz (GİA) yönteminden yararlanılarak bir yedek parça işletmesinde modelin uygulanabilirliği doğrulanmıştır.
9	MÜCAHİT SARI (2023)	Üretimde dijital dönüşüm kapsamında Artırılmış Gerçeklik (AR) uygulamaları: Bir üretim işletmesinde farklı Artırılmış Gerçeklik (AR) yatırım senaryolarının değerlendirilmesi	İşletme	Montaj hatlarında Artırılmış Gerçeklik (AR) teknolojilerinin entegrasyonu araştırılmıştır. Farklı yatırım senaryoları çevrim süreleri ve üretim miktarları üzerinden simüle edilerek, montaj kalitesini ve endüstriyel eğitim süreçlerini optimize edecek en uygun teknolojik senaryo belirlenmiştir.
10	NAZLI ÜNSAL	Bir üretim işletmesinde	Endüstri Mühendisliği	Bir üretim işletmesinde gerçekleştirilen uçtan uca dijital

	(2023)	dijital dönüşüm uygulaması		dönüşüm adımları değerlendirilmiştir. Dijitalleşme eylemleri sayesinde, potansiyel makine duruşlarının ve iş kazalarının önceden öngörülerek sistematik şekilde kayıt altına alındığı, güvenli bir çalışma ortamının eş zamanlı bilgi akışıyla entegre edildiği gözlemlenmiştir.
11	METE ÖMERALİ (2022)	Nesnelerin interneti ve dijital dönüşüm (endüstri 4.0) stratejilerinin üretim firmalarına faydaları	Endüstri Mühendisliği	İmalat sanayisinde IoT tabanlı Endüstri 4.0 stratejilerinin firmalara sunduğu operasyonel faydalar incelenmiştir. Dönüşümün dinamik doğasını yansıtacak kriter analizi süreçlerinde Bulanık Mantık yaklaşımlarının entegrasyonunun, karar süreçlerindeki belirsizlikleri yönetmede temel bir metodolojik zemin sunduğu ortaya konmuştur.
12	ÖZLEM ÖZAN KESBİÇ (2020)	Üretimde dijital dönüşüm ve etkileri: Türkiye ekonomisi açısından bir analiz	Ekonomi	Makroekonomik perspektiften Endüstri 4.0 trendleri SWOT analizi yöntemiyle ele alınmıştır. Türkiye imalat sanayisinde gerek kamu gerekse özel sektör düzeyinde dijitalleşme farkındalığının başladığı; ancak küresel ölçekte rekabetçi bir dijital olgunluk düzeyi için daha bütünleşik sektörel makro politikalara ihtiyaç duyulduğu saptanmıştır.
13	Emre Özgenç EKİCİ (2013)	Çok Çeşitli/Az Hacimli Elektronik Kart Üretimi Yapan Bir Firmanın Üretim Çizelgelemesini Gerçekleştiren Karma-Tamsayı Programlaması	Endüstri Mühendisliği	Çok çeşitli ve az hacimli üretim yapan, sıraya bağımlı kurulum sürelerine sahip karmaşık bir elektronik kart imalat işletmesinin çizelgeleme problemi incelenmiştir. Geliştirilen bütünleşik Karma-Tamsayı Programlama (MIP) modelinin, geç kalan iş maliyetleri ile paralel kaynak kapasite maliyetlerini eş zamanlı olarak optimize ettiği belirlenmiştir.

14	CEMALİY E KIZILKEÇİ Lİ (2004)	Tedarik zinciri yönetimi ve elektronik sektöründe endüstriyel bir uygulama	Endüstri Mühendisliği	Elektronik imalat hizmetleri sunan bir işletmenin (EMS) anahtar iş süreçleri tedarik zinciri yönetimi ilkeleri doğrultusunda analiz edilmiştir. Değer katan ürün, hizmet ve bilgi akışlarının bütünleştirilmesinde yaşanan darboğazlar tanımlanarak, sektördeki temel operasyonel gelişim alanları belirlenmiştir.
15	DİDEM AYÇENK (2000)	Bir elektronik üretim prosesinin kalite takibi ve kontrolü için bir bilgi alt sistemi tasarımı	Endüstri Mühendisliği	Elektronik üretim süreçlerinde izlenebilirlik ve kalite kontrolün altyapısını oluşturacak bir bilgi sistemi mimarisi tasarlanmıştır. Geliştirilen ilişkisel veri tabanı ve kullanıcı arayüzü sayesinde, hat üzerindeki kalite verilerinin anlık olarak izlenmesinin operasyonel hata payını sistematik olarak düşürdüğü ortaya konmuştur.

1.6. DEĞERLENDİRME VE UYGULAMA ÇALIŞMASIYLA İLİŞKİSİ

Bu bölümde, tedarik zinciri yönetiminin kavramsal temelleri, elektronik üretim sektörüne özgü tedarik zinciri zorlukları ve dijital dönüşümün tedarik zinciri süreçleri üzerindeki etkileri bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Tedarik zinciri yönetimi; uçtan uca süreç anlayışı, performans ölçümleme gereklilikleri ve stratejik hedefleri çerçevesinde değerlendirilmiş; geleneksel yönetim yaklaşımlarının artan belirsizlik ve karmaşıklık koşulları altında sınırlı kaldığı ortaya konulmuştur. Bu durumun, özellikle yüksek ürün çeşitliliği ve hızlı değişim dinamiklerine sahip elektronik üretim sektöründe daha belirgin olduğu görülmektedir.

Elektronik üretime özgü tedarik zinciri zorlukları kapsamında; çok katmanlı tedarik ağları, kısa ürün yaşam döngüleri, sık mühendislik değişiklikleri, kalite ve izlenebilirlik gereksinimleri ile küresel tedarik riskleri ele alınmıştır. Bu unsurlar, elektronik üretimde tedarik zinciri yönetiminin neden yüksek düzeyde karmaşıklık içerdiğini ortaya koymaktadır. Yapılan değerlendirmeler, tedarik zinciri performansının yalnızca

fonksiyonel bazda değil; üretim, kalite ve tedarikçi yönetimi süreçlerini kapsayan entegre bir yapı içerisinde ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Bu çerçevede dijital dönüşüm, elektronik üretimde tedarik zinciri yönetiminin söz konusu yapısal zorluklarına yanıt üreten bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir. Görünürlük, sistem entegrasyonu, veri temelli karar alma ve süreç otomasyonu gibi dijital dönüşüm bileşenlerinin; teslimat performansı, kalite göstergeleri ve operasyonel dayanıklılık üzerinde ölçülebilir etkiler yarattığı literatür bulguları ile desteklenmiştir. Bölüm kapsamında incelenen çalışmalar ve oluşturulan literatür değerlendirmesi de dijital dönüşüm ile tedarik zinciri performansı arasındaki ilişkinin farklı boyutlarını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla dijital dönüşüm, tedarik zinciri yönetiminde tamamlayıcı bir unsurdan ziyade, sürdürülebilir performans artışı için gerekli bir yetkinlik olarak konumlandırılmaktadır.

Bu bölümde sunulan kavramsal çerçeve, sektörel değerlendirmeler ve literatür bulguları, elektronik üretimde dijital dönüşüm uygulamalarının somut ve ölçülebilir çıktılar üzerinden incelenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda bir sonraki bölümde, araştırmanın metodolojik çerçevesine yer verilmekte; araştırmanın tasarımı, veri kaynakları, veri toplama süreci ve veri analizinde kullanılan yöntemler açıklanmaktadır. Böylece bu bölümde oluşturulan teorik ve kavramsal çerçeve ile literatürden elde edilen bulgular, araştırmanın metodolojik yapısının oluşturulmasına temel sağlamaktadır.

2. BÖLÜM

METODOLOJİ ve ANALİZ

Bu bölümde araştırmanın genel tasarımı, kullanılan araştırma yöntemi, veri kaynakları, performans karşılaştırma yaklaşımı, analiz yöntemi ve etik kapsam açıklanmaktadır. Çalışma, elektronik üretim sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede yürütülen dijital dönüşüm uygulamalarının üretim, kalite ve tedarik zinciri süreçleri üzerindeki etkilerini inceleyen, ikincil kurumsal verilere dayalı tekil vaka çalışması olarak tasarlanmıştır.

Araştırmada işletmenin kurumsal kayıtları temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Bunun yanında süreçlerin anlaşılması ve elde edilen bulguların yorumlanabilmesi amacıyla kurumsal dokümanlardan, süreç kayıtlarından ve ilgili performans verilerinden yararlanılmıştır. Dijital dönüşüm uygulamalarının etkileri; üretim, kalite ve tedarik zinciri süreçleriyle ilişkili performans göstergeleri üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmanın tek bir işletmeye odaklanması, dijital dönüşüm sürecinin işletmenin mevcut süreçleri ve kurumsal verileri çerçevesinde bütüncül olarak incelenmesine olanak sağlamıştır.

2.1 ARAŞTIRMANIN GENEL TASARIMI

Bu çalışma, elektronik üretim sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede gerçekleştirilen dijital dönüşüm uygulamalarının üretim, kalite ve tedarik zinciri süreçleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Araştırmada işletmenin faaliyetleri sırasında oluşturulan kurumsal kayıtlar esas alınmış ve dijital dönüşüm uygulamalarının operasyonel performans göstergelerine yansımaları değerlendirilmiştir.

Araştırmanın başlangıç aşamasında işletmenin organizasyonel yapısı, faaliyet alanları ve tedarik zinciri yapısı analiz edilmiştir. Bu kapsamda işletmenin stratejik planları, organizasyon şemaları ve süreç dokümanları incelenerek dijital dönüşüm uygulamalarının yürütüldüğü kurumsal yapı ortaya konulmuştur. Ardından üretim, kalite, depo, planlama ve malzeme akışıyla ilişkili süreçler kalite birimleriyle koordineli olarak değerlendirilmiş; gözlemleri ve kurumsal kayıtlar birlikte ele alınarak süreçlerin mevcut işleyişi analiz edilmiştir.

Araştırma yalnızca kullanılan dijital teknolojilerin tanıtılmasına odaklanmamaktadır. Dijital dönüşüm uygulamaları; süreç görünürlüğü, izlenebilirlik, kalite performansı, malzeme yönetimi ve planlama süreçlerine olan katkıları açısından değerlendirilmiştir. Bu yönüyle çalışma, gerçek üretim ortamında gerçekleştirilen dijital dönüşüm uygulamalarının operasyonel sonuçlarını inceleyen uygulamalı bir araştırma niteliğindedir.

2.2 VERİ ANALİZİ YÖNTEMİ

Araştırma, elektronik üretim sektöründe faaliyet gösteren tek bir işletmeye odaklanan ve ağırlıklı olarak ikincil kurumsal verilere dayanan tekil vaka çalışması niteliğindedir. Araştırmanın temel veri kaynağını işletmenin faaliyetleri sırasında oluşturulan üretim, kalite ve performans kayıtları oluşturmaktadır. Bu kapsamda Yönetim Gözden Geçirme (YGG) sunumları, sürdürülebilirlik ve faaliyet raporları, üretim kayıtları, kalite kayıtları ve performans raporlarından yararlanılmıştır. İşletmenin yer aldığı Avrupa Birliği destekli projeler ise firmanın teknolojik altyapısının ve dijital dönüşüm sürecinin gelişiminin anlaşılması amacıyla incelenmiştir. Kurumsal kayıtlar araştırmanın temel veri kaynağını oluştururken, farklı dönemlere ve süreçlere ait dokümanlar ile performans göstergeleri sayısal bulguların açıklanması ve işletmenin operasyonel yapısıyla ilişkilendirilmesi amacıyla tamamlayıcı bilgi kaynakları olarak kullanılmıştır.

Araştırmada kullanılan kurumsal veriler; incelenen dönemler, üretim alanları, sektör grupları, performans göstergeleri ve hata türleri esas alınarak sınıflandırılmıştır. Veri setinin genel yapısının ortaya konulmasında tanımlayıcı analiz yaklaşımından yararlanılmış; üretim ve kalite verileri dönem, üretim alanı ve sektör grubu bazında değerlendirilmiştir. Böylece farklı veri kaynaklarından elde edilen kayıtların ortak bir analiz çerçevesinde ele alınması ve sonraki karşılaştırmalar için uygun bir veri yapısının oluşturulması amaçlanmıştır.

Dijital dönüşüm uygulamalarının işletme performansına olan yansımalarının değerlendirilmesinde temel olarak öncesi–sonrası performans karşılaştırması kullanılmıştır. Bu kapsamda uygulama öncesi ve uygulama sonrası dönemlere ait genel hata oranı, iç ret oranı, müşteri iade oranı, Milyonda Hata Sayısı değeri, yeniden işleme

oranı ve üretim kapasitesi gibi işletmenin kurumsal sistemlerinde izlenen performans göstergeleri karşılaştırılmıştır. Araştırmada 2023 ve 2024 yılları dijital dönüşüm öncesindeki performansın değerlendirilmesinde, 2025 yılı ise dijital dönüşüm uygulamalarının üretim ve kalite süreçlerine yansımalarının gözlemlendiği dönüşüm sonrası değerlendirme dönemi olarak ele alınmıştır. Çalışmada 2026 yılına ait performans verisi bulunmadığından analizler 2023–2025 dönemiyle sınırlandırılmıştır. 2025 yılı verilerinin tam yılı kapsamadığı göstergelerde ilgili değerler yılbaşından veri kesim tarihine kadar gerçekleşen performansı ifade edecek şekilde YTD (Year-to-Date) olarak değerlendirilmiştir.

Dönemler arasındaki değişimin büyüklüğünü ortaya koymak amacıyla uygun göstergelerde yüzde değişim oranından yararlanılmıştır. Yüzde değişim aşağıdaki formül aracılığıyla hesaplanmıştır:

$$\text{Değişim Oranı (\%)} = [(\text{Sonrası Değer} - \text{Öncesi Değer}) / \text{Öncesi Değer}] \times 100$$

Değişim oranlarının yorumlanmasında ilgili performans göstergesinin niteliği dikkate alınmıştır. Genel hata oranı, iç ret oranı, müşteri iade oranı, Milyonda Hata Sayısı ve yeniden işleme oranı gibi kalite göstergelerindeki azalış olumlu yönde bir değişim olarak değerlendirilirken, üretim kapasitesindeki artış olumlu performans değişimi olarak ele alınmıştır.

Performans göstergeleri yalnızca dijital dönüşüm öncesi ve sonrası dönemler arasındaki fark üzerinden değerlendirilmemiş, yeterli dönemsel verinin bulunduğu göstergelerde zaman içerisindeki değişim de incelenmiştir. Bu kapsamda genel hata oranı, müşteri iade oranı, yeniden işleme oranı, Milyonda Hata Sayısı ve üretim kapasitesi gibi göstergelerin dönemsel seyri karşılaştırmalı trend analizi ile değerlendirilmiştir. Yıllık düzeyde gözlem sayısının sınırlı olması nedeniyle yıllık göstergeler üzerinde istatistiksel bir zaman serisi modeli kurulmamış; bu veriler değişimin yönü ve dönemler arasındaki farklılaşmanın değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Böylece dijital dönüşüm öncesinde gözlenen performans eğilimi ile dönüşüm sonrası dönemde ortaya çıkan değişimin birlikte değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Yıllık karşılaştırmalara ek olarak, aylık verinin bulunduğu kalite göstergelerinde segmentli doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır(Wagner vd., 2002). Analizde 2024 ve 2025 dönemlerine ait aylık gözlemler kullanılarak dijital dönüşüm sonrası dönemde kalite performansının seviyesinde ve zaman içerisindeki eğiliminde bir farklılaşma olup olmadığı incelenmiştir. Modelde zaman eğilimi, 2025 yılındaki dönüşüm sonrası dönemi temsil eden kukla değişken ve dönüşüm sonrası eğilim değişimi birlikte değerlendirilmiştir. Kullanılan regresyon modeli aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 T_t + \beta_2 D_t + \beta_3 (T_t \times D_t) + \varepsilon_t$$

Modelde Y_t ilgili dönemde gözlenen kalite performans göstergesini, T_t zaman eğilimini, D_t dijital dönüşüm sonrası dönemi temsil eden kukla değişkeni ve $T_t \times D_t$ dönüşüm sonrası eğilim değişimini göstermektedir. Buna göre β_1 dönüşüm öncesindeki temel eğilimi, β_2 dönüşüm sonrası performans seviyesindeki değişimi ve β_3 dönüşüm sonrasında eğilimde meydana gelen değişimi ifade etmektedir.

Dijital dönüşüm uygulamalarının işletmede tek bir tarihte ve eş zamanlı olarak değil, farklı süreçlerde aşamalı biçimde devreye alınmış olması nedeniyle regresyon analizi doğrudan bir nedensellik testi olarak kullanılmamıştır. Analiz ile dönüşüm sonrası dönemde kalite göstergelerinde gözlenen değişimin, zaman eğilimi dikkate alındığında da görülüp görülmediğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle regresyon sonuçları, öncesi–sonrası karşılaştırmalar ve trend analizlerini destekleyen tamamlayıcı bulgular olarak ele alınmıştır. Aylık verilerde ortaya çıkabilecek otokorelasyon ve değişen varyansın standart hata tahminleri üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla Newey-West sağlam standart hataları kullanılmıştır. Regresyon sonuçlarının değerlendirilmesinde %95 güven düzeyi esas alınmış ve $p < 0,05$ değeri istatistiksel anlamlılık ölçütü olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte sonuçlar değerlendirilirken istatistiksel anlamlılığın yanı sıra performans göstergelerindeki değişimin yönü ve büyüklüğü de dikkate alınmıştır.

Kalite performansının değerlendirilmesinde oran, trend ve regresyon analizlerinin yanı sıra hata türlerinin dağılımını incelemek amacıyla Pareto analizinden yararlanılmıştır. Pareto analizi ile kalite retleri ve müşteri iadelerinde ortaya çıkan hata türlerinin toplam

hata içerisindeki ağırlıkları belirlenmiş ve hata yoğunluğunun belirli kategorilerde toplanıp toplanmadığı değerlendirilmiştir. Bu analizler işletmenin üretim gerçekleştirdiği farklı sektör grupları için ayrı ayrı ele alınarak kalite problemlerinin sektörel dağılımının karşılaştırılması sağlanmıştır.

Araştırmanın üçüncü araştırma sorusu doğrultusunda, dijital dönüşüm sürecinde gözlenen performans değişimlerinin alt endüstriyel sektörlerle göre farklılaşıp farklılaşmadığının değerlendirilmesi amacıyla sektör bazlı karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Bu kapsamda tüketici elektroniği, savunma sanayi, otomotiv ve telekomünikasyon sektörlerine yönelik üretimler mevcut kalite ve performans göstergeleri üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sektör bazlı değerlendirmelerde üretim yapısı, kalite gereksinimleri ve ürün özelliklerindeki farklılıklar göz önünde bulundurulmuş ve elde edilen sonuçların aynı üretim koşulları altında oluşmadığı dikkate alınmıştır.

Nicel analizlerden elde edilen bulguların işletmede gerçekleştirilen dijital dönüşüm uygulamalarıyla ilişkilendirilmesinde başarı metrik eşleştirme ve yorumlayıcı analiz yaklaşımından yararlanılmıştır. Bu aşamada süreç görünürlüğü, izlenebilirlik, malzeme yönetimi, depo-üretim entegrasyonu, üretim planlama ve kalite kontrol gibi dijital dönüşüm kapsamında ele alınan uygulamalar ile bu süreçlerle ilişkili performans göstergeleri birlikte değerlendirilmiştir. Böylece sayısal bulguların yalnızca dönemsel artış veya azalışlar şeklinde sunulması yerine, ilgili dijital dönüşüm uygulamalarının hangi operasyonel süreç ve performans göstergeleriyle ilişkilendirilebileceğinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Araştırma deneysel bir tasarıma sahip değildir ve herhangi bir kontrol grubu içermemektedir. Ayrıca dijital dönüşüm uygulamalarının farklı zamanlarda ve aşamalı olarak devreye alınmış olması, tek bir müdahale tarihine dayalı nedensellik değerlendirmesini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle performans göstergelerinde gözlenen değişimlerin yalnızca dijital dönüşüm uygulamalarından kaynaklandığı yönünde doğrudan bir nedensellik iddiasında bulunulmamıştır. Araştırma bulguları; öncesi-sonrası karşılaştırmalar, karşılaştırmalı trend analizi, aylık veriler üzerinde gerçekleştirilen segmentli doğrusal regresyon analizi, Pareto analizi ve sektör bazlı

değerlendirmeler birlikte ele alınarak yorumlanmıştır. Sonuçlar incelenen işletmenin üretim yapısı, dönemsel koşulları, sektör farklılıkları ve mevcut kurumsal kayıtları çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Araştırmada kullanılan veri ve performans göstergeleri aşağıdaki tabloda tanımlanmıştır.

Tablo 7: Araştırmada Kullanılan Veri ve Performans Göstergeleri.

Değişken	Tanım	Veri Kaynağı	İncelenen Dönem / Kırılım	Ölçüm Birimi	Analiz Yöntemi
Genel hata oranı	İncelenen üretim içerisindeki toplam hata oranı	Kalite ve üretim kayıtları	Dijital dönüşüm öncesi–sonrası / üretim alanı bazlı	%	Öncesi–sonrası karşılaştırma, yüzde değişim, trend analizi, segmentli doğrusal regresyon
İç ret oranı	İç kalite kontrolleri sonucunda uygun bulunmayan üretimin toplam üretime oranı	Kalite kayıtları	Dijital dönüşüm öncesi–sonrası	%	Öncesi–sonrası karşılaştırma, yüzde değişim, trend analizi, segmentli doğrusal regresyon
Müşteri iade oranı	Müşteri tarafından kalite problemi nedeniyle iade edilen ürünlerin ilgili üretim içerisindeki oranı	Müşteri kalite kayıtları	Dijital dönüşüm öncesi–sonrası / sektör bazlı	%	Öncesi–sonrası karşılaştırma, trend analizi, segmentli doğrusal

					regresyon
Yeniden işleme oranı	Yeniden işleme tabi tutulan üretimin ilgili toplam üretim içerisindeki oranı	Üretim ve kalite kayıtları	Dijital dönüşüm öncesi–sonrası / dönemsel	%	Öncesi–sonrası karşılaştırma, yüzde değişim, trend analizi
Milyonda Hata Sayısı	Bir milyon üretim birimi başına düşen hata miktarını ifade eden kalite göstergesi	Kalite performans kayıtları	Dönemsel ve sektör bazlı	Adet	Trend analizi, sektör bazlı karşılaştırmalı analiz, segmentli doğrusal regresyon
Hata türleri	Kalite retleri ve müşteri iadelerinde kayıt altına alınan hata kategorileri	Kalite kayıtları	Sektör bazlı	Frekans / %	Pareto analizi, sektör bazlı karşılaştırma
Üretim kapasitesi	Belirli bir dönemde gerçekleştirilen üretim çıktısını ve üretim hacmindeki değişimi ifade eden gösterge	Üretim kayıtları	Dijital dönüşüm öncesi–sonrası	Üretim miktarı / dönem	Öncesi–sonrası karşılaştırma, yüzde değişim, trend analizi

Sektör grubu	İşletmenin üretim gerçekleştirdiği tüketici elektroniği, savunma, otomotiv ve telekomünikasyon üretim grupları	Üretim ve kurumsal kayıtlar	Sektör bazlı	Kategorik	Sektör bazlı karşılaştırmalı analiz
---------------------	--	-----------------------------	--------------	-----------	-------------------------------------

2.3 ARAŞTIRMANIN ETİK KAPSAMI

Araştırmada Bu araştırmada insan katılımcılardan doğrudan veri toplanmamış; anket, mülakat, odak grup, yarı yapılandırılmış görüşme, katılımcı gözlem veya benzeri insan katılımcılı veri toplama yöntemlerine başvurulmamıştır. Araştırmanın veri kaynağını, işletmenin faaliyetleri sırasında oluşmuş anonimleştirilmiş kurumsal kayıtlar, üretim ve kalite performans verileri, süreç dokümanları, üretim akış kayıtları, Yönetim Gözden Geçirme (YGG) sunumları, proje dokümanları ve operasyonel video dokümantasyonu oluşturmaktadır.

İşletmenin ticari bilgilerinin korunması amacıyla firma adı tez içerisinde belirtilmemiş ve işletme “XYZ Firması” olarak ifade edilmiştir. Çalışmada yer verilen üretim, kalite ve performans verileri araştırmanın amacı doğrultusunda kullanılmış; işletmenin müşteri, ürün, proje veya diğer ticari unsurlar temelinde tanımlanmasına imkân verebilecek ayrıntılara yer verilmemiştir. Kurumsal kayıtlar yalnızca araştırma kapsamında analiz ve değerlendirme amacıyla kullanılmıştır.

Bu doğrultuda çalışma, insan katılımcılardan birincil veri toplanan bir araştırma niteliği taşımamakta; ikincil kurumsal veri ve doküman incelemesine dayalı bir tekil vaka çalışması olarak yapılandırılmaktadır. Araştırma kapsamında kullanılan veriler mevcut kurumsal kayıtlar esas alınarak değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular bilimsel araştırma ve yayın etiği ilkeleri doğrultusunda sunulmuştur.

2.4 FİRMA TANITIMI VE YAPISI

XYZ firması, Türkiye’de faaliyet gösteren, büyük ölçekli ve teknoloji yoğun bir elektronik üretim işletmesidir. Firma; haberleşme, savunma, endüstriyel elektronik ve

özel amaçlı sistemler gibi yüksek güvenilirlik ve izlenebilirlik gerektiren sektörlerle yönelik elektronik kart ve sistem üretimi gerçekleştirmektedir. Üretim faaliyetleri; kalite standartları, süreç izlenebilirliği ve müşteri gereksinimlerine uyum ekseninde yapılandırılmıştır.

Literatürde elektronik üretim firmaları; üretim hacmi, ürün çeşitliliği ve otomasyon seviyesi açısından değerlendirildiğinde, XYZ firması yüksek karışım–orta hacim (high-mix, medium-volume) üretim karakteristiği sergileyen işletmeler arasında konumlandırılabilir (Slack et al., 2022; Groover, 2020). Firma, hem seri üretim hem de proje bazlı üretimi aynı üretim altyapısı içerisinde yürütebilmekte; bu durum, esnek üretim sistemleri ve gelişmiş planlama kabiliyetlerini zorunlu kılmaktadır.

XYZ firmasının üretim altyapısı, tam otomatik ve yarı otomatik hatların birlikte kullanıldığı hibrit bir yapı üzerine kuruludur. Bu yapı; makineler, otomasyon sistemleri, sensörler ve insan operatörlerinin eş zamanlı etkileşimini içeren karmaşık bir üretim ekosistemi oluşturmaktadır. Literatürde bu tür yapılar, insan–makine etkileşiminin yüksek olduğu ve operasyonel karmaşıklığın arttığı üretim ortamları olarak tanımlanmaktadır (Romero et al., 2020).

Bu çerçevede XYZ firması;

- teknoloji yoğun elektronik üretim yapan,
- hibrit (otomasyon ve insan etkileşimine dayalı) üretim yapısına sahip,
- seri üretim ile proje bazlı üretimi birlikte yürütebilen,
- üretim, planlama ve tedarik süreçlerini bütüncül biçimde yöneten

bir elektronik üretim firması tipolojisini temsil etmektedir. Literatürde bu tür işletmeler, dijitalleşmeye ve süreç iyileştirmeye açık, ölçeklenebilir üretim yapılarıyla öne çıkmaktadır (Porter & Heppelmann, 2014; Romero et al., 2020).

XYZ firmasının kurumsal yapısı ve üretim yaklaşımı incelendikten sonra, firmanın elektronik üretim süreçlerinin teknik ve operasyonel boyutlarının detaylı olarak ele alınması, üretim sisteminin işleyişini bütüncül biçimde anlamak açısından önem taşımaktadır.

2.5 ELEKTRONİK ÜRETİM SÜREÇLERİNİN GENEL YAPISI

XYZ firmasında elektronik üretim süreci, ağırlıklı olarak Yüzey Montaj Teknolojisi (SMT) ve ihtiyaç duyulan ürünlerde Delik İçi Montaj Teknolojisi (THT) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Elektronik üretim literatüründe SMT, yüksek yoğunluklu devre tasarımlarında verimlilik, hız ve kalite avantajları nedeniyle baskın teknoloji olarak tanımlanmaktadır (Kalpakjian & Schmid, 2014).

Üretim süreci, üretim öncesi planlama ve tedarik faaliyetleriyle başlamakta; PCB hazırlık, montaj, lehimleme, kontrol ve test adımlarını takiben paketleme aşamasıyla tamamlanmaktadır. Baskılı devre kartları (PCB), otomatik yükleyici (loader) veya destacker sistemleri aracılığıyla üretim hatlarına beslenmektedir. İlk aşamada kartlar üzerine seri numarası, üretim tarihi ve izlenebilirlik bilgilerini içeren lazer markalama işlemi uygulanmakta ve bu bilgiler optik sistemler aracılığıyla doğrulanmaktadır.

Markalama sonrası kartlar, montaj kalitesini etkileyebilecek partiküllerin giderilmesi amacıyla vakumlu ve silikon bazlı temizleme sistemlerinden geçirilmektedir. Bu adımı takiben, lehim pastası baskı işlemi gerçekleştirilmekte; metal stencil yardımıyla lehim pastası PCB üzerindeki ilgili pad'lere uygulanmaktadır. SPI (Solder Paste Inspection) sistemleri kullanılarak pasta miktarı ve hizalama kontrol edilmekte, uygunsuzluklar üretim akışına devam edilmeden önce giderilmektedir.

Bileşen yerleştirme aşamasında, yüksek hızlı pick-and-place makineleri kullanılarak yüzey montaj bileşenleri karta yerleştirilmektedir. Bu makineler, entegre görüntü işleme sistemleri sayesinde bileşen yönü ve konumunu sürekli denetlemektedir. Montajı tamamlanan kartlar, elektrostatik deşarj risklerini azaltmak amacıyla iyonize konveyörlerden geçirilerek reflow lehimleme fırınlarına yönlendirilmektedir. Reflow lehimleme süreci, elektronik üretimde kritik kalite parametrelerinden biri olup sıcaklık profillerinin hassas şekilde kontrol edilmesini gerektirmektedir.

Lehimleme sonrası kalite güvencesi, AOI (Automated Optical Inspection) ve gerekli durumlarda X-ray sistemleri ile sağlanmaktadır. AOI sistemleri, eksik bileşen, yanlış yerleşim ve lehimleme hatalarını otomatik olarak tespit ederken; BGA gibi alt yüzey lehimli bileşenlerin kontrolü X-ray sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Kontrolleri başarıyla geçen kartlar, otomatik boşaltma (unloader) sistemleriyle bir sonraki montaj, test veya paketleme aşamalarına yönlendirilmektedir.

XYZ firmasında üretim süreci, güçlü bir ön üretim planlama ve tedarik yönetimi altyapısı ile desteklenmektedir. Müşteri siparişleri sisteme aktarıldıktan sonra, BOM (Bill of Materials) üzerinden malzeme ihtiyaçları hesaplanmakta ve stok durumları analiz edilmektedir. Malzeme planlaması, MRP (Material Requirements Planning) yaklaşımı doğrultusunda yürütülmekte ve tedarik sürekliliği sağlanmaktadır (Slack et al., 2022).

Tedarik edilen malzemeler kalite kontrol süreçlerinden geçirildikten sonra ana depo veya otomatik depolama sistemlerinde muhafaza edilmektedir. Üretim sürecinin tüm aşamalarında kartlar ve bileşenler ERP sistemi üzerinden izlenebilmekte; bu sayede departmanlar arası izlenebilirlik sağlanmakta ve üretim performansı sistematik olarak analiz edilebilmektedir.

2.6 XYZ FİRMASI ÖRNEĞİ ÜZERİNDEN ELEKTRONİK ÜRETİM YAPISININ İNCELENMESİ

Bu bölümde sunulan üretim süreçleri analizi, XYZ firmasında elektronik kart üretiminin mevcut durumunu bütüncül biçimde ortaya koymayı amaçlamaktadır. Analiz, kurumsal dokümanlar, üretim sürecine ilişkin mevcut kayıtlar, operasyonel süreç dokümantasyonu ve UML tabanlı süreç modelleme çıktılarının birlikte değerlendirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yönüyle çalışma, ağırlıklı olarak ikincil kurumsal verilere dayanan ve üretim süreçlerinin mevcut yapısını sistematik biçimde ele alan endüstriyel bir vaka çalışması niteliği taşımaktadır.

Analiz kapsamında, XYZ firmasının elektronik üretim sürecine ilişkin kurumsal kayıtlarda yer alan süreç adımları ve departmanlar arası iş akışları incelenmiştir. Bu kapsamda; malzeme hazırlık, montaj, otomatik ve yarı otomatik üretim hatları, kalite kontrol, test ve onarım süreçlerine ilişkin mevcut süreç tanımları, üretim kayıtları ve operasyonel dokümanlardan yararlanılmıştır. Elde edilen bilgiler, süreçlerin birbirleriyle olan ilişkileri, üretim akışındaki temel aşamalar ve departmanlar arasındaki görev dağılımları dikkate alınarak değerlendirilmiş; böylece üretim sisteminin mevcut yapısı ve uygulanan süreç akışı ayrıntılı biçimde ortaya konulmuştur.

Buna ek olarak, üretim hatlarında gerçekleştirilen yerinde gözlemler ile resmi prosedürlerde tanımlanan süreçler ile günlük operasyonel pratikler arasındaki benzerlikler ve sapmalar analiz edilmiştir. Özellikle otomasyon seviyesi yüksek hatlar ile insan müdahalesinin yoğunlaştığı yarı otomatik hatlar arasındaki farklar, gözleme dayalı olarak değerlendirilmiştir. Bu gözlemler, süreçlerin yalnızca “nasıl tanımlandığını” değil, “nasıl uygulandığını” da ortaya koyması açısından kritik öneme sahiptir.

Çalışmanın önemli bir bileşenini, yarı otomatik üretim hatlarına geçiş öncesinde işleyen süreçleri detaylı biçimde gösteren operasyonel video kayıtlarının analizi oluşturmaktadır. Video içeriği, üretim sürecinin zamansal akışını, makine–makine ve insan–makine etkileşimlerini, ara kontrol noktalarını ve bekleme/buffer mekanizmalarını gözlemlemeye imkân tanımıştır. Bu sayede süreçteki kritik karar noktaları, darboğaz potansiyelleri ve kaliteyi etkileyen unsurlar daha net biçimde analiz edilebilmiştir.

Elde edilen tüm bu veriler, üretim sürecinin sistematik olarak haritalanabilmesi amacıyla UML tabanlı süreç modelleme yaklaşımı ile yapılandırılmıştır. UML diyagramları; aktörler (operatör, kalite personeli, planlama birimi), sistemler (makineler, ERP), nesneler (kart, magazin, iş emri) ve süreç akışları arasındaki ilişkileri açık biçimde göstermektedir. Bu modelleme, üretim sürecinin karmaşıklığını soyutlayarak analiz edilebilir hale getirmiş ve izlenebilirlik noktalarının belirlenmesine katkı sağlamıştır.

Bu bütüncül yaklaşım sayesinde, XYZ firmasındaki elektronik üretim yapısı; teknik, organizasyonel ve operasyonel boyutlarıyla birlikte ele alınmış; sonraki bölümlerde tartışılacak dijitalleşme ve iyileştirme potansiyelleri için sağlam bir mevcut durum zemini oluşturulmuştur.

2.6.1 Elektronik Üretimin Genel Akışı ve Yapısal Çerçevesi

XYZ firmasında elektronik üretim süreci, uçtan uca değerlendirildiğinde, yüksek otomasyon seviyesine sahip tam otomatik dizgi hatları ile başlayan ve ürün tipine bağlı olarak yarı otomatik ve manuel destek süreçleriyle devam eden çok katmanlı bir üretim yapısı sergilemektedir. Bu yapı, elektronik üretim sektöründe sıklıkla karşılaşılan; standart, yüksek hacimli işlemlerin otomasyonla; çeşitlilik ve esneklik gerektiren işlemlerin ise insan müdahalesiyle yürütüldüğü hibrit üretim sistemleri ile örtüşmektedir.

Genel akış itibarıyla üretim süreci aşağıdaki ana evrelerden oluşmaktadır:

- I. Tam otomatik SMT dizgi hatlarında PCB dizgisi ve lehimleme
- II. Ara kontrol ve ayrıştırma mekanizmaları
- III. Yarı otomatik montaj ve işlem hatları
- IV. Kalite kontrol, test ve onarım süreçleri
- V. Paketleme ve lojistik devir

Bu çalışmada özellikle ilk üç evreye odaklanılmış; üretimin teknik omurgasını oluşturan tam otomatik dizgi hatları ile insan merkezli üretimin yoğunlaştığı yarı otomatik hatlar arasındaki ilişki detaylı biçimde analiz edilmiştir.

XYZ firmasında üretimin tam otomatik dizgi hatlarında başlatılması, ürünlerin temel elektronik fonksiyonlarının büyük ölçüde otomasyonla oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Bu aşamada süreç, makine–makine iletişimi ve sistem entegrasyonu ağırlıklı ilerlemekte; insan müdahalesi sınırlı ve daha çok denetleyici rol üstlenmektedir. Buna karşılık, yarı otomatik hatlara geçişle birlikte operatör katılımı artmakta; manuel montaj, görsel kontrol, yerinde karar alma ve anlık müdahaleler üretim sürecinin ayrılmaz bir parçası haline gelmektedir.

Bu yapı, XYZ firmasının hem yüksek kalite ve tekrarlanabilirlik gerektiren ürünleri hem de müşteri özelinde farklılık gösteren, düşük/orta hacimli ürünleri aynı üretim altyapısı içerisinde yönetebilmesini sağlamaktadır. Ancak bu durum, süreç karmaşıklığını artırmakta ve üretimin izlenebilirliği ile koordinasyonunu kritik hale getirmektedir.

2.6.2 Tam Otomatik Dizgi Hatları (SMT Hatları)

XYZ firmasında elektronik üretimin ilk ve en otomasyon yoğun aşaması, tam otomatik yüzey montaj teknolojisi (SMT) kullanılan dizgi hatlarında gerçekleştirilmektedir. Bu hatlar, firmanın görece daha yeni kurulan, dijitalleşme seviyesi yüksek ve endüstriyel otomasyon altyapısı güçlü üretim alanlarını oluşturmaktadır. Hat tasarımı, yüksek hacimli ve tekrarlanabilir üretimi mümkün kılacak şekilde yapılandırılmış; insan müdahalesi minimum seviyede tutulmuştur.

Tam otomatik dizgi süreci, PCB'lerin loader veya destacker makineleri aracılığıyla hatta beslenmesiyle başlamaktadır. Bu aşamada kartlar, magazinler içerisinden otomatik olarak alınmakta ve üretim hattına tekil olarak aktarılmaktadır. Özellikle çift yüzölü kart üretiminde, bir yüzölü dizilmiş kartların diğeryüzölü için tekrar hatta alınabilmesi bu sistemler sayesinde sağlanmaktadır.

Hattın ilk kritik operasyonlarından biri lazer markalama sürecidir. Bu aşamada kartlar üzerine seri numarası, üretim bilgileri ve izlenebilirliğı sağlayan karekodlar lazer yöntemiyle işlenmektedir. Markalama işlemi, yalnızca veri eklemekle sınırlı olmayıp; entegre optik sistemler aracılığıyla markalamanın doğruluğı da anlık olarak teyit edilmektedir. Kart üzerinde önceden tanımlı bir alan bulunmaması durumunda, kalite birimi eşliğinde uygun bir bölge belirlenerek markalama yapılmaktadır. Bu uygulama, izlenebilirliğın üretimin en erken aşamasında başlatıldığını göstermesi açısından önemlidir.

Lazer markalama sonrasında kartlar, PCB temizleme (PCB Cleaner) makinelerine yönlendirilmektedir. Bu makineler, markalama işlemi sonrası kart yüzeyinde oluşabilecek toz, partikül veya kalıntıları gidermek amacıyla vakum ve silikon bazlı temizleme sistemlerini birlikte kullanmaktadır. Bu adım, lehimleme kalitesini doğrudan etkileyen yüzey temizliğinin garanti altına alınması açısından kritik bir ön işlem niteliğindedir.

Temizleme işlemini takiben, lehim pastası baskı (screen printing) aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada, PCB tasarımına özel olarak hazırlanmış stencil'ler kullanılarak lehim pastası kart üzerindeki pedlere uygulanmaktadır. Screen printer makinelerinde sıfır noktalarının ve referansların doğru tanımlanması, lehim baskı kalitesinin temel belirleyicilerinden biridir. Baskı sonrası lehim pastası, SPI (Solder Paste Inspection) sistemleri ile hacim, konum ve tolerans değeryleri açısından kontrol edilmektedir. Müşteri gereksinimlerine bağılı olarak tanımlanan tolerans aralıkları dışında kalan kartlar, NG konveyör aracılığıyla otomatik olarak ayrıştırılmaktadır.

SPI aşamasında dikkat çekici bir mekanizma, belirli sayıda ardışık hatalı kart tespit edilmesi durumunda hattın otomatik olarak durdurulmasıdır. Bu yapı, sürecin kendi

kendini koruyan bir kalite mekanizmasına sahip olduğunu ve hataların kaynağında kontrol edilmesini amaçladığını göstermektedir.

Lehim pastası baskı ve kontrol aşamalarını takiben, kartlar yüksek hızlı pick-and-place dizgi makinelerine yönlendirilmektedir. Bu makineler, doğru komponentin doğru konuma ve doğru yöne yerleştirilmesini, entegre görüntü işleme ve el terminalleri üzerinden yapılan doğrulamalarla güvence altına almaktadır. Standart dizgi makinelerinin yerleştiremediği, daha büyük veya farklı geometrilere sahip komponentler için offset (odd-shape) dizgi makineleri kullanılmakta; bu durum özellikle portföy ve müşteri özelinde çeşitlilik gösteren ürünlerde esneklik sağlamaktadır.

Dizgi işlemi tamamlanan kartlar, fırına girmeden önce ara AOI noktalarından geçirilerek eksik veya hatalı dizgi açısından kontrol edilmektedir. Ardından kartlar, iyonizerli konveyörler aracılığıyla azot atmosferli reflow fırınlarına beslenmektedir. Reflow fırınları, çok sayıda ısıtma ve soğutma zonundan oluşmakta; lehimleme işlemi, kullanılan lehim malzemesinin datasheet bilgileri ve komponent teknik gereksinimleri doğrultusunda tanımlanan ısı profilleri ile gerçekleştirilmektedir. Isı profillerinin belirlenmesi süreci, ölçüm cihazları ve tekrarlı denemelerle desteklenmekte; rastgele ayarlardan kaçınılmaktadır.

Fırın çıkışında kartlar, ara buffer sistemleri ile kısa süreli olarak bekletilebilmekte; bu sayede AOI veya unloader tarafındaki çevrim süreleri ile hat dengesi sağlanmaktadır. Son kontrol noktası olan final AOI aşamasında kartlar otomatik optik incelemeye tabi tutulmakta; hatalı bulunan kartlar ile uygun kartlar unloader makineleri aracılığıyla ayrı magazinelere yönlendirilmektedir. Uygun kartlar bir sonraki süreçlere aktarılırken, hatalı kartlar kalite ve onarım süreçlerine dahil edilmektedir.

Tam otomatik dizgi hatlarında operatörlerin rolü, sürecin doğrudan yürütücüsü olmaktan ziyade; izleyici, doğrulayıcı ve istisnai durumlara müdahale eden bir pozisyonda konumlanmaktadır. Bu durum, hattın yüksek otomasyon ve dijital olgunluk seviyesini açık biçimde ortaya koymaktadır.

2.6.3 Otomatik Hatlardan Yarı Otomatik Hatlara Geçiş Noktasının Analizi

Tam otomatik dizgi hatlarında temel elektronik fonksiyonları büyük ölçüde tamamlanan baskılı devre kartları (PCB), üretim sürecinin devamında doğrudan sevkiate yönlendirilmemekte; ürün tasarımı, müşteri gereksinimleri ve operasyonel ihtiyaçlara bağlı olarak yarı otomatik üretim hatlarına aktarılmaktadır. Bu geçiş noktası, XYZ firmasında elektronik üretimin otomasyon yoğun aşamalarından, insan müdahalesinin daha belirgin hale geldiği süreçlere geçişini temsil eden kritik bir ara evre olarak tanımlanmaktadır (XYZ Firması, saha çalışması, 2025).

Özellikle ürün portföyünün çeşitlilik göstermesi, bazı kartların yalnızca tam otomatik hatlarda tamamlanabilmesine olanak tanırken; bazı kartlar için manuel montaj, ek işlem veya müşteri özelinde tanımlanmış operasyonların gerekli olduğu görülmektedir (XYZ Firması, departman raporları, 2025).

Bu aşamada kartlar, tam otomatik hat çıkışında pass olarak ayrıştırıldıktan sonra magazinler aracılığıyla yarı otomatik hatlara taşınmaktadır. Fiziksel taşıma süreci, üretim sahasında tanımlı taşıma yolları ve ESD korumalı ekipmanlar ile gerçekleştirilmektedir. Taşıma sırasında kartların kimlik bilgileri, barkod ve ERP kayıtları üzerinden izlenmeye devam edilmekte; böylece süreç boyunca izlenebilirlik kesintiye uğramamaktadır (XYZ Firması, üretim süreci gözlemleri, 2025).

Geçiş noktasında dikkat çeken bir diğer unsur, üretim akışının çevrim süreleri ve hat dengeleme açısından yeniden şekillenmesidir. Tam otomatik dizgi hatları, yüksek hız ve düşük çevrim süreleriyle çalışırken; yarı otomatik hatlarda operasyon süresi, büyük ölçüde insan müdahalesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu durum, geçiş noktasının üretim planlaması açısından kritik bir senkronizasyon alanı haline gelmesine neden olmaktadır.

Ayrıca bu aşamada, kalite kontrol perspektifinin de değiştiği gözlemlenmiştir. Tam otomatik hatlarda kalite, ağırlıklı olarak makine tabanlı kontrol sistemleri (SPI, AOI) üzerinden sağlanırken; yarı otomatik hatlara geçişle birlikte operatör yargısı, görsel kontrol ve yerinde karar alma süreçte daha fazla rol oynamaktadır (XYZ Firması, saha

çalışması, 2025). Bu durum, insan faktörünün üretim kalitesi üzerindeki etkisini artırmakta ve operatör yetkinliğini kritik bir değişken haline getirmektedir.

Yarı otomatik üretim hatları, XYZ firmasında elektronik üretimin en insan merkezli ve operasyonel açıdan en değişken aşamalarını oluşturmaktadır. Bu hatlarda süreç; planlama, malzeme hazırlık, manuel montaj, görsel kontrol, düzeltme (yeniden işleme) ve kayıt adımlarından oluşan çok aşamalı bir yapı sergilemektedir (XYZ Firması, saha çalışması, 2025).

2.6.4. Malzeme Hazırlık ve Hat Besleme Süreçleri

Yarı otomatik hatlara geçiş öncesinde, üretimde kullanılacak elektronik bileşenler malzeme hazırlık departmanı tarafından üretime uygun hale getirilmektedir. Bu kapsamda bantlı komponentler için malzeme ayırma (material stripping) işlemleri gerçekleştirilmekte; gerekli durumlarda bacak şekillendirme (lead forming) operasyonları uygulanmaktadır. Hazırlanan malzemeler, etiketleme işlemi ile kimliklendirilmekte ve sabit lokasyon yöntemi kullanılarak depolanmaktadır (XYZ Firması, departman raporları, 2025).

Üretim planına uygun olarak hazırlanan malzemeler, taşıma arabaları ve ESD korumalı ekipmanlar aracılığıyla yarı otomatik montaj hatlarına ulaştırılmaktadır. Bu aşamada malzeme doğruluğu, barkod eşleştirme ve referans görseller üzerinden kontrol edilmektedir.

2.6.5 Manuel Montaj ve Operatör Roller

Yarı otomatik montaj hatlarında üretim, genellikle birden fazla operatörden oluşan hat ekipleri tarafından yürütülmektedir. Her operatör, referans görseller ve iş talimatları doğrultusunda kart üzerindeki belirli komponentleri monte etmekle sorumludur. Kartlar, hat boyunca sıralı biçimde ilerlemekte; her operatör kendi görev alanındaki işlemi tamamladıktan sonra kartı bir sonraki istasyona aktarmaktadır (XYZ Firması, saha çalışması, 2025).

Bu yapı, görev paylaşımı ve iş bölümü sayesinde üretimde esneklik sağlamakta; ancak aynı zamanda operatör deneyimi ve dikkat düzeyinin süreç çıktıları üzerindeki etkisini artırmaktadır.

2.6.6 Görsel Kontrol, Kamera Destekli İnceleme

Montaj işlemi tamamlanan kartlar, hat çıkışında görsel kontrol ve kamera destekli incelemeye tabi tutulmaktadır. Bu aşamada eksik, yanlış veya hatalı yerleştirilmiş bileşenler tespit edilmekte; küçük ölçekli hatalar için yerinde düzeltme uygulanmaktadır. Daha kapsamlı müdahale gerektiren kartlar ise tamir istasyonlarına yönlendirilmektedir (XYZ Firması, üretim süreci gözlemleri, 2025).

Görsel kontrol ve yeniden işleme süreçleri, üretim akışında kaliteyi güvence altına almakla birlikte, çevrim sürelerini uzatan ve insan faktörüne bağımlı adımlar olarak öne çıkmaktadır.

2.6.7 Üretim Kayıtları ve İzlenebilirlik

Yarı otomatik hatlarda üretim tamamlandığında, kartların durumu ERP sistemi üzerinden kayıt altına alınmaktadır. Üretim çıkış kaydı ile birlikte kartın bir sonraki sürece (test, kaplama, paketleme vb.) hazır olduğu bilgisi ilgili departmanlara iletilmektedir. Bu kayıtlar, departmanlar arası izlenebilirliğin sağlanması ve üretim performansının izlenmesi açısından kritik öneme sahiptir (XYZ Firması, departman raporları, 2025).

2.6.8 Roller, Yetkinlikler ve İnsan Faktörünün Üretim Sürecindeki Etkisi

XYZ firmasında elektronik üretim süreci, yüksek otomasyon seviyesine sahip sistemler ile insan merkezli operasyonların birlikte yürütüldüğü hibrit bir yapı sergilemektedir. Bu yapı içerisinde insan faktörü, özellikle yarı otomatik ve manuel süreçlerde üretim kalitesi, süreç sürekliliği ve esneklik açısından belirleyici bir rol üstlenmektedir. Operatörlerin, yalnızca fiziksel montaj görevlerini yerine getiren unsurlar olmadığını; aynı zamanda süreç içerisinde karar verici, doğrulayıcı ve dengeleyici aktörler olarak konumlandığı ortaya konmaktadır (XYZ Firması, saha çalışması, 2025).

Yarı otomatik hatlarda tanımlanan başlıca roller; planlama personeli, hat sorumluları (supervisor), montaj operatörleri, kalite/kamera operatörleri ve tamir teknisyenleri olarak sınıflandırılmaktadır. Her bir rol, üretim sürecinin farklı bir aşamasında kritik sorumluluklar üstlenmekte ve süreç çıktısını doğrudan etkilemektedir.

Planlama personeli, üretilecek kart tiplerini, miktarlarını ve üretim sırasını belirleyerek üretim sürecinin başlangıç noktasını oluşturmaktadır. Bu aşamada yapılan planlama, hem tam otomatik hem de yarı otomatik hatların iş yükünü doğrudan etkilemektedir. Planlama kararlarının yalnızca talep ve stok durumuna değil; aynı zamanda yarı otomatik hatlardaki insan kaynağı kapasitesine de bağlı olarak şekillendiğini göstermektedir (XYZ Firması, departman raporları, 2025).

Hat sorumluları (supervisor), yarı otomatik hatlarda üretimin koordinasyonundan sorumludur. Bu rol; barkod üretimi, referans görsellerin operatörlere dağıtılması, görev paylaşımının yapılması ve hat üzerindeki akışın sürekliliğinin sağlanmasını kapsamaktadır. Supervisor'ların özellikle istisnai durumlarda (malzeme eksikliği, kalite problemi, hat duruşu vb.) hızlı karar alabilme yetkinliği, üretim sürekliliği açısından kritik öneme sahiptir.

Montaj operatörleri, yarı otomatik üretim hatlarının en yoğun insan kaynağını oluşturmaktadır. Operatörler, referans görseller ve iş talimatları doğrultusunda kart üzerindeki belirli komponentleri monte etmekte; montaj işlemi sırasında hem görsel hem de fiziksel doğrulama yapmaktadır. (XYZ Firması, saha çalışması, 2025).

Kalite ve kamera operatörleri, montaj sonrası süreçlerde kritik bir filtreleme mekanizması görevi üstlenmektedir. Kamera destekli sistemler tarafından işaretlenen hatalar, bu operatörler tarafından manuel olarak doğrulanmakta; false call olarak tanımlanan yanlış pozitif hataların üretim akışını gereksiz yere durdurmasının önüne geçilmektedir. Bu durum, otomatik sistemler ile insan yargısının birlikte çalıştığı bir kalite güvence yapısını ortaya koymaktadır.

Tamir teknisyenleri ise hat üzerinde giderilemeyen veya daha detaylı müdahale gerektiren kartlardan sorumludur. Bu rol, üretim sürecinde kaliteyi geri kazanma fonksiyonunu üstlenmekte ve yeniden işleme döngülerinin yönetilmesini sağlamaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, XYZ firmasında insan faktörü; otomasyonun tamamlayıcısı, süreç esnekliğinin sağlayıcısı ve kalite güvence mekanizmasının ayrılmaz bir parçası olarak konumlanmaktadır (XYZ Firması, saha çalışması, 2025).

2.6.9. Tanımlar ve Süreç Sözlüğü

Bu bölümde, XYZ firmasında elektronik üretim sürecinde kullanılan temel kavramlar ve operasyonel terimler açıklanmıştır. Tanımlar, elde edilen bilgiler doğrultusunda oluşturulmuş olup, süreçlerin daha anlaşılır ve tutarlı biçimde analiz edilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır (XYZ Firması, departman raporları, 2025).

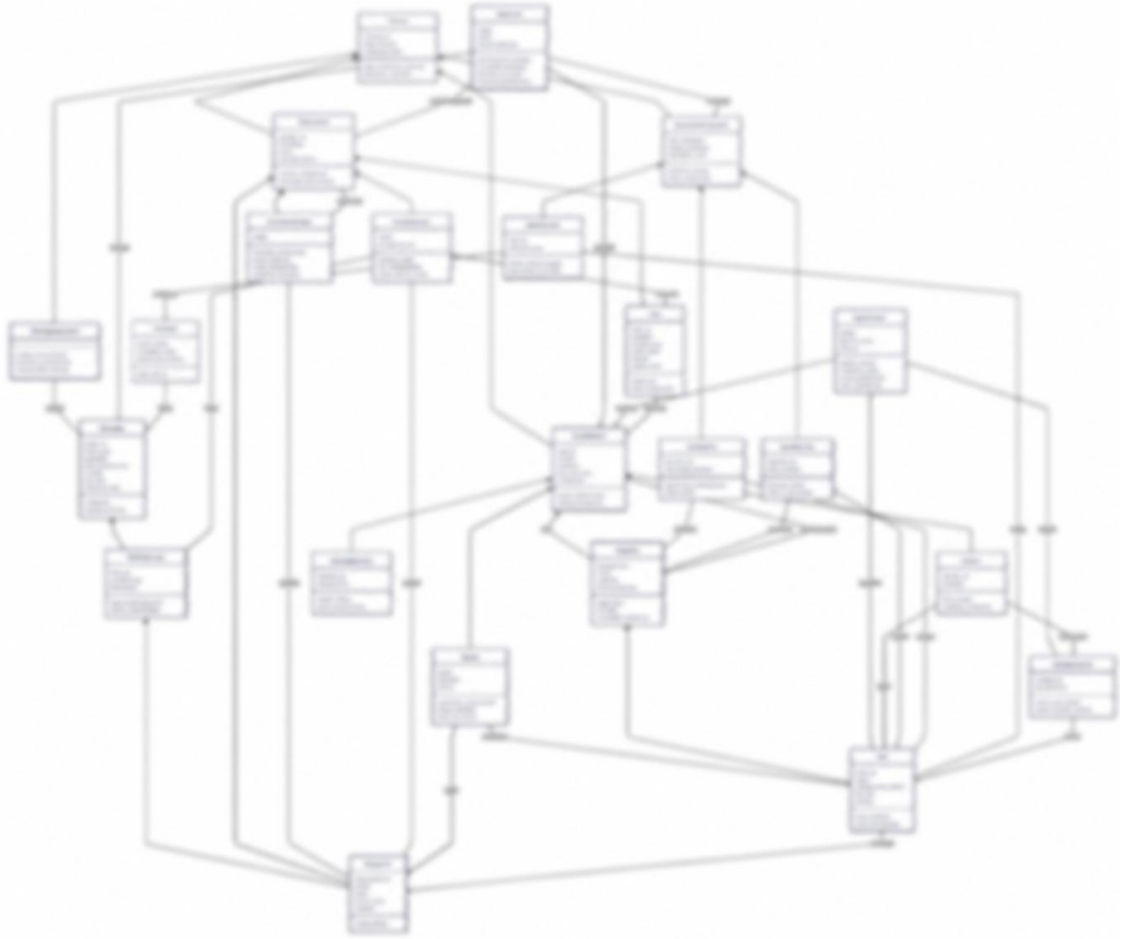
- **Malzeme Ayırma (Material Stripping):**
Bantlı halde bulunan elektronik bileşenlerin tekil parçalara ayrılarak üretime hazır hale getirilmesi süreci.
- **Bacak Şekillendirme (Lead Forming):**
Elektronik bileşen bacaklarının, montaj gereksinimlerine uygun geometrik forma getirilmesi işlemi.
- **Etiketleme (Labeling):**
Malzemelerin kimliklendirilmesi ve izlenebilirliğinin sağlanması amacıyla barkod veya tanımlayıcı etiketlerin uygulanması süreci.
- **Raflama / Yerleştirme (Shelving):**
Malzemelerin depo içerisinde tür ve kategorilerine göre önceden tanımlanmış sabit lokasyonlara yerleştirilmesi işlemi.
- **Sabit Lokasyon Yöntemi (Fixed-Location Method):**
Her bir malzeme türünün depoda belirli ve değişmeyen bir alana atanmasını esas alan depolama yaklaşımı.
- **Barkod Eşleştirme (Barcode Matching):**
Kart üzerindeki QR kod ile boş barkod etiketinin sistem üzerinden eşleştirilmesi işlemi. Bu adım, üretim ve izleme sürecini başlatır.
- **Referans Görsel (Reference Image):**
Montaj sonrası kartın alması gereken nihai durumu gösteren ve operatörlere görsel rehberlik sağlayan örnek görüntü.

- Şarjör / Magazin (Magazine):
Devre kartlarının veya yarı mamullerin düzenli şekilde istiflenmesini ve montaj hattında kolay erişimini sağlayan taşıyıcı aparat.
- Montaj (Assembly):
Elektronik bileşenlerin baskılı devre kartı (PCB) üzerine, tanımlı iş adımlarına uygun şekilde yerleştirilmesi süreci.
- Görsel Kontrol (Visual Inspection):
Bir sonraki üretim aşamasına geçmeden önce, kart üzerindeki eksik veya hatalı bileşenlerin operatör tarafından manuel olarak kontrol edilmesi.
- Düzeltme / Rötuş (rework):
Görsel veya otomatik kontrollerde hatalı olduğu belirlenen kartlara uygulanan düzeltici işlemler bütünü.
- Üretim Çıkış Kaydı (Production Output Logging):
Montaj sürecinin tamamlandığının ERP sistemi üzerinden kayıt altına alınması ve kartın bir sonraki sürece hazır olduğunun bildirilmesi.
- Flux:
Lehimleme öncesinde uygulanan ve oksidasyonu gidererek lehimin yüzeye tutunmasını kolaylaştıran kimyasal ajan.
- Lehim (Solder):
Bileşen bacakları ile PCB arasında elektriksel ve mekanik bağlantı sağlayan metal alaşım.
- Kamera Kontrolü (Camera Inspection):
Dalga lehimleme öncesinde gerçekleştirilen otomatik görsel denetim süreci.
- Maskeleme Paleti (Masking Pallet):
Dalga lehimleme sırasında kartı sabitleyen ve belirli bölgeleri lehim temasından koruyan özel aparat.
- Lehim Banyosu (Solder Bath):
Kartın lehimleme işlemi sırasında kısmen daldırıldığı erimiş lehim ortamı.
- Anında Düzeltmeler (On-the-Spot Corrections):
Dalga lehimleme sonrası tespit edilen küçük hataların üretim hattı çıkışında giderilmesi.

- Tamir İstasyonu (Repair Station):
Hat üzerinde giderilemeyen büyük lehimleme hatalarının yönlendirildiği detaylı onarım alanı.
- Manuel Görsel İnceleme:
AOI sistemi tarafından tespit edilen hataların operatörler tarafından doğrulanmasına yönelik manuel kalite kontrol adımı.
- Hata Doğrulama (Defect Verification):
Otomatik sistemler tarafından işaretlenen hataların geçerliliğinin insan gözüyle teyit edilmesi süreci.
- Yerde Onarım (On-site Repair):
Küçük ölçekli hataların AOI istasyonunda doğrudan giderilmesiyle sürecin hızlandırılması.
- AOI'ye Geri Dönüş:
Onarım sonrası kartların yeniden otomatik optik incelemeye alınması.
- Kart Çıkış Kaydı (Board Output Logging):
Kartın kontrol veya onarım sürecini tamamladığının ERP sistemine işlenmesi.
- AOI'ye Uygun Olmayan Kartlar:
Boyut, yüzey yapısı veya bileşen dizilimi nedeniyle otomatik optik incelemeye uygun olmayan ve manuel olarak kontrol edilen kartlar.
- Departmanlar Arası İzlenebilirlik:
Kartların üretim süreci boyunca farklı departmanlar arasındaki hareketlerinin ERP sistemi üzerinden gerçek zamanlı izlenebilmesi.
- Test Grupları:
Aynı üretim ve test adımlarını izleyen kartların, süreç takibini kolaylaştırmak ve izlenebilirliği artırmak amacıyla gruplandırılması.
- Genel Tamir Departmanı:
Kaplama dışı üretim hatalarının (lehime veya bileşene bağlı) giderildiği merkezi onarım birimi.
- Geçti / Kaldı Kontrolü (Pass/Fail Check):
Kartların kalite kriterlerine göre uygunluk durumunun değerlendirilmesi.

- Şerit Kırma / Kenar Düzeltme:
Kaplama sonrası kart üzerindeki destek şeritlerinin veya fazla kaplama kalıntılarının manuel olarak temizlenmesi.
- ESD Korumalı Kutular:
Elektrostatik deşarj riskini önlemek amacıyla kullanılan antistatik taşıma ve depolama ekipmanları.
- MTK Etiketi:
Kartın üretim sürecindeki güncel durumunu gösteren ve ERP sistemi tarafından oluşturulan izleme etiketi.
- Gruplanmış Ürün:
Birden fazla kartın tek bir set halinde işlem gördüğü ve bazı bireysel adımları atlayabilen ürün yapısı.
- Yeşil Etiket (Green Label):
Tüm kontrollerden başarıyla geçen ürünlere verilen onay etiketi.
- Yeniden İnceleme Akışı (Re-Inspection Flow):
İkinci kontrolde hata tespit edilmesi durumunda ürünün ilgili sürece geri yönlendirilmesini içeren kalite döngüsü.
- Lojistik Devir Noktası:
Onaylanmış ve paketlenmiş ürünlerin sevkiyat için lojistik birimine teslim edildiği son aşama.

2.6.10 UML Tabanlı Süreç Modelinin Açıklanması



Şekil 2 UML Tabanlı Süreç Modelleme

XYZ firmasında elektronik üretim süreçlerinin karmaşık ve çok aktörlü yapısı, analiz edilebilir hale getirilebilmesi amacıyla UML tabanlı süreç modelleme yaklaşımı kullanılarak yapılandırılmıştır. UML diyagramı; üretim sürecine dahil olan aktörleri, sistemleri, nesneleri ve bu unsurlar arasındaki etkileşimleri görsel olarak temsil etmektedir. Şekilde yer alan firma içi sistem, süreç ve veri yapılarına ilişkin detaylar, kurumsal bilgi güvenliği ve gizlilik gereklilikleri nedeniyle bulanıklaştırılmıştır (XYZ Firması, saha çalışması, 2025).

Modelde başlıca aktörler; **operatörler, hat sorumluları, kalite personeli ve planlama birimi** olarak tanımlanmıştır. Sistem bileşenleri ise üretim makineleri, kamera ve AOI sistemleri ile ERP altyapısından oluşmaktadır. Kart, magazin ve iş emri gibi fiziksel ve dijital nesneler, süreç boyunca bu aktörler ve sistemler arasında hareket etmektedir.

UML modeli, üretim sürecinde bilginin nerede üretildiğini, hangi noktada kayıt altına alındığını ve hangi aktör tarafından kullanıldığını açık biçimde göstermektedir. Özellikle barkod eşleştirme, üretim çıkış kaydı ve kart çıkış kaydı gibi adımlar, izlenebilirlik açısından kritik kontrol noktaları olarak modellenmiştir.

Bu modelleme sayesinde;

- departmanlar arası etkileşimler,
 - insan–makine temas noktaları,
 - süreçteki geri dönüş döngüleri
- net biçimde görselleştirilmiş ve analiz edilebilir hale getirilmiştir.

2.6.11Mevcut Durumun Genel Değerlendirmesi

Bu bölümde gerçekleştirilen analizler sonucunda, XYZ firmasında elektronik üretim sürecinin teknik açıdan gelişmiş, ancak operasyonel karmaşıklığı yüksek bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Tam otomatik dizgi hatları, yüksek hız, tekrarlanabilirlik ve kalite avantajları sunarken; yarı otomatik hatlar ürün çeşitliliği ve müşteri özelinde esneklik sağlamaktadır (XYZ Firması, saha çalışması, 2025).

Bununla birlikte, yarı otomatik ve manuel süreçlerde insan faktörünün artması; çevrim süreleri, hata olasılığı ve izlenebilirlik açısından yönetilmesi gereken ek zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, üretim sürecinde dijital destek mekanizmalarının ve karar destek sistemlerinin önemini artırmaktadır.

Bu bölümde ortaya konulan mevcut durum analizi, XYZ firmasındaki elektronik üretim yapısının detaylı bir fotoğrafını sunmakta; tez kapsamında ilerleyen bölümlerde ele alınacak dijital dönüşüm, süreç iyileştirme çalışmalarına temel oluşturmaktadır.

2.7. DİJİTAL DÖNÜŞÜM UYGULAMALARI

Bir önceki alt bölümde XYZ Firması’nda elektronik üretim süreçlerinin mevcut durumu detaylı biçimde analiz edilmiştir. Yapılan analizler, üretim yapısının tam otomatik dizgi hatları ile yarı otomatik ve manuel süreçlerin birlikte çalıştığı, çok sayıda kontrol kapısı,

ara stok noktası, yeniden işleme döngüsü ve departmanlar arası etkileşim içeren karmaşık bir sistem olduğunu ortaya koymuştur. Bu yapı, ürün çeşitliliği ve esnek üretim açısından önemli avantajlar sağlamakla birlikte; süreçlerin izlenebilirliği, kalite güvencesi, performans ölçümü ve karar alma mekanizmalarının etkinliği açısından ileri seviye dijitalleşme ihtiyacını da beraberinde getirmektedir.

Bu ihtiyaçlardan hareketle XYZ Firması'nda dijital dönüşüm, yalnızca makine veya otomasyon yatırımlarıyla sınırlı bir teknoloji güncellemesi olarak değil; üretim süreçlerinin uçtan uca sayısallaştırılması, fiziksel ve dijital sistemlerin bütünleştirilmesi ve performansın veri temelli olarak yönetilmesini hedefleyen bütüncül bir dönüşüm yaklaşımı çerçevesinde ele alınmıştır. Bu bölümde, söz konusu yaklaşım doğrultusunda hayata geçirilen ve geliştirilmekte olan dijital dönüşüm uygulamaları detaylı biçimde sunulmaktadır.

Bu bölümde dijital dönüşüm uygulamaları, ayrı teknolojik yatırımlar olarak değil, üretim sürecinde veri üretme, süreç görünürlüğünü artırma ve performans göstergelerinin ölçülebilirliğini güçlendirme işlevleri açısından ele alınmıştır.

2.7.1 Mevcut Durumun Sayısallaştırılması ve Süreç Şeffaflığının Sağlanması

Dijital dönüşüm sürecinin ilk ve en kritik adımı, üretim sisteminin mevcut durumunun nitel gözlemlerle sınırlı kalmaksızın sayısal ve analiz edilebilir bir yapıya dönüştürülmesi olmuştur. Bu kapsamda üretim alanı, depo ve market bölgeleri, ara stok noktaları, test ve yeniden işleme alanları ile sevkiyat geçişleri birlikte ele alınmıştır. Malzeme, yarı mamul ve kart hareketleri; taşıma mesafeleri, bekleme süreleri ve yoğunluk noktaları açısından analiz edilmiştir.

Spagetti diyagramları, süreç ilişki analizleri ve akış yoğunluğu görselleştirmeleri kullanılarak üretim içi karmaşıklık ve verimsizlik noktaları görünür hâle getirilmiştir. Bu çalışmalar, iyileştirme kararlarının sezgisel yaklaşımlar yerine veri temelli önceliklendirme ile alınmasını sağlamış; sonraki dijital dönüşüm uygulamaları için sağlam bir başlangıç noktası oluşturmuştur.

2.7.2. Fiziksel Üretim Alanı Yerleşiminin Dijital Temelli İyileştirilmesi

XYZ Firması'nda dijital dönüşüm, üretim sisteminin yalnızca bilgi akışı boyutunda değil, fiziksel tasarım boyutunda da uygulanmıştır. Mevcut üretim alanı yerleşimi; malzeme akışı, proses sıralaması, departman etkileşimleri, güvenlik ve ESD gereksinimleri dikkate alınarak yeniden değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda alternatif yerleşim senaryoları oluşturulmuş; her senaryo toplam taşıma mesafesi, ara stok alan ihtiyacı, darboğaz oluşma potansiyeli ve gelecekteki kapasite artışlarına uygunluk açısından karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda üretim alanı; tam otomatik dizgi hatları, yarı otomatik montaj alanları, kalite kontrol kapıları ve yeniden işleme bölgeleri arasındaki akışı sadeleştirecek şekilde yeniden yapılandırılmıştır. Yerleşim planları mühendislik çizimleri ile detaylandırılarak standart hâle getirilmiş ve uygulamaya alınmıştır.

Bu iyileştirmeler, üretim akışının daha öngörülebilir ve dengeli hâle gelmesini sağlamış; kalite sapmalarının yönetimini kolaylaştıran bir altyapı oluşturmuştur.

2.7.3. Depo–Üretim Entegrasyonu ve Dijital Malzeme Yönetimi

Elektronik üretimde kalite ve performans üzerinde doğrudan etkisi olan unsurlardan biri, doğru malzemenin doğru zamanda ve doğru hatta beslenmesidir. Bu nedenle dijital dönüşüm kapsamında depo süreçleri, üretim süreçleriyle entegre biçimde ele alınmıştır.

Malzemelerin barkod ve etiketleme ile kimliklendirilmesi, sabit lokasyon yöntemiyle depolanması ve raflama süreçlerinin standardize edilmesi sağlanmıştır. Üretime besleme öncesinde malzeme doğrulama adımları süreç kapısı olarak tanımlanmış; yanlış malzeme, yanlış komponent veya eksik besleme kaynaklı hataların önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca malzeme ayırma (material stripping) ve bacak şekillendirme (lead forming) gibi hazırlık süreçleri operasyonel standartlara bağlanmıştır.

Bu uygulamalar, üretim sırasında oluşabilecek kalite problemlerinin daha erken aşamada engellenmesine katkı sağlamış; yeniden işleme ve hata maliyetlerinin azaltılmasını desteklemiştir.

2.7.4. Üretim Alanı Yerleşiminin Dijital Analiz ve Optimizasyon Yoluyla İyileştirilmesi

XYZ Firması'nda dijital dönüşüm uygulamaları yalnızca yazılım, veri toplama veya izlenebilirlik altyapılarıyla sınırlı tutulmamış; üretim performansını doğrudan etkileyen fiziksel üretim alanı yerleşimi de dönüşümün temel bileşenlerinden biri olarak ele alınmıştır. Elektronik üretimde tam otomatik ve yarı otomatik hatların birlikte çalıştığı hibrit yapıda, hat yerleşimleri, malzeme akışları ve ara stok noktaları üretim verimliliği ve kalite performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Bu kapsamda, üretim alanının mevcut yerleşimi dijital dönüşüm sürecinin erken aşamalarında sayısal ve veri temelli yöntemlerle analiz edilmiştir. Mevcut durumda üretim akışının; uzun taşıma mesafeleri, çapraz trafik noktaları, ara stok birikimleri ve hatlar arası dengesiz yüklenmeler nedeniyle operasyonel kayıplar ürettiği tespit edilmiştir. Özellikle tam otomatik dizgi hatları ile yarı otomatik montaj alanları arasındaki fiziksel kopukluk, hem malzeme besleme süreçlerinde hem de kalite kontrol ve yeniden işleme döngülerinde gecikmelere yol açmaktadır.

Bu sorunları ele almak amacıyla, üretim alanı için yerleşim iyileştirme çalışmaları dijital analizler eşliğinde yürütülmüştür. İlk aşamada, üretim süreçleri boyunca malzeme, yarı mamul ve ürün hareketleri detaylı biçimde haritalandırılmış; spaghetti diyagramları ve akış yoğunluğu analizleri kullanılarak taşıma mesafeleri ve trafik yoğunluğu olan bölgeler görünür hâle getirilmiştir. Bu analizler sayesinde, üretim akışını yavaşlatan ve değer yaratmayan hareketler nicel olarak ortaya konulmuştur.

İkinci aşamada, mevcut yerleşime bağlı kalmaksızın alternatif blok yerleşim senaryoları geliştirilmiştir. Bu senaryolar oluşturulurken aşağıdaki kriterler birlikte değerlendirilmiştir:

- Tam otomatik dizgi hatları ile yarı otomatik montaj alanları arasındaki fiziksel yakınlık,
- Market ve depo alanlarından üretim hatlarına olan besleme mesafeleri,
- Kalite kontrol kapıları (AOI, manuel kontrol, yeniden işleme arasındaki geçiş sıklığı,
- Ara stok alanlarının konumu ve kapasitesi,
- Gelecekteki kapasite artışı ve yeni hat eklenmesine uygun rezerv alan ihtiyacı.

Her bir yerleşim senaryosu, toplam taşıma mesafesi, bekleme süresi potansiyeli ve süreçler arası senkronizasyon açısından karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirmeler sonucunda, üretim akışını daha doğrusal ve sade hâle getiren; hatlar arası geri dönüşleri ve çapraz trafik noktalarını azaltan bir yerleşim yaklaşımı benimsenmiştir.

Son aşamada seçilen yerleşim planı, mühendislik çizimleri ile detaylandırılmış ve uygulamaya alınmıştır. İstasyon konumları, geçiş yolları, market–hat besleme noktaları ve yeniden işleme alanları standartlaştırılmış; fiziksel üretim ortamı dijital dönüşüm hedefleriyle uyumlu hâle getirilmiştir. Bu süreçte özellikle yarı otomatik hatlarda operatör hareketlerinin sadeleştirilmesi ve market arabalarının hat önlerine daha kontrollü şekilde beslenmesi hedeflenmiştir.

Yerleşim iyileştirmeleri, dijital dönüşümün yazılım ve veri katmanlarını doğrudan destekleyen bir altyapı oluşturmuştur. Fiziksel akışın sadeleştirilmesi sayesinde; ağırlık bazlı magazin takibi, kart bazlı çalışma süresi analizi ve iş emri–hat eşleştirme gibi dijital uygulamalardan elde edilen verilerin daha anlamlı ve karşılaştırılabilir hâle gelmesi sağlanmıştır. Ayrıca kalite kontrol ve yeniden işleme süreçlerinin üretim akışına daha entegre biçimde konumlandırılması, kalite sapmalarının erken tespitini kolaylaştırmıştır.

Bu bağlamda yerleşim iyileştirmeleri, XYZ Firması’nda dijital dönüşümün yalnızca bilgi sistemleriyle sınırlı olmayan; fiziksel üretim sistemi ile dijital analitik altyapının birlikte ele alındığı bütüncül bir dönüşüm yaklaşımı olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu yeni yerleşim düzeni, bir sonraki bölümde analiz edilecek olan kalite ve performans başarı metriklerinin(ör. çevrim süresi, yeniden işleme oranı, hat denge kayıpları) iyileşmesinde kritik bir rol oynamıştır.

2.7.5. İş Emri Tabanlı Stok Kontrolü ve Planlama Entegrasyonu

Dijital dönüşüm kapsamında geliştirilen önemli uygulamalardan biri, iş emri oluşturma aşamasında malzeme ve yarı mamul stok durumunun otomatik olarak kontrol edilmesidir. Üretim planlama sürecinde açılan iş emirleri, dijital izleme altyapısına entegre edilerek ilgili kart için gerekli stok seviyeleri sistem tarafından kontrol edilmektedir.

Stok seviyesinin yetersiz olduğu durumlarda sistem, uyarı mekanizmaları üretmekte veya tedarik sürecini tetikleyebilecek aksiyonların başlatılmasına imkân sağlamaktadır. Bu yaklaşım, plansız duruşların ve üretim esnasında ortaya çıkan malzeme eksikliklerinin azaltılmasını hedeflemekte; üretim planlama kararlarının daha gerçekçi verilmesine katkı sunmaktadır. Uygulama hâlen geliştirme ve yaygınlaştırma aşamasındadır. Şekil 3’te yer alan iş emri ve üretim performansına ilişkin firma içi veriler, kurumsal bilgi güvenliği ve gizlilik gereklilikleri nedeniyle bulanıklaştırılmıştır.

İş Emri No	İş Emri Adı	İş Emri Durumu	İş Emri Tarih	İş Emri Saati	İş Emri Dakika	İş Emri Saniye	İş Emri Milisaniye	İş Emri Miktarı	İş Emri Birimi	İş Emri Birim Fiyatı	İş Emri Birim Maliyeti	İş Emri Birim Karı	İş Emri Birim Zamanı	İş Emri Birim Hata	İş Emri Birim Kalite	İş Emri Birim Güvenlik	İş Emri Birim Gizlilik
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
11																	
12																	
13																	
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	
35																	
36																	
37																	
38																	
39																	
40																	
41																	
42																	
43																	
44																	
45																	
46																	
47																	
48																	
49																	
50																	
51																	
52																	
53																	
54																	
55																	
56																	
57																	
58																	
59																	
60																	
61																	
62																	
63																	
64																	
65																	
66																	
67																	
68																	
69																	
70																	
71																	
72																	
73																	
74																	
75																	
76																	
77																	
78																	
79																	
80																	
81																	
82																	
83																	
84																	
85																	
86																	
87																	
88																	
89																	
90																	
91																	
92																	
93																	
94																	
95																	
96																	
97																	
98																	
99																	
100																	

Şekil 3 - Hat - Performans Ekranı

2.7.6. Magazın, Market ve Yarı Mamul Akışının Dijital Takibi

Yarı otomatik üretim ortamında magazinler, market arabaları ve yarı mamul akışı üretim performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu nedenle dijital dönüşüm

kapsamında magazinlerin, VIP depolama alanlarının ve market arabalarının hareketleri izlenebilir hâle getirilmiştir.

Magazinlerin ve market arabalarının depoya giriş–çıkışları, yer değiştirmeleri ve hatlara beslenme durumları sistem üzerinden kayıt altına alınmaktadır. Yanlış yerde bekleyen, eksik malzemeli veya uzun süre hareketsiz kalan arabalar tespit edilerek uyarı mekanizmaları oluşturulmaktadır. Bu uygulamalar, market hazırlık süreci ile montaj hattı tüketimi arasındaki senkronizasyon problemlerinin görünür hâle getirilmesini sağlamaktadır. Söz konusu altyapı pilot ve geliştirme aşamasında olup, saha geri bildirimleri ile olgunlaştırılmaktadır.

2.7.7. Ağırlık Bazlı Magazin Takibi ve Kart Bazlı Çalışma Süresi Analizi

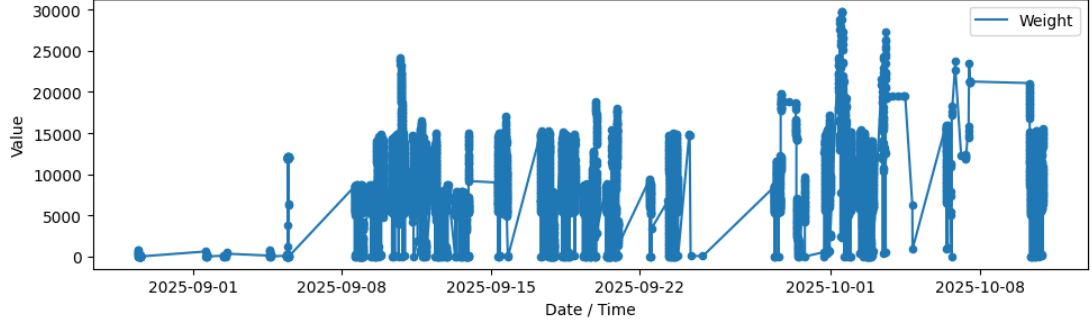
XYZ Firması’nda dijital dönüşümün performans boyutundaki en yenilikçi uygulamalarından biri, ağırlık bazlı magazin takibi yaklaşımıdır. Yarı otomatik montaj hatlarının giriş noktalarına yerleştirilen ağırlık sensörleri sayesinde magazin içerisindeki kart tüketimi zaman ekseninde izlenmektedir. Bu yöntemle kartların hatta giriş zamanı, tüketim hızı ve hatta kalma süresi dolaylı olarak hesaplanabilmektedir.

Ağırlık bazlı magazin takibi kapsamında elde edilen veriler, kart tüketiminin yalnızca miktarsal değil, zamansal boyutuyla da analiz edilmesine olanak tanımıştır. Magazin giriş noktalarına yerleştirilen ağırlık sensörleri aracılığıyla, magazin içerisindeki kart ağırlığının zamana bağlı değişimi sürekli olarak izlenmiş; bu sayede kart bazında fiili tüketim hızları ve hatta kalma süreleri dolaylı biçimde hesaplanabilmektedir.

Yapılan veri analizleri, planlanan çevrim süreleri ile fiili gerçekleşmeler arasında hat, ürün ve zaman bazında anlamlı sapmalar bulunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle yarı otomatik montaj hatlarında, insan faktörüne bağlı süre varyasyonlarının belirgin olduğu; aynı ürün için farklı zaman dilimlerinde farklı tüketim profilleri olduğu gözlemlenmiştir.

Bu yaklaşım, manuel sayım, operatör beyanı veya periyodik gözleme dayalı ölçümlere kıyasla daha objektif ve sürekliliği olan bir veri üretimi sağlamaktadır. Elde edilen

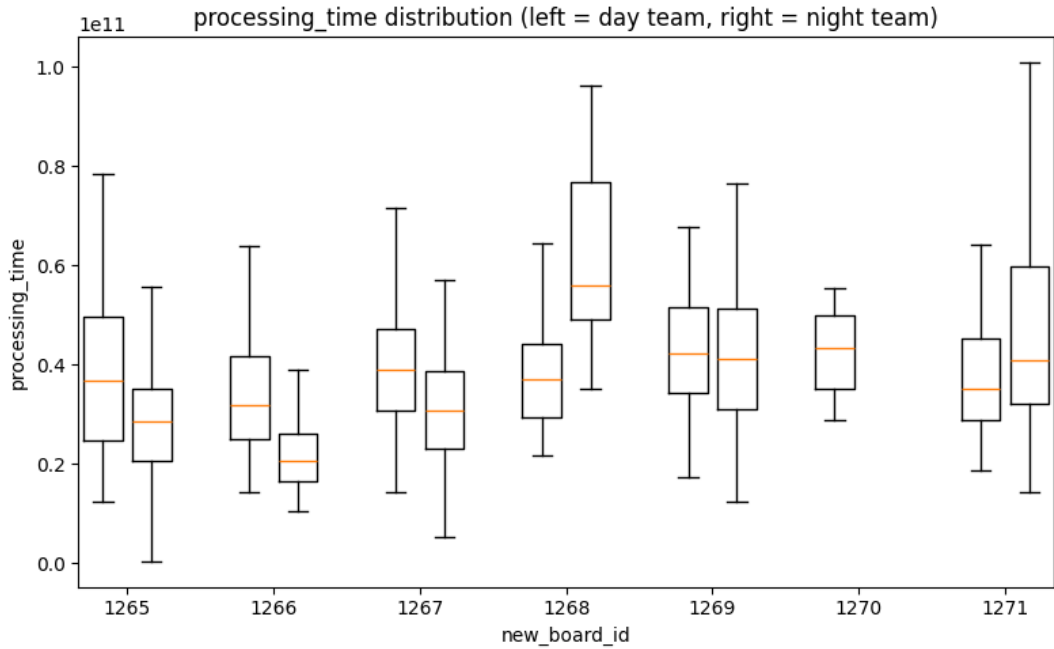
çıktılar, kart bazlı çalışma sürelerinin izlenmesi, performans sapmalarının erken tespiti ve üretim planlarının daha gerçekçi biçimde güncellenmesi açısından önemli bir karar destek mekanizması sunmaktadır. Söz konusu altyapı hâlen saha doğrulama ve iyileştirme aşamasında olmakla birlikte, dijital dönüşümün üretim performansına olan etkilerinin ölçülebilir hâle getirilmesi bakımından kritik bir uygulama olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 4 - Ağırlık Bazlı Magazin Takibi – Zaman Serisi Analizi

Bu grafikte, elektronik üretim hattında kullanılan magazin zaman içerisindeki ağırlık değişimi gösterilmektedir. Sensörler aracılığıyla elde edilen gerçek zamanlı ağırlık verileri, üretim sürecindeki malzeme tüketimini dolaylı olarak ortaya koymaktadır. Grafikte gözlemlenen kademeli azalışlar aktif üretim ve kart tüketimini temsil ederken, ani artışlar veya sabit kalan bölümler magazin dolumları, üretim duruşları ya da operatör müdahaleleriyle ilişkilendirilmektedir.

Ağırlık bazlı bu izleme yaklaşımı, manuel veri girişine ihtiyaç duyulmaksızın malzeme akışının izlenmesini mümkün kılmakta; kart bazlı çalışma süreleri ve üretim yoğunluğu hakkında dolaylı ancak tutarlı bilgiler sunmaktadır. Böylece üretim performansının sürekliliği ve malzeme kullanımındaki dalgalanmalar veri temelli olarak analiz edilebilmektedir.



Şekil 5 - Kart Bazlı İşlem Süresi Dağılımı: Vardiya Karşılaştırması (Gündüz–Gece)

Şekilde kart bazında işleme sürelerinin vardiyalara göre dağılımı kutu grafikleri (boxplot) aracılığıyla sunulmaktadır. Grafik, her bir kart tipi için gündüz ve gece vardiyalarında gerçekleşen çevrim sürelerinin medyan, çeyrekler arası aralık (IQR) ve uç değerler üzerinden karşılaştırılmasına imkân tanımaktadır. Bulgular, bazı kart tiplerinde vardiyalar arasında medyan çevrim süresi açısından belirgin farklılıklar bulunduğunu; ayrıca özellikle gece vardiyasında çevrim süresi varyasyonunun daha geniş bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Bu durum, fiili çevrim sürelerinin yalnızca planlanan değerler ile değil, vardiya bazlı operasyonel koşullar ve süreç istikrarı ile de yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Ağırlık bazlı izleme, manuel sayım veya operatör beyanına ihtiyaç duymadan objektif veri üretmekte; kart bazlı çalışma sürelerinin analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen veriler, kart bazında fiili işlem süresi ile planlanan sürelerin karşılaştırılmasında ve performans sapmalarının tespitinde kullanılmaktadır. Bu uygulama, özellikle yarı otomatik hatlarda insan faktöründen kaynaklanan süre varyasyonlarının ölçülebilir hâle gelmesini sağlamıştır. Altyapı hâlen saha doğrulama ve geliştirme aşamasındadır.

2.7.8. İnsan ve Kritik Ekipman Takibine Yönelik Dijital Hazırlıklar

Bu bölüm altında ele alınan dijital dönüşüm uygulamaları; malzeme, yarı mamul ve üretim verilerinin dijital ortamda izlenebilir hâle getirilmesine odaklanmakla birlikte, üretim performansını etkileyen insan ve ekipman kaynaklı değişkenlerin de ölçülebilir kılınmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda, 6.6.7 başlığı kapsamında yürütülen çalışmaların tamamlayıcı bir bileşeni olarak, personel ve kritik ekipman hareketlerinin izlenmesine yönelik dijital altyapı hazırlıkları gerçekleştirilmiştir.

Yapılan hazırlıklar kapsamında, üretim sahası içerisinde personel ve ekipman konum bilgilerinin gerçek zamanlı olarak toplanmasına, merkezi sistemler üzerinden işlenmesine ve raporlanmasına imkân tanıyacak modüler bir mimari tasarlanmıştır. Bu mimari; üretim, depo ve lojistik alanlarında gerçekleşen operasyonların, yalnızca çıktı verileri üzerinden değil, operasyonun gerçekleşme biçimi ve kaynak kullanımı üzerinden de analiz edilebilmesini hedeflemektedir.

Bu amaçla, kapalı alanlara uygun konumlandırma teknolojileri esas alınarak BLE ve UWB tabanlı donanım bileşenleri, ağ geçidi yapıları ve sunucu tarafı veri iletim altyapısı kurgulanmıştır. Tasarlanan yapı ile personel ve kritik ekipmanların üretim alanı içerisindeki hareketlerinin anlık olarak izlenebilmesi; bu hareketlere ilişkin verilerin ise zaman damgalı ve ilişkilendirilebilir şekilde kaydedilmesi amaçlanmıştır.

Geliştirilen mimari, yalnızca anlık konum takibi ile sınırlı olmayıp; ekipman kullanım yoğunluğu, bekleme süreleri, hatlar arası geçişler ve potansiyel darboğazların tespiti gibi performans analizlerine girdi oluşturabilecek veri setlerinin üretilmesini de hedeflemektedir. Bu yönüyle söz konusu altyapı, 6.6.7 başlığı altında ele alınan ağırlık bazlı malzeme takibi, kart bazlı çevrim süresi analizleri ve üretim performans göstergeleri ile birlikte değerlendirildiğinde, üretim süreçlerinin çok boyutlu olarak analiz edilmesine imkân tanımaktadır.

Bu aşamada söz konusu uygulamalar tam ölçekli olarak üretim ortamında devreye alınmamış olup, yapılan çalışmalar bir hazırlık ve dijital olgunluk artırımı niteliği taşımaktadır. Bununla birlikte oluşturulan sistem mimarisi; ilerleyen fazlarda üretim, depo ve tedarik zinciri süreçleriyle entegre edilerek, performans kayıplarının insan ve

ekipman kaynaklı nedenlerle ilişkilendirilmesine olanak sağlayacak güçlü bir altyapı sunmaktadır.

Bu çerçevede insan ve kritik ekipman takibine yönelik dijital hazırlıklar, tez kapsamında ele alınan dijital dönüşüm uygulamalarının gelecekte genişletilebilir ve derinleştirilebilir bir bileşeni olarak değerlendirilmekte; üretim performansının yalnızca sonuç göstergeleri üzerinden değil, süreç ve kaynak kullanımı perspektifinden ele alınmasına katkı sağlamaktadır. Bu yaklaşım, üretim performansının yalnızca çıktı metrikleri üzerinden değil, süreci oluşturan insan–ekipman etkileşimleri üzerinden de değerlendirilmesine imkân tanıyan analitik bir çerçeve sunmaktadır.

2.7.9. Montaj Hattı Uygunluğunun İzlenmesi ve Üretim Ataması

Dijital dönüşüm kapsamında ele alınan bir diğer uygulama, iş emirlerinin uygun montaj hatlarına atanmasının dijital olarak desteklenmesidir. Hatların mevcut yükleri, kabiliyetleri ve müsaitlik durumları dikkate alınarak iş emirlerinin hangi hatta yönlendirileceği izlenebilir hâle getirilmiştir.

Bu yaklaşım, manuel planlama kararlarının azaltılmasını ve üretim kaynaklarının daha dengeli kullanılmasını hedeflemektedir. Uygulama şu anda pilot ve değerlendirme aşamasındadır.

2.7.10. Sevkiyat Terminine Dayalı Önceliklendirilmiş Üretim Planlama

Dijital dönüşüm çalışmalarının ileri aşamalarından biri, üretim planlamasının sevkiyat terminlerini dikkate alacak şekilde dijital olarak desteklenmesidir. Sevkiyat tarihleri temel alınarak önceliklendirilmiş üretim planları oluşturulmakta ve bu planlar planlama sistemlerine yansıtılmaktadır.

Bu yaklaşım, müşteri teslimat performansının artırılmasını ve üretim–lojistik entegrasyonunun güçlendirilmesini hedeflemektedir. Uygulama hâlen geliştirme ve doğrulama aşamasındadır.

2.7.11. Dijital İkiz, Yapay Zeka ve Analitik Yetkinliklerin Geliştirilmesi

Bu çalışma kapsamında yürütülen dijital dönüşüm uygulamalarının ortak hedefi; üretim sahasında gerçekleşen faaliyetlerin sayısallaştırılması, izlenebilir hâle getirilmesi ve elde edilen verilerin karar destek süreçlerinde kullanılabilecek biçimde yapılandırılmasıdır. Bu çerçevede dijital ikiz yaklaşımı, fiziksel üretim ortamında gerçekleşen süreçlerin dijital bir temsili üzerinden analiz edilmesini ve iyileştirme senaryolarının değerlendirilmesini mümkün kılan bütünleştirici bir kavram olarak ele alınmaktadır.

Tez kapsamında dijital ikiz yaklaşımı; üretim hatları, malzeme akışları, çevrim süreleri ve performans göstergeleri gibi unsurların tekil sistemler yerine bütüncül bir model içinde ilişkilendirilebilmesine yönelik bir analitik çerçeve olarak değerlendirilmiştir. Ağırlık bazlı malzeme takibi, kart bazlı çevrim süresi analizi, üretim kayıtlarının dijitalleştirilmesi ve süreç akışlarının UML tabanlı modellenmesi gibi çalışmalar, bu yaklaşımın veri ve modelleme temellerini oluşturmaktadır.

Bu kapsamda dijital ikiz; fiziksel üretim hattının birebir simülasyonundan ziyade, üretim performansını etkileyen kritik değişkenlerin (malzeme bulunurluğu, çevrim süresi, yeniden işleme oranları, hat dengesi) dijital ortamda birbirleriyle ilişkilendirilebilir hâle getirilmesini hedefleyen bir yönetim aracı olarak konumlandırılmıştır. Verilerin zaman damgalı ve süreç bazlı yapılandırılması, performansın geçmiş–mevcut durum karşılaştırmaları üzerinden izlenebilmesine ve sapmaların daha sistematik biçimde analiz edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

Oluşturulan bu yapı, Yapay Zeka ve ileri analitik uygulamalar için bir ön koşul niteliği taşımaktadır. Özellikle çevrim süresi sapmaları, darboğaz oluşumları ve kalite kaynaklı tekrar işleme faaliyetlerinin analitik yöntemlerle erken aşamada tespit edilmesi; dijital ikiz yaklaşımının ilerleyen fazlarda karar destek mekanizmalarına evrilmesine imkân tanıyacaktır. Bu yönüyle dijital ikiz, tamamlanmış tekil bir çıktıdan çok, sürekli geliştirilmesi gereken bir kurumsal yetkinlik alanı olarak değerlendirilmiştir.

2.7.12. 5G Destekli Endüstriyel IoT Altyapısına Yönelik Devam Eden Çalışmalar

Üretim sahasından toplanan verilerin güvenilir, düşük gecikmeli ve kesintisiz biçimde merkezi sistemlere aktarılması, dijital dönüşüm uygulamalarının ölçeklenebilirliği açısından kritik bir gerekliliktir. Bu gereksinim, gerçek zamanlı veri ihtiyacının yüksek olduğu elektronik üretim ortamlarında haberleşme altyapısını yalnızca destekleyici bir unsur olmaktan çıkararak dönüşüm mimarisinin stratejik bileşenlerinden biri hâline getirmektedir.

Bu doğrultuda 5G destekli endüstriyel IoT altyapılarına yönelik çalışmalar; sahadan veri üreten IoT cihazları, sensörler ve uç birimlerin merkezi uygulamalarla düşük gecikmeli ve yüksek güvenilirlikte haberleşmesini sağlayabilecek bir iletişim katmanı olarak değerlendirilmiştir. Ağırlık bazlı malzeme takibi, kart bazlı çevrim süresi ölçümleri ve insan/ekipman hareketlerine ilişkin konum verisi gibi uygulamalar genişledikçe, veri hacmi ve gerçek zamanlılık beklentisi artmakta; bu durum kablosuz iletişim altyapısının kapasite ve servis sürekliliği açısından ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Private 5G yaklaşımı; üretim sahasında kritik veri akışlarının yönetilebilmesi, operasyonel sürekliliğin korunması ve güvenlik gereksinimlerinin karşılanması açısından, kurumsal ağlardan izole biçimde kurgulanabilen bir mimari alternatifi sunmaktadır. Bu yapı sayesinde üretim ortamına özgü veri akışları için performans ve erişim kontrolü daha net tanımlanabilir; farklı kullanım senaryoları için servis seviyeleri ayrıştırılabilir.

Bu aşamada 5G destekli altyapı tam ölçekli bir üretim uygulaması olarak devreye alınmamış olup, yapılan çalışmalar daha çok kavramsal mimari ve hazırlık düzeyinde ele alınmıştır. Bununla birlikte oluşturulan çerçeve; ilerleyen aşamalarda dijital ikiz, Yapay Zeka ve gelişmiş analitik uygulamaların üretim ortamına entegrasyonunu destekleyecek, veri sürekliliği ve gerçek zamanlılık gereksinimlerini karşılayacak bir teknoloji bileşeni olarak konumlandırılmaktadır.

2.8. BÖLÜM DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde ele alınan dijital dönüşüm uygulamaları; üretim sisteminin fiziksel yerleşiminden malzeme ve yarı mamul akışının sayısallaştırılmasına, süreç izlenebilirliğinden performans ve çevrim süresi analizlerine kadar uzanan çok katmanlı bir dönüşüm sürecini ortaya koymaktadır. Uygulamalar, üretim sahasında gerçekleşen faaliyetlerin yalnızca sonuç çıktıları üzerinden değil; süreç içi akışlar, kaynak kullanımı ve zaman boyutu dikkate alınarak analiz edilebilmesine imkân tanıyan bütüncül bir veri altyapısı oluşturmuştur.

Bu kapsamda geliştirilen ağırlık bazlı malzeme takibi, kart bazlı çevrim süresi ölçümleri ve üretim kayıtlarının dijitalleştirilmesi gibi uygulamalar; kalite ve performans göstergelerinin güvenilir, tutarlı ve karşılaştırılabilir veri setleri üzerinden değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Buna ek olarak, insan ve kritik ekipman takibine yönelik hazırlıklar ile dijital ikiz yaklaşımı, üretim performansını etkileyen değişkenlerin ilişkilendirilebilir hâle getirilmesine yönelik analitik bir çerçeve sunmaktadır.

Öte yandan, 5G destekli endüstriyel IoT altyapısına yönelik yürütülen çalışmalar, sahadan toplanan verilerin gerçek zamanlılık, süreklilik ve ölçeklenebilirlik gereksinimlerini karşılayabilecek bir iletişim katmanına hazırlık niteliği taşımaktadır. Bu yaklaşım, dijital dönüşüm uygulamalarının ilerleyen aşamalarda daha yüksek veri yoğunluğu ve analitik derinlik ile genişletilebilmesine olanak sağlayacak stratejik bir altyapı unsuru olarak değerlendirilmektedir.

Bu bölümde sunulan uygulamaların bir kısmı aktif olarak üretim ortamında kullanılmakta, bir kısmı ise geliştirme ve olgunlaştırma aşamasında bulunmaktadır. Bununla birlikte oluşturulan dijital altyapı; üretim performansının kalite odaklı, ölçülebilir ve veri temelli bir yaklaşımla analiz edilebilmesi için gerekli kurumsal zemini sağlamaktadır. Bir sonraki bölümde, bu altyapı üzerinden elde edilen veriler kullanılarak seçilen kalite ve performans göstergeleri nicel olarak incelenecek; dijital dönüşüm uygulamalarının bu göstergeler üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde değerlendirilecektir.

3.BÖLÜM

BULGULAR

Bu bölümde araştırma kapsamında elde edilen bulgular, dijital dönüşüm öncesi ve sonrası dönemlere ait performans göstergeleri üzerinden değerlendirilmektedir. İnceleme kapsamında öncelikle işletmenin genel performansındaki değişim ele alınmış, ardından üretim, kalite ve tedarik zinciri süreçleri ile ilişkili temel performans göstergelerinin zaman içerisindeki değişimi incelenmiştir.

Dijital dönüşüm uygulamalarının performans üzerindeki etkilerinin daha ayrıntılı olarak değerlendirilmesi amacıyla dönemsel karşılaştırmaların yanı sıra karşılaştırmalı trend ve regresyon analizlerinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda elde edilen bulgular; dijital dönüşüm öncesi ve sonrası genel performans karşılaştırması, başarı metriklerinin zaman içerisindeki değişimi ve karşılaştırmalı trend ve regresyon analizi başlıkları altında sunulmuştur.

3.1. DİJİTAL DÖNÜŞÜM ÖNCESİ VE SONRASI GENEL PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

Araştırmada dijital dönüşüm uygulamalarının işletme performansı üzerindeki etkileri, işletmenin kurumsal sistemlerinde düzenli olarak izlenen temel performans göstergeleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Performans göstergelerinin seçiminde dijital dönüşüm literatüründe öne çıkan operasyonel performans boyutları ile vaka işletmesinde düzenli olarak izlenen kalite ve operasyon göstergeleri birlikte dikkate alınmıştır. Böylece araştırmada dijital dönüşüm uygulamalarının işletme performansına olan etkilerinin kurumsal veriler üzerinden değerlendirilmesi amaçlanmıştır (Kagermann et al., 2013; Porter & Heppelmann, 2014).

Araştırmada kullanılan performans göstergeleri; kalite performansı, üretim performansı ve operasyonel çıktılar olmak üzere üç temel boyut altında ele alınmıştır.

Kalite performansının değerlendirilmesinde; genel hata oranı, iç ret oranı, müşteri iade oranı, Milyonda Hata Sayısı ve yeniden işleme oranı temel performans göstergeleri olarak kullanılmıştır. Ayrıca hata türlerinin süreç içerisindeki dağılımını ve iyileştirme önceliklerini belirlemek amacıyla Pareto analizlerinden yararlanılmıştır. Bu göstergeler,

dijital dönüşüm uygulamalarının ürün ve süreç kalitesi, süreç kararlılığı ve hata yönetimi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde temel ölçütleri oluşturmaktadır.

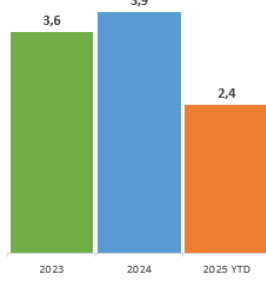
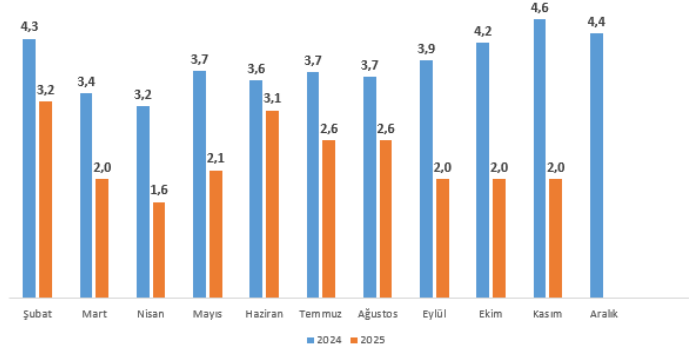
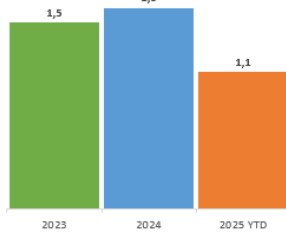
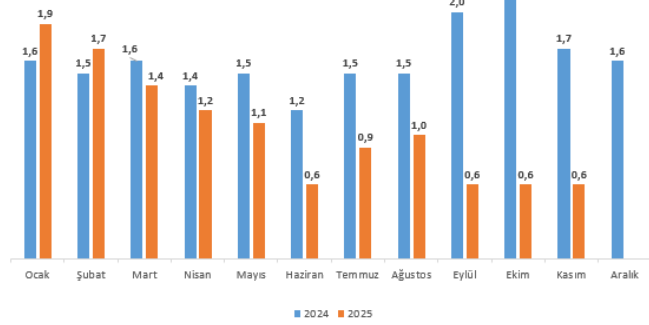
Üretim performansı boyutunda işletmenin üretim kapasitesindeki değişim değerlendirilmiştir. Üretim kapasitesi, dijital dönüşüm uygulamalarının üretim süreçlerine ilişkin operasyonel etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılan temel performans göstergelerinden biri olarak ele alınmıştır.

Operasyonel çıktıların değerlendirilmesinde ise müşteri geri bildirimleri, yeni müşteri kazanımı ve işletmenin farklı sektörlere yönelik üretim gerçekleştirebilme kabiliyeti dikkate alınmıştır. Bu kapsamda dijital dönüşüm sonrasında işletmenin savunma sanayi, otomotiv, tüketici elektroniği ve telekomünikasyon sektörlerine yönelik üretim faaliyetleri birlikte değerlendirilmiş; elde edilen bulgular işletmenin operasyonel performansındaki değişimlerle birlikte yorumlanmıştır. Yeni müşteri kazanımı ise dijital dönüşüm uygulamalarının tek başına doğrudan bir sonucu olarak değil, kalite performansı, üretim kapasitesi ve operasyonel süreçlerde gözlenen gelişmelerle birlikte değerlendirilen tamamlayıcı bir gösterge olarak ele alınmıştır.

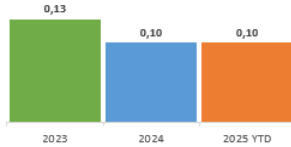
3.2. BAŞARI METRİKLERİNİN ZAMAN İÇİNDEKİ DEĞİŞİMİ

	ODUM											
	2024	2025.01	2025.02	2025.03	2025.04	2025.05	2025.06	2025.07	2025.08	2025.09	2025.10	2025.11
Genel	3,9	3,4	3,3	2,8	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4	2,4
<i>Tüketici elektr.</i>	3,4	2,5	2,3	2	1,8	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
<i>Savunma</i>	10,5	31,3	20,3	16,4	13,9	11,8	11,5	11,2	11,5	10,4	11,1	11,5
<i>Savunma Arge</i>	19,3	7,4	14,9	15,3	15,6	16,6	16,5	16,5	15,3	14,6	14,9	14,9
<i>Telekom 1</i>	17,4	47,4	30,8	21,7	17,6	15,1	14,2	12,9	11,6	6,4	6,1	5,6
<i>Otomotiv</i>	2,6	1,3	1	1	1	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,5	1,5
<i>Telekom 2</i>	16,6	13,1	15,1	15,2	14,4	15	15,7	16,6	16,8	15,8	8,5	15,8
	EMM											
	2024	2025.01	2025.02	2025.03	2025.04	2025.05	2025.06	2025.07	2025.08	2025.09	2025.10	2025.11
Genel	1,6	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1
<i>Tüketici elektr.</i>	1,7	2,2	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1,1
<i>Savunma</i>	1,8	3	4,5	3,7	3,5	3,6	3,3	3	3	2,4	2,3	2,3
<i>Savunma Arge</i>	2,8	1,1	2	2,1	2,5	2,3	2,3	2,4	2,3	2,2	2,02	1,9
<i>Telekom 1</i>	4,2	100	54,2	37,7	28,5	23,1	19,5	16,8	14,8	3,1	3,02	2,8
<i>Otomotiv</i>	1.802	1080	963	752	629	511	446	441	679	465	584	546
<i>Telekom</i>	4,1	2,7	2,3	2,5	2,2	1,8	1,5	1,5	1,4	1,6	1,5	1,5

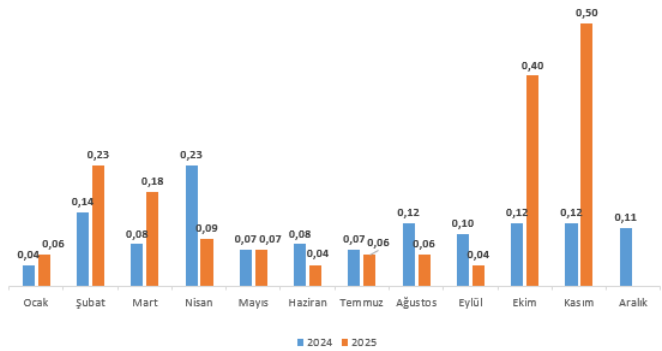
Şekil 6 - Kalite İç Ret Oranı

2025 Ytd**Aylık, 2024 vs. 2025****Grafik 1 - ODÜM, Genel Hata Oranı (%)****Yıllık, 2023-2025 Ytd****Aylık, 2024 vs. 2025****Grafik 2 - Elektromekanik Üretim, Genel Hata Oranı (%)**

Yıllık, 2023-2025 Ytd



Aylık, 2024 vs. 2025



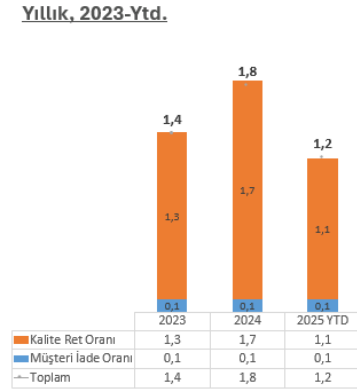
Grafik 3 - Elektromekanik Üretim, Müşteri İade Oranı (%)

Bu bölümde yer alan grafikler, ODĞM ve elektromekanik üretim hatlarını kapsayan genel üretim yapısında dijital dönüşüm uygulamalarının performans göstergeleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Grafikler incelendiğinde, özellikle dijital izlenebilirliğin artırılması ve üretim kayıtlarının sistematik biçimde toplanması sonrasında, üretim süreçlerinde daha dengeli ve öngörülebilir bir performans yapısına geçildiği görülmektedir.

ODÜM ve elektromekanik üretim hatlarında, dijital dönüşüm öncesi dönemde gözlenen dalgalı performans yapısının, uygulama sonrası dönemde belirgin biçimde azaldığı dikkat çekmektedir. Bu durum, üretim planlama doğruluğunun artması, malzeme-üretim entegrasyonunun güçlenmesi ve operasyonel belirsizliklerin azaltılması ile ilişkilendirilmektedir. Grafiklerdeki genel eğilim, yeniden işleme oranlarının düşüşü ve üretim sürelerinin daha kontrollü hale gelmesi yönündedir.

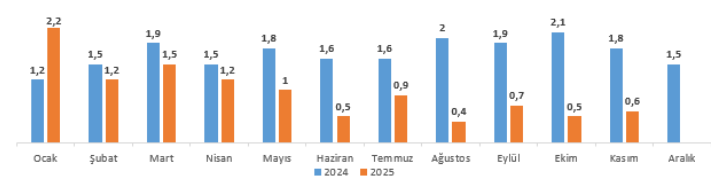
Ayrıca, üretim süreçlerine ilişkin verilerin anlık olarak izlenebilir hâle gelmesi, yönetim seviyesinde daha hızlı ve veri temelli karar alınmasını mümkün kılmıştır. Bu bağlamda genel üretim yapısına ilişkin grafikler, dijital dönüşümün yalnızca belirli hatlarda değil, tüm üretim ekosisteminde performans istikrarı yarattığını göstermektedir.

Tüketici Elektronik:



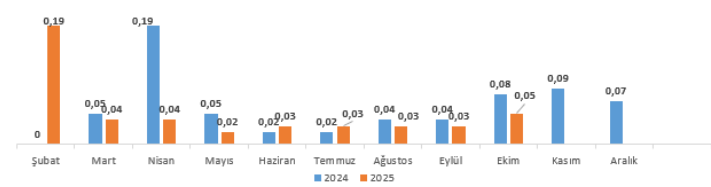
Kalite Ret Oranı

Aylık, 2024 vs. 2025, %



Müşteri İade Oranı

Aylık, 2024 vs. 2025, %



Grafik 4 - EUM (Tüketici Elektronik), Kalite Performansı

2024

Hata Tanımı	Adet	%
Hasarlı Mlz	1507	19
İşleyiş/Proses Hatası	1282	16
Etiket Hatası	857	11
Havada Mlz	817	11
Arızalı Mlz	326	4
Gruplama Hatası	317	4
Yetersiz Lehim	310	4
ECO Uygulama Hatası	272	3
Pad Kalkması	210	3
Mlz Bacağı Uzun/Kısa	205	3
Hatalı Montaj	202	3
Diğer (24 farklı hata)	1474	19
Toplam	7.779	100

2025 Ocak-Kasım

Hata Tanımı	Adet	%
Hasarlı/Darbeli Malzeme	799	21
Etiket Hatası	576	15
İşleyiş/Proses Hatası	488	13
ECO Uygulama Hatası	389	10
Havada Malzeme	331	9
Hatalı/Arızalı Malzeme	184	5
Yetersiz Lehim	123	3
Kaplama Uygulama Hatası	109	3
Gruplama Hatası	103	3
Diğer (22 farklı hata)	684	18
Toplam	3747	100

Tablo 8 - EUM (Tüketici Elektronik), Kalite Ret Hata Pareto Analizi

2024

Hata Tanımı	Adet	%
Hasarlı Mlz	1059	29
Arızalı Mlz	706	20
Fonksiyon Hatası	675	19
NFF	126	3
Hasarlı/Darbeli Malzeme	87	2
Mlz Yönü Ters	85	2
Lehimsiz	74	2
ECO Uygulama Hatası	70	2
Diğer(30 farklı hata)	726	20
Toplam	3.608	100

2025 Ocak-Ekim

*Kasım ayı müşteri iade oranları müşteri tarafından henüz yayınlanmamıştır. Ekim ayına kadar olan verilerdir.

Hata Tanımı	Adet	%
Hasarlı/Darbeli Malzeme	882	50
Hatalı/Arızalı Malzeme	410	23
Soguk/Çatlak Lehim	74	4
Hata bulunamadı/Hata yok	60	3
Diğer(25 farklı hata)	344	19
Toplam	1.770	100

Tablo 9 - EUM (Tüketici Elektroniği), Müşteri İade Hata Pareto Analizi

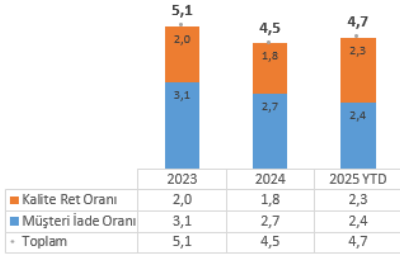
Tüketici elektroniği (EUM) üretimine ilişkin grafikler, yüksek hacimli ve kısa ürün yaşam döngüsüne sahip üretim ortamlarında dijital dönüşüm uygulamalarının etkilerini açık biçimde yansıtmaktadır. Grafiklerde, dijital uygulamaların devreye alınmasıyla birlikte üretim performansında daha hızlı toparlanma ve istikrar sağlandığı gözlemlenmektedir.

Özellikle yeniden işleme oranları ve kalite kaynaklı duruşlara ilişkin göstergelerde, uygulama sonrası dönemde aşağı yönlü bir eğilim dikkat çekmektedir. Bu durum, üretim süreçlerinde operatör bazlı veri toplama, iş emri takibi ve kalite kayıtlarının dijital ortamda bütünleştirilmesi ile ilişkilendirilmektedir. Tüketici elektroniğinde sık yaşanan ürün varyasyonu ve hızlı model değişimleri dikkate alındığında, bu iyileşme dijital dönüşümün çeviklik kazandırıcı etkisini ortaya koymaktadır.

Grafikler ayrıca, üretim planlama ile fiili gerçekleştirmeler arasındaki farkın zaman içinde azaldığını göstermektedir. Bu bulgu, EUM üretiminde dijital dönüşümün teslimat performansı ve müşteri memnuniyeti üzerinde dolaylı fakat anlamlı bir katkı sunduğunu göstermektedir.

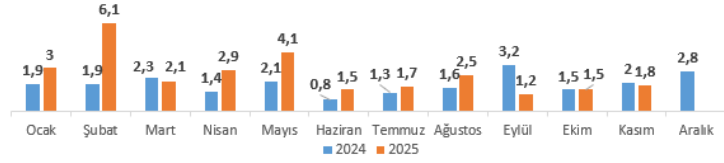
Savunma:

Yıllık, 2023-Ytd.



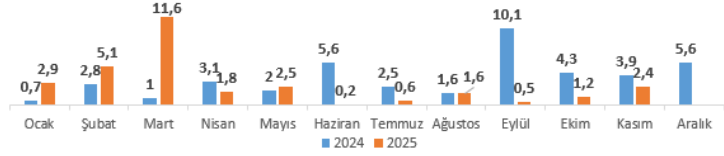
Kalite Ret Oranı

Aylık, 2024 vs. 2025, %



Müşteri İade Oranı

Aylık, 2024 vs. 2025, %



Grafik 5 - Savunma, Kalite Performans %

2024

Hata Tanımı	Adet	%
İşleyiş/Proses hatası	531	20
Etiket Hatası	383	14
Hasarlı/Darbeli Malzeme	314	12
Hatalı Montaj	275	10
Ürün Dokümanı Uygulanmamış/Eksik Uygulanmış	222	8
Eksik Malzeme	173	6
Kimyasal Uygulama Hatası	130	5
Hatalı/Eksik Sevk Donanımı	125	5
Diğer (25 farklı hata)	546	20
Toplam	2699	100

2025 Ocak-Kasım

Hata Tanımı	Adet	%
İşleyiş/Proses hatası	1581	36
Ürün Dokümanı Uygulanmamış/Eksik Uygulanmış	468	11
Hatalı Montaj	425	10
Etiket Hatası	432	10
Hatalı/Eksik Sevk Donanımı	301	7
Eksik Malzeme	257	6
Diğer (24 farklı hata)	874	20
Toplam	4343	100

Tablo 10 - Savunma, Kalite Ret Hata Pareto Analizi

2024

Hata Tanımı	Adet	%
İşleyiş/Proses hatası	964	36
Ürün Dokümanı Uygulanmamış/Eksik Uygulanmış	351	13
Etiket Hatası	312	12
Hatalı Montaj	247	9
Hatalı/Eksik Sevki Donanımı	234	9
Diğer(22 farklı hata)	578	21
Toplam	2686	100

2025 Ocak-Kasım

Hata Tanımı	Adet	%
Fonksiyon Hatası	773	48
Hatalı/Arızalı Malzeme	271	17
Yetersiz Lehim	182	11
Eksik Malzeme	120	7
Diğer(18 farklı hata)	272	17
Toplam	1618	100

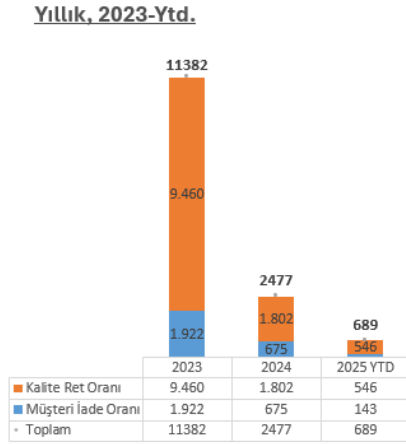
Tablo 11 - Savunma, Müşteri İade Hata Pareto Analizi

Savunma sanayiine yönelik üretim hatlarına ait grafikler, dijital dönüşümün kalite, izlenebilirlik ve süreç disiplini üzerindeki etkilerini ön plana çıkarmaktadır. Grafikler incelendiğinde, üretim hacmi görece düşük olmasına rağmen, performans göstergelerinin yüksek stabilite gösterdiği dikkat çekmektedir.

Savunma üretiminde yeniden işleme oranlarının ve kalite sapmalarının sınırlı bir bant içerisinde seyrettiği görülmektedir. Bu durum, savunma sanayiine özgü regülasyonlar, sıkı kalite gereksinimleri ve dijital izlenebilirlik altyapısının etkin kullanımı ile açıklanabilir. Dijital dönüşüm uygulamaları sayesinde, üretim süreçlerinde oluşabilecek sapmalar erken aşamada tespit edilerek düzeltici aksiyonlar hızlı biçimde devreye alınabilmektedir.

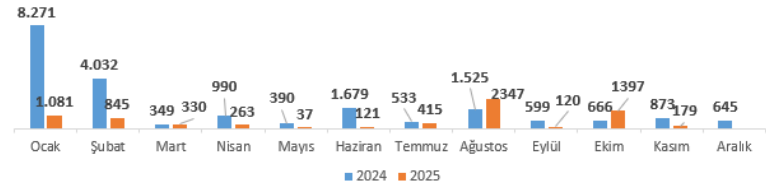
Grafiklerdeki düşük varyanslı yapı, savunma sanayii üretiminde dijital dönüşümün temel katkısının hızdan ziyade güvenilirlik, izlenebilirlik ve kayıt bütünlüğü olduğunu göstermektedir. Bu yönüyle savunma üretimi, dijital dönüşümün kalite odaklı etkilerinin en net gözlemlendiği alanlardan biri olarak değerlendirilebilir.

Otomotiv:



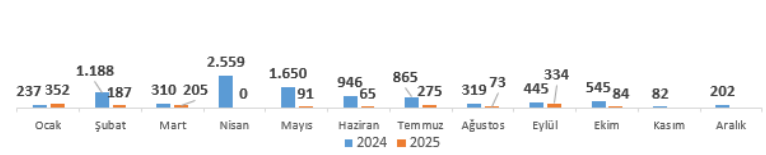
Kalite Ret Oranı

Aylık, 2024 vs. 2025, %



Müşteri İade Oranı

Aylık, 2024 vs. 2025, %



Şekil 7 - Otomotiv, Kalite Performans Milyonda Hata Sayısı

2024

Hata Tanımı	Adet	%
Kaplama Uygulama Hatası	122	36
Hasarlı/Darbeli Malzeme	91	27
Gruplama Hatası	57	17
Diğer(16 farklı hata)	73	20
Toplam	343	100

2025 Ocak- Kasım

Hata Tanımı	Adet	%
Hasarlı/Darbeli Malzeme	41	32
İşleyiş/proses Hatası	28	22
Pad Kalkması	13	10
Lehim Topu	10	8
Hatalı Montaj	9	7
Hatalı/Arızalı Malzeme	5	4
Diğer(14 farklı hata)	24	19
Toplam	130	100

Tablo 12 - Otomotiv, Kalite Ret Hata Pareto Analizi

2024

Hata Tanımı	Adet	%
Eski yazılımlı kart	13	12
Normalizasyon hatası	12	11
Görüntü açılmıyor	10	10
Router kesim sonrası pcb ölçü uygunsuzluğu	10	10
Buton hasarlı	8	8
Buton çalışmaması	7	7
Görüntü kesik ve karışık renkli	5	5
Kızak hatası	5	5
Aydınlatma ışığı yanmıyor	4	4
Ekran gidip geliyor.	4	4
Bulanık görüntü	3	3
Lens düşme problemi	3	3
Diğer(18 farklı hata)	21	20
Toplam	105	100

2025 Ocak- Kasım

Hata Tanımı	Adet	%
Butonlar takılı kalıyor	4	13
Koltuk fonksiyonları çalışmıyor	4	13
Bagaj açma kapatma çalışmıyor	3	10
Kamera görüntüsü bulanık	3	10
Lens düşme problemi	3	10
Normalizasyon yarıda kalıyor	2	7
Kamera görüntüsü yok	2	7
Yazılım eski	1	3
Arka koltuk ısıtıcı çalışmıyor	1	3
Parça kalibre olmuyor	1	3
Diğer(18 farklı hata)	6	20
Toplam	30	100

Tablo 13 - Otomotiv, Müşteri İade Hata Pareto Analizi

Otomotiv sektörüne yönelik üretim grafiklerinde, dijital dönüşüm uygulamalarının süreç standardizasyonu ve performans sürekliliği üzerindeki etkileri belirgin biçimde izlenmektedir. Grafikler, özellikle üretim adetleri ve kalite göstergeleri açısından daha düşük sapma ve daha öngörülebilir bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

Otomotiv üretiminde, seri üretim yapısı ve yüksek standart gereksinimleri nedeniyle küçük performans sapmalarının dahi önemli sonuçlar doğurabildiği bilinmektedir. Grafiklerde, dijital dönüşüm sonrası dönemde yeniden işleme oranlarının sınırlı bir bantta tutulduğu ve süreçlerin kontrol altında yürütüldüğü görülmektedir. Bu durum, dijital izleme ve anlık raporlama mekanizmalarının etkin kullanımı ile ilişkilendirilmektedir.

Ayrıca, otomotiv üretiminde tedarik zinciri entegrasyonunun güçlenmesi, üretim planlarının daha gerçekçi biçimde oluşturulmasına katkı sağlamıştır. Grafikler, dijital dönüşümün otomotiv sektöründe kalite ve teslimat performansını birlikte destekleyen bir araç olarak konumlandığını göstermektedir.

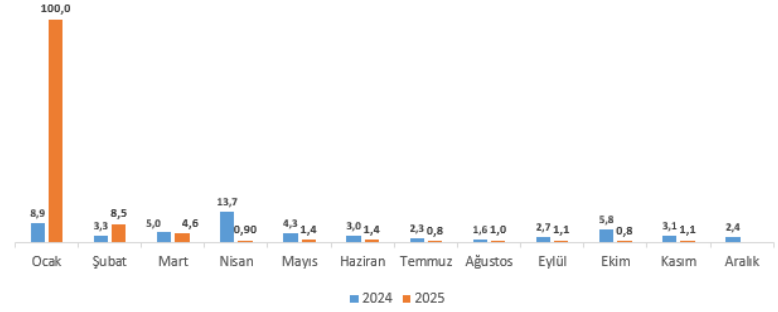
Telekomünikasyon:

Yıllık, 2023-Utd.

	2023	2024	2025 YTD
Kalite Ret Oranı	5,0	4,2	3,0
Müşteri İade Oranı	0	0	0
* Toplam	5,0	4,2	3,0

Müşteri iadesi bulunmamaktadır.

Aylık, 2024 vs. 2025



Grafik 6 - Telekomünikasyon, Kalite Performans %

2024

Hata Tanımı	Adet	%
Hatalı Montaj	178	24
Eksik Malzeme	145	19
Hasarlı/Darbeli Malzeme	112	15
ECO Uygulama Hatası	106	14
Kötü Görünüm	96	13
Diğer(11 farklı hata)	120	16
Toplam	757	100

2025 Ocak- Kasım

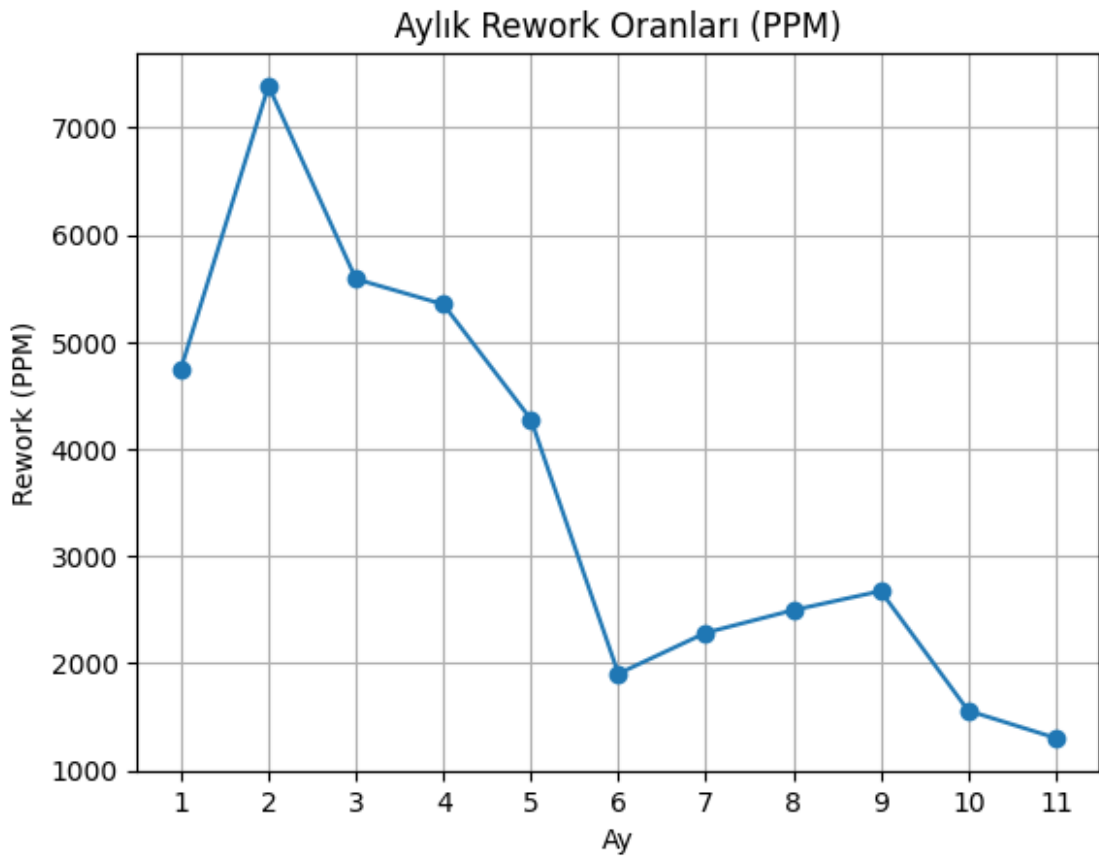
Hata Tanımı	Adet	%
Eksik Malzeme	97	23
Hasarlı/Darbeli Malzeme	79	19
Hatalı Montaj	78	19
Kötü Görünüm	39	9
Havada Malzeme	38	9
Diğer(10 farklı hata)	87	21
Toplam	418	100

Tablo 14 - Telekomünikasyon, Kalite Ret Hata Pareto Analizi

Telekomünikasyon üretimine ilişkin grafikler, ürün çeşitliliği ve proje bazlı üretim yapısının dijital dönüşüm uygulamalarıyla daha yönetilebilir hâle geldiğini göstermektedir. Grafiklerde, üretim performansının zaman içerisinde daha dengeli bir seyir izlediği ve ani saptmaların azaldığı gözlemlenmektedir.

Telekomünikasyon projelerinde sık karşılaşılan mühendislik değişiklikleri ve konfigürasyon farklılıkları, dijital dönüşüm öncesi dönemde üretim performansında dalgalanmalara neden olabilmektedir. Grafiklerde dijital dönüşüm sonrası dönemde bu dalgalanmaların azalması, sistem entegrasyonu ve üretim kayıtlarının merkezi olarak yönetilmesi ile ilişkilendirilmektedir.

Özellikle kalite ve yeniden işleme göstergelerine bakıldığında, telekomünikasyon üretiminde dijital dönüşümün süreç şeffaflığını artırarak hata tekrarlarını azalttığı görülmektedir. Bu bulgular, telekomünikasyon üretiminde dijital dönüşümün proje bazlı üretim yapısına önemli bir operasyonel disiplin kazandırdığını göstermektedir.



Grafik 7 - PERFORMANS GÖSTERGELERİ - yeniden işleme oranları

Performans metrikleri içerisinde özellikle yeniden işleme oranlarının (yeniden işleme – Milyonda Hata Sayısı) zamansal değişimi, dijital dönüşüm uygulamalarının kalite performansı üzerindeki etkisini somut biçimde ortaya koymaktadır. Aylık bazda izlenen

yeniden işleme verileri, ölçüm döneminin ilk aylarında yüksek ve dalgalı bir seyir izlerken, dijital izlenebilirlik altyapılarının devreye alınması ve süreç içi kontrol mekanizmalarının etkinleştirilmesi sonrasında belirgin ve sürdürülebilir bir düşüş eğilimi göstermiştir. Özellikle üretim süreçlerinden gerçek zamanlı veri toplanması, malzeme ve yarı mamul hareketlerinin izlenebilir hale gelmesi ve hataların olduğu noktaların daha hızlı tespit edilebilmesi, yeniden işleme ihtiyacını sistematik olarak azaltmıştır. Yeniden işleme oranlarında yılın ilerleyen dönemlerinde gözlemlenen bu iyileşme, dijital dönüşümün yalnızca hata tespitine değil, aynı zamanda süreç öğrenmesi ve kalite disiplininin kurumsallaşmasına katkı sağladığını göstermektedir. Bu bulgu, dijitalleşme yatırımlarının kalite maliyetlerini düşürme ve üretim sisteminde istikrarlı bir kalite seviyesi oluşturma açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

3.3. KARŞILAŞTIRMALI TREND VE REGRESYON ANALİZİ

Dijital dönüşüm uygulamalarının kalite performansı üzerindeki etkilerini daha güçlü biçimde değerlendirebilmek amacıyla, önceki bölümlerde sunulan öncesi-sonrası karşılaştırmalar bu bölümde trend ve regresyon analizi ile desteklenmiştir. Araştırmada 2023 ve 2024 yılları dijital dönüşüm öncesindeki performans eğiliminin değerlendirilmesinde, 2025 yılı ise dijital dönüşüm uygulamalarının üretim ve kalite süreçlerine yansımalarının gözlemlendiği dönüşüm sonrası değerlendirme dönemi olarak ele alınmıştır. Çalışmada 2026 yılına ait performans verisi bulunmadığından analiz 2023-2025 dönemiyle sınırlandırılmıştır. 2025 yılı verileri tam yılı kapsamadığı durumlarda YTD olarak gösterilmiştir.

Yıllık gözlem sayısının klasik kesintili zaman serisi analizi için yeterli olmaması nedeniyle, yıllık değerler karşılaştırmalı trend analizi kapsamında değerlendirilmiştir. Aylık verinin bulunduğu kalite göstergelerinde ise 2024 ve 2025 gözlemleri kullanılarak segmentli doğrusal regresyon uygulanmıştır. Modelde zaman eğilimi, 2025 dönüşüm sonrası dönemini temsil eden kukla değişken ve dönüşüm sonrası eğilim değişimi birlikte değerlendirilmiştir. Dijital dönüşüm uygulamalarının aşamalı biçimde devreye alınmış olması nedeniyle regresyon sonuçları doğrudan nedensellik kanıtı olarak değil, dönüşüm sonrası dönemde gözlenen performans farklılaşmasını destekleyen tamamlayıcı istatistiksel bulgular olarak yorumlanmıştır. Aylık verilerde ortaya çıkabilecek

otokorelasyon ve değişen varyansın standart hata tahminleri üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla Newey-West sağlam standart hataları kullanılmıştır (Newey & West, 1987).

Tablo 15: Temel Kalite Göstergelerinin 2023-2025 Dönemindeki Değişimi

Gösterge	2023	2024	2025 YTD	2023-2024	2024-2025 YTD
ODÜM Genel Hata (%)	3,58	3,90	2,40	+%8,9	-%38,5
Elektromekanik Kalite Ret (%)	1,50	1,62	1,10	+%7,8	-%32,0
Tüketici Elektronik Kalite Ret (%)	1,30	1,70	1,10	+%30,8	-%35,3
Tüketici Elektronik Müşteri İade (%)	0,10	0,10	0,10	%0,0	%0,0
Savunma Kalite Ret (%)	2,00	1,80	2,30	-%10,0	+%27,8
Savunma Müşteri İade (%)	3,10	2,70	2,40	-%12,9	-%11,1
Otomotiv Kalite Ret	9.460	1.802	546	-%81,0	-%69,7
Otomotiv Müşteri İade	1.922	675	143	-%64,9	-%78,8
Telekomünikasyon Kalite Ret (%)	3,29	4,08	1,60	+%24,0	-%60,8

Tablo 15 incelendiğinde, ODÜM genel hata oranı, elektromekanik kalite ret oranı, tüketici elektronik kalite ret oranı ve telekomünikasyon kalite ret oranında 2023-2024 dönemindeki kötüleşme veya sınırlı kötüleşmenin ardından 2025 YTD döneminde belirgin bir iyileşme ortaya çıktığı görülmektedir. Otomotiv sektöründe kalite ret ve müşteri iade göstergeleri güçlü biçimde gerilemiş olmakla birlikte, bu iyileşmenin 2023-2024 döneminde de başlamış olması 2025 yılındaki değişimin tamamının dijital dönüşüme bağlanmasını sınırlandırmaktadır. Savunma sektöründe ise kalite ret oranı 2025 YTD döneminde yükselirken müşteri iade oranındaki azalış devam etmiştir. Bu nedenle yıllık sonuçlar, aylık regresyon bulgularıyla birlikte değerlendirilmiştir.

Tablo 16: Aylık Kalite Göstergelerine İlişkin Regresyon Bulgularının Özeti

Gösterge	Düzye Değişimi (β_2)	p	Eğilim Değişimi (β_3)	p	Değerlendirme
ODÜM Genel Hata (%)	-1,635	0,002	-0,133	0,073	2025'e geçişte anlamlı düzey düşüşü
Elektromekanik Kalite Ret (%)	0,026	0,913	-0,159	<0,001	Dönem içinde anlamlı iyileşme eğilimi
Elektromekanik Müşteri İade (%)	-0,087	0,381	0,020	0,269	Anlamlı değişim yok
Tüketici Elektronik Kalite Ret (%)	-0,107	0,730	-0,170	<0,001	Dönem içinde anlamlı iyileşme eğilimi
Tüketici Elektronik Müşteri İade (%)	0,044	0,406	-0,012	0,190	Anlamlı değişim yok
Savunma Kalite Ret (%)	2,081	<0,001	-0,322	<0,001	Başlangıçta artış, ardından toparlanma
Savunma Müşteri İade (%)	-0,169	0,929	-0,899	0,002	Anlamlı iyileşme eğilimi
Otomotiv Kalite Ret	959,246	0,269	398,555	0,095	%5 düzeyinde anlamlı değil
Otomotiv Müşteri İade	-122,126	0,620	74,062	0,218	%5 düzeyinde anlamlı değil
Telekomünikasyon Kalite Ret (%)	-4,433	<0,001	-0,871	<0,001	Anlamlı düzey ve eğilim iyileşmesi

Regresyon sonuçları genel üretim açısından değerlendirildiğinde, ODÜM genel hata oranında 2025 dönüşüm sonrası dönemine geçişle birlikte anlamlı bir düzey düşüşü belirlenmiştir ($\beta_2=-1,635$; $p=0,002$). Elektromekanik kalite ret oranında ise başlangıç düzeyi değişimi anlamlı olmamakla birlikte, 2025 dönemi boyunca aşağı yönlü eğilim

istatistiksel olarak anlamlıdır ($\beta_3=-0,159$; $p<0,001$). Buna karşılık elektromekanik müşteri iade oranında anlamlı bir değişim bulunmamıştır. Bu durum, dijital dönüşüm sonrası dönemde işletme içi kalite performansındaki gelişmenin müşteri iade göstergesine aynı ölçüde yansımadığını göstermektedir.

Sektörel sonuçlarda tüketici elektroniği kalite ret oranında anlamlı bir iyileşme eğilimi belirlenmiştir ($\beta_3=-0,170$; $p<0,001$); müşteri iade oranında ise anlamlı bir değişim görülmemiştir. Savunma sektöründe kalite ret oranı 2025 döneminin başlangıcında yükselmiş, ancak dönem ilerledikçe anlamlı bir toparlanma eğilimi göstermiştir ($\beta_3=-0,322$; $p<0,001$). Savunma müşteri iade oranında da eğilim değişiminin negatif ve anlamlı olması ($\beta_3=-0,899$; $p=0,002$), dönem içinde iyileşmeye işaret etmektedir. Bununla birlikte 2025 YTD kalite ret oranının 2024 seviyesinin üzerinde kalması nedeniyle savunma sektörü için genel ve homojen bir iyileşme sonucuna ulaşılmamıştır.

Otomotiv sektöründe yıllık kalite ret ve müşteri iade göstergelerinde çok güçlü sayısal düşüşler görülmesine rağmen regresyon katsayıları %5 anlamlılık düzeyine ulaşmamıştır. Bu sonuç, iyileşmenin 2023-2024 döneminde başlamış olması ve aylık Milyonda Hata Sayısı değerlerindeki yüksek değişkenlikle birlikte değerlendirilmiştir. Telekomünikasyon sektöründe ise 2024 yılında kötüleşen kalite ret performansının 2025 döneminde belirgin biçimde tersine döndüğü; hem düzey hem de eğilim değişiminin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($\beta_2=-4,433$; $\beta_3=-0,871$; $p<0,001$). Telekomünikasyon için 2025 yılı Eylül ayı ve sonrasında veri bulunmadığından bu dönemde grafikte görülen sıfır değerler analize dahil edilmemiştir.

Bütünleşik olarak değerlendirildiğinde, dijital dönüşüm sonrası performans değişimlerinin sektörler ve göstergeler arasında aynı biçimde gerçekleşmediği görülmektedir. Genel üretim, tüketici elektroniği ve telekomünikasyon kalite göstergelerinde 2025 döneminde istatistiksel olarak desteklenen iyileşmeler bulunurken, savunma sektöründe sonuçlar dönem içindeki toparlanmaya, otomotiv sektöründe ise güçlü fakat regresyonla %5 düzeyinde doğrulanmayan betimsel iyileşmeye işaret etmektedir. Bu bulgular dijital dönüşüm uygulamalarının devreye alınmasını izleyen dönemde kalite performansındaki bazı gelişmelerin istatistiksel olarak desteklendiğini

göstermektedir. Bununla birlikte tek vaka tasarımı, kontrol grubunun bulunmaması, uygulamaların aşamalı devreye alınması ve 2025 verilerinin tam yılı kapsamaması nedeniyle sonuçlar doğrudan nedensellik şeklinde yorumlanmamalıdır.

SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu tez çalışması, dijital dönüşümün elektronik üretim sektöründeki etkilerini; kavramsal çerçeve, literatür bulguları ve uygulamaya dayalı bir vaka çalışması üzerinden bütüncül bir yaklaşımla ele almıştır. Dijital dönüşüm, çalışma kapsamında yalnızca yeni teknolojilerin üretim ortamına entegrasyonu olarak değil; üretim süreçlerinin, tedarik zinciri yönetiminin ve kalite anlayışının veri temelli, izlenebilir ve bütünleşik bir yapıya evrilmesi olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, dijitalleşmenin işletme performansı üzerindeki etkilerinin daha sağlıklı ve ölçülebilir biçimde analiz edilmesine olanak sağlamıştır.

Tezin teorik bölümlerinde, dijital dönüşümün Endüstri 4.0'dan Endüstri 5.0'a uzanan evrimi ele alınmış; dünyadaki ve Türkiye'deki dijitalleşme eğilimleri elektronik üretim sektörü bağlamında değerlendirilmiştir. Literatür taraması sonuçları, 5G, endüstriyel IoT ve Yapay Zeka teknolojilerinin üretim sistemlerinde verimlilik, esneklik ve izlenebilirlik sağladığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin operasyonel performans göstergeleriyle doğrudan ilişkilendirildiği uygulamaya dayalı çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Bu durum, çalışmanın performans metrikleri ve saha verileri üzerinden ilerleyen yaklaşımını literatür açısından anlamlı kılmaktadır.

Elektronik üretim sektörüne yönelik yapılan sektörel değerlendirme, otomotiv, savunma ve tüketici elektroniği gibi alt sektörlerde dijital dönüşüm önceliklerinin farklılaştığını göstermiştir. Savunma ve otomotiv sektörlerinde kalite güvencesi, izlenebilirlik ve süreç güvenilirliği ön plana çıkarken; tüketici elektroniğinde hız, maliyet ve teslim performansı daha belirleyici unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Bu farklılaşma, dijital dönüşüm stratejilerinin sektör ve ürün karakteristiğine uygun biçimde ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tezin uygulama bölümünde ele alınan XYZ firması örneği, yüksek karışım–orta hacim üretim yapısına sahip, otomasyon ve insan etkileşimini birlikte barındıran hibrit bir elektronik üretim ortamını temsil etmektedir. Yapılan gözlemler ve süreç modellemeleri; üretim sisteminin teknik açıdan gelişmiş olmakla birlikte operasyonel karmaşıklığının yüksek olduğunu göstermiştir. Tam otomatik dizgi hatları yüksek hız ve tekrarlanabilirlik sağlarken, yarı otomatik ve manuel süreçlerde insan faktörü kalite, çevrim süresi ve esneklik açısından belirleyici bir rol üstlenmektedir. Bu yapı, dijital destek mekanizmalarını ve veri temelli yönetim yaklaşımlarını zorunlu kılmaktadır.

Bu ihtiyaçlardan hareketle ele alınan dijital dönüşüm uygulamaları; üretim alanı yerleşiminin yeniden tasarlanmasından depo–üretim entegrasyonuna, izlenebilirlik altyapılarından performans ve akış takibine, dijital ikiz ve analitik hazırlıklara kadar uzanan çok katmanlı bir dönüşüm sürecini ortaya koymuştur. Dijital dönüşüm, yalnızca yazılım veya otomasyon yatırımlarıyla sınırlı tutulmamış; fiziksel üretim sistemi ve bilgi akışı birlikte ele alınarak operasyonel performansı destekleyen bir altyapı oluşturulmuştur.

Performans metrikleri analizi sonuçları, dijital dönüşüm uygulamalarının kalite, operasyon ve lojistik boyutlarında ölçülebilir iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Kalite performansına ilişkin bulgular; iç ret oranları, müşteri iade oranları ve hata pareto analizlerinde iyileşme eğilimleri olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, dijital izlenebilirlik ve süreç içi kontrol mekanizmalarının, hataların müşteri aşamasına ulaşmadan önce tespit edilmesini kolaylaştırdığını göstermektedir. Operasyonel açıdan rota ve planlama doğruluğu incelendiğinde, fiili üretim süreleri ile planlanan süreler arasındaki sapmaların daha görünür ve yönetilebilir hale geldiği görülmektedir. Sevkiyat performansına ilişkin analizler ise üretim–lojistik entegrasyonunun güçlendiğini ve teslim kabiliyetinin daha dengeli bir yapıya kavuştuğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmanın bulguları, dijital dönüşümün etkilerinin yalnızca iç operasyonel göstergelerle sınırlı kalmadığını; firmanın pazardaki konumlanması ve müşteri portföyü üzerinde de belirleyici sonuçlar doğurduğunu göstermektedir. Üretim süreçlerinde sağlanan izlenebilirlik, kalite güvencesi ve veri temelli performans yönetimi; özellikle yüksek

güvenilirlik ve süreklilik gerektiren otomotiv ve savunma sanayii müşterileri açısından firmayı daha güçlü ve tercih edilir bir iş ortağı konumuna taşımıştır. Bu bağlamda dijital dönüşüm, operasyonel iyileştirmelerin ötesinde, müşteri kazanımı ve stratejik büyümeyi destekleyen bir rekabet unsuru olarak gözlenmiştir.

Uygulama çıktıları birlikte değerlendirildiğinde, dijital dönüşüm sayesinde üretim kapasitesinin daha öngörülebilir ve ölçeklenebilir bir yapıya kavuştuğu görülmektedir. Bu yapı, firmanın mevcut iş hacmini yönetebilmesinin yanı sıra, otomotiv ve savunma sanayii gibi yüksek gereksinimli sektörlerden gelen yeni projeleri üretim sistemine entegre edebilmesini mümkün kılmıştır. Bu gelişmeler doğrultusunda, 2026 yılı itibarıyla üretim adetlerinde anlamlı bir artış öngörülmekte; dijital dönüşümün firmanın sürdürülebilir büyüme hedeflerine doğrudan katkı sağlayan stratejik bir kaldıraç olduğu değerlendirilmektedir.

Bu tez kapsamında elde edilen bulgular, yönetsel açıdan değerlendirildiğinde, veri temelli karar alma mekanizmalarının işletme yönetimi içerisinde sistematik ve bütünlük bir biçimde konumlandırılmasının önemini açık biçimde ortaya koymaktadır. Çalışma süresince analiz edilen performans metrikleri ve süreç verileri, yöneticilerin operasyonel faaliyetleri daha şeffaf, izlenebilir ve karşılaştırılabilir bir çerçevede değerlendirebilmesine imkân tanımış; bu durumun karar alma süreçlerinin etkinliğini arttırdığı görülmüştür. Bu doğrultuda, dijital dönüşüm uygulamalarının yalnızca teknik bir iyileştirme alanı olarak değil, işletme yönetiminin karar destek altyapısını güçlendiren bir unsur olarak ele alınması gerektiği değerlendirilmektedir.

Endüstriyel açıdan değerlendirildiğinde, çalışma kapsamında ele alınan uygulamalar; üretim, kalite ve lojistik süreçlerinin veri temelli ve entegre bir yapı içerisinde yönetilmesinin operasyonel performans üzerindeki etkilerini somut biçimde ortaya koymaktadır. Süreçler arası bilgi akışının güçlendirilmesi, izlenebilirlik düzeyinin artırılması ve performansın ölçülebilir hale getirilmesi sayesinde, operasyonel faaliyetlerin daha kontrollü ve öngörülebilir bir yapıya kavuştuğu görülmüştür. Bu çerçevede, dijital dönüşümün üretim sistemleri içerisinde bütüncül bir yaklaşımla ele

alınmasının, operasyonel iyileşmelerin sürekliliği açısından belirleyici olduğu değerlendirilmektedir.

Bu tez, dijital dönüşümün performans metrikleri ve saha verileri üzerinden değerlendirilmesine yönelik uygulama temelli bir yaklaşım sunmaktadır. Literatürde çoğunlukla kavramsal düzeyde ele alınan dijital dönüşüm olgusunun, gerçek bir üretim ortamına ait veriler ve ölçülebilir göstergeler aracılığıyla analiz edilmesi, çalışmanın özgün katkısını oluşturmaktadır. Bu yönüyle araştırma, dijital dönüşümün etkilerinin ampirik olarak ölçülmesi ve yorumlanmasına imkân sağlayarak benzer çalışmalar için referans niteliği taşımaktadır.

Elde edilen bulgular, veri odaklı dijital dönüşüm yaklaşımının tedarik yönetimi süreçlerine entegrasyonu açısından yeni araştırma alanları ortaya koymaktadır. Özellikle tedarikçi seçimi, tedarikçi performansının çok boyutlu metriklerle değerlendirilmesi ve veri temelli karar destek mekanizmalarının geliştirilmesine yönelik çalışmaların, mevcut bulguların derinleştirilmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak akademik çalışmaların, dijitalleşme ile birlikte giderek karmaşıklaşan tedarik zinciri yapılarının daha etkin, esnek ve veri odaklı biçimde yönetilmesine katkı sunması beklenmektedir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması; dijital dönüşümün elektronik üretim sektöründeki etkilerini kavramsal çerçeve, literatür bulguları ve uygulama çıktıları doğrultusunda bütüncül bir yaklaşımla ele alarak değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, dijital dönüşümün işletmeler açısından yalnızca teknolojik bir gereklilik olmadığını; süreçlerin izlenebilirliği, performansın ölçülebilirliği ve karar alma mekanizmalarının etkinliği açısından belirleyici bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda dijital dönüşümün, işletmelerin operasyonel sürdürülebilirliğini destekleyen temel bir unsur olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKÇA

- Akdoğan, Y. N. (2023). Mühendislik siparişi üzerine üretimde malzeme ihtiyaç planlaması ve savunma sanayii uygulama örneği [Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi].
- Aktimur, B., & Gökpınar, E. S. (2015). Katmanlı üretimin havacılıktaki uygulamaları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3(2), 463–469.
- Akundi, A., Euresti, D., Luna, S., Ankobiah, W., Lopes, A., & Edinbarough, I. (2022). State of Industry 5.0—Analysis and identification of current research trends. *Applied System Innovation*, 5(1), 27. <https://doi.org/10.3390/asi5010027>
- Alaniz-Muñoz, I., Ontiveros Zepeda, A. S., & Ahumada-Tello, E. (2024). Enhancing production efficiency: Application of project management methodologies in electronics manufacturing industry. 2024 IEEE TEMSCON Latin America Conference (TEMSCON LATAM), 1-6. <https://doi.org/10.1109/TEMSCONLATAM61834.2024.10717822>
- Almada-Lobo, F. (2017, May 25). Six benefits of Industrie 4.0 for businesses. *Control Engineering*.
- Anadolu Ajansı. (2025). Elektrik ve elektronik sektöründe ihracat rekoru.
- ANSI. (2024). IPC-A-610: Acceptability of electronic assemblies.
- APICS. (2017). Supply Chain Operations Reference (SCOR) model.
- Ardolino, M., Rapaccini, M., Saccani, N., Gaiardelli, P., Crespi, G., & Ruggeri, C. (2018). The role of digital technologies for the service transformation of industrial companies. *International Journal of Production Research*, 56(6), 2116–2132. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1324224>
- Ates, A., & Acur, N. (2022). Making obsolescence obsolete: Execution of digital transformation in a high-tech manufacturing SME. *Journal of Business Research*, 152, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.07.052>
- Ayçenk, D. (2000). Design of an information subsystem for quality monitoring and control for an electronics manufacturing process [Master's thesis, Middle East Technical University].
- Ayutaya, K. C. N., Thaweepaiboonwong, J., & Pimpaporn, T. (2026). Industry 4.0 technologies adoption and competitive advantage: Mediating roles of circular economy and sustainable manufacturing in emerging economies. *Digital Business*, 6(1), 100168. <https://doi.org/10.1016/j.digbus.2026.100168>
- Azambuja, A. J. G., Plesker, C., Schützer, K., Anderl, R., Schleich, B., & Almeida, V. R. (2023). Artificial intelligence-based cyber security in the context of Industry 4.0—A survey. *Electronics*, 12(8), 1920. <https://doi.org/10.3390/electronics12081920>
- Baki, B. , Serdar, D. (2020). Sanayi 4.0 olgunluk modeli uygulamaları üzerine literatür incelemesi. *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(22), 766-787. <https://doi.org/10.36543/kauibfd.2020.033>
- Balfaqih, H., & Yunus, B. (2014). Supply chain performance in electronics manufacturing industry. *Applied Mechanics and Materials*, 554, 633–637. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.554.633>

- Barros, V., & Ramos, I. (2025). Collective attention overload in a global manufacturing company: A case study. *Information Systems and e-Business Management*, 23(2), 391–422. <https://doi.org/10.1007/s10257-024-00693-z>
- Banger, G. (2017). *Endüstri 4.0 ve ötesi*. Dorlion Yayınevi.
- Beliatas, M. J., Jensen, K., Ellegaard, L., Aagaard, A., & Presser, M. (2021). Next generation industrial IoT digitalization for traceability in metal manufacturing industry: A case study of Industry 4.0. *Electronics*, 10(5), 628. <https://doi.org/10.3390/electronics10050628>
- Benešová, A., Hirman, M., Steiner, F., & Tupa, J. (2018). Analysis of education requirements for electronics manufacturing within concept Industry 4.0. In 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2018.8443681>
- Boyacıoğulları, H. S. (2025). Dijital dönüşüm ve tedarik zinciri yönetimi ilişkisi: Bir araştırma. *Journal of Internet Applications and Management*, 16(2), 84–103. <https://doi.org/10.34231/iuyd.1783482>
- Buer, S. V., Strandhagen, J. O., & Semini, M. (2021). The industrial digitalization of manufacturing: An empirical study of effects on operational performance. *International Journal of Production Research*, 59(12), 3601–3618. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1746429>
- Blyler, J. E., & Joshi, S. (2025). Navigating digital transformation using systems engineering in the semiconductor ecosystem. *Proceedings of the International Symposium on Systems Engineering (ISSE 2025)*. <https://doi.org/10.1109/ISSE65546.2025.11369998>
- Chen, H., Chiang, R. H. L., & Storey, V. C. (2012). Business intelligence and analytics: From big data to big impact. *MIS Quarterly*, 36(4), 1165–1188. <https://doi.org/10.2307/41703503>
- Chen, R., Chen, X., Wang, L., & Li, J. (2022). The core industry manufacturing process of electronics assembly based on smart manufacturing. *ACM Transactions on Management Information Systems*, 13(4), Article 40, 1–19. <https://doi.org/10.1145/3529098>
- Chopra, S., Meindl, P. (2023). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (8th ed.). Pearson Education.
- Christopher, M. (2016). *Logistics and supply chain management* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Culot, G., Orzes, G., Sartor, M., & Nassimbeni, G. (2020). The future of manufacturing: A Delphi-based scenario analysis on Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 157, 120092. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120092>
- Das, A., & Dey, S. (2021). Global manufacturing value networks: Assessing the critical roles of platform ecosystems and Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(6), 1290–1311. <https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2020-0161>

- Değirmencioğlu Demiralay, Y. (2026). İnsan-robot etkileşimli montaj hatlarının tasarımı ve dengelenmesi için yeni modeller ve çözüm yaklaşımları [Doktora tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı].
- Deloitte. (2025). Smart manufacturing and digital supply chains.
- Doğan İrmak Ural, D. (2024). Baskı devre kartı (PCB) üretiminde hata tespiti için veri artırma tekniklerinin karşılaştırmalı bir çalışması: Sınırlı veri setleri için en iyi yaklaşımların belirlenmesi [Yüksek lisans tezi, Atılım Üniversitesi].
- Ekici, E. Ö. (2013). Çok çeşitli/az hacimli elektronik kart üretimi yapan bir firmanın üretim çizelgelemesini gerçekleştiren karma-tamsayı programlaması (Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, İşletme Anabilim Dalı, Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı).
- ElMaraghy, H., Monostori, L., Schuh, G., & ElMaraghy, W. (2021). Evolution and future of manufacturing systems. *CIRP Annals*, 70(2), 635–658. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.05.008>
- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. (2022). Industry 5.0: A transformative vision for Europe—Governing systemic transformations towards a sustainable industry. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/17322>
- Executive Office of the President. (2020). Promoting the use of trustworthy artificial intelligence in the Federal Government (Executive Order 13960). Federal Register, 85, 78939–78943.
- Fatima, Z., Tanveer, M. H., Waseemullah, Zardari, S., Naz, L. F., Khadim, H., Ahmed, N., & Tahir, M. (2022). Production plant and warehouse automation with IoT and Industry 5.0. *Applied Sciences*, 12(4), 2053. <https://doi.org/10.3390/app12042053>
- Filz, M. A., Bosse, J. P., & Herrmann, C. (2024). Digitalization platform for data-driven quality management in multi-stage manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(6), 2699–2718. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02162-9>
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Gaglio, C., Kraemer-Mbula, E., & Lorenz, E. (2022). The effects of digital transformation on innovation and productivity: Firm-level evidence of South African manufacturing micro and small enterprises. *Technological Forecasting and Social Change*, 182, 121785. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121785>
- Garay-Rondero, C. L., Martinez-Flores, J. L., Smith, N. R., Caballero Morales, S. O., & Aldrette-Malacara, A. (2020). Digital supply chain model in Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 887–933. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2018-0280>
- Ghadge, A., Er Kara, M., Moradlou, H., & Goswami, M. (2020). The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(4), 669–686. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2019-0368>

- Groover, M. P. (2020). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (5th ed.). Pearson.
- Guo, L., & Xu, L. (2021). The effects of digital transformation on firm performance: Evidence from China's manufacturing sector. *Sustainability*, 13(22), 12844. <https://doi.org/10.3390/su132212844>
- Gunasekaran, A., Patel, C., & Tirtiroglu, E. (2001). Performance measures and metrics in a supply chain environment. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(1/2), 71–87. <https://doi.org/10.1108/01443570110358468>
- Hess, T., Matt, C., Benlian, A., & Wiesböck, F. (2016). Options for formulating a digital transformation strategy. *MIS Quarterly Executive*, 15(2), 123–139.
- Huang, S. C., Siao, Z., Gul, M., & Lo, H. W. (2026). Exploring success factors in enterprise digital transformation in the electronics manufacturing sector: Using a modified grey HISA technique. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 20(2), 617–637. <https://doi.org/10.1007/s12008-025-02423-2>
- Hozdic, E. (2015). Smart factory for industry 4.0: A review. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 7(1), 28–35.
- IAQG. (n.d.). AS/EN 9100 series overview.
- IATF. (2025). IATF 16949 quality management system.
- IFR. (2025). World robotics report 2025.
- IPC. (2020). J-STD-001: Requirements for soldered electrical and electronic assemblies.
- Janik, A., & Ryszko, A. (2018). Mapping the field of Industry 4.0 based on bibliometric analysis. In *Proceedings of the 32nd International Business Information Management Association Conference (IBIMA)* (pp. 6316–6330).
- Jayanth, B. V., Prathap, P., Sivaraman, P., Yogesh, S., & Madhu, S. (2020). Implementation of lean manufacturing in electronics industry. *Materials Today: Proceedings*, 33, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.718>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. *Forschungsunion & acatech*.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing engineering and technology* (7th ed.). Pearson Education.
- Karacı, A., Akyüz, H. İ., & Bilgici, G. (2017). Investigation of Cyber Security Behaviors of University Students. *Kastamonu Education Journal*, 25(6), 2079–2094. <https://doi.org/10.24106/kefdergi.351517>
- Kesbiç, Ö. Ö. (2020). Üretimde dijital dönüşüm ve etkileri: Türkiye ekonomisi açısından bir analiz (Yüksek lisans tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı).

- Khin, S., & Kee, D. M. H. (2022). Factors influencing Industry 4.0 adoption. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(3), 448–467. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2021-0111>
- Kızılkeçili, C. (2004). Tedarik zinciri yönetimi ve elektronik sektöründe endüstriyel bir uygulama (Yüksek lisans tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı). YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Koçan, H. Y. (2025). Digital transformation in organizations: The role of leadership in driving innovation [Yüksek lisans tezi, İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi, Ekonomi ve Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, İşletme Bilim Dalı]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. (Tez No. 969955)
- Kumar, A., Agrawal, R., Wankhede, V. A., Sharma, M., & Mulat-Weldemeskel, E. (2022). A framework for assessing social acceptability of Industry 4.0 technologies for the development of digital manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, 174, 121217. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121217>
- Küçükbaş, E. (2025). Endüstri 4.0 çağında Yapay Zeka teknikleri ile takım ucu konum kestirimi: Sanayide bir dijital dönüşüm örneği (Yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hesaplamalı Bilimler Anabilim Dalı).
- Krykavskyy, Y., Pokhylchenko, O., & Hayvanovych, N. (2019). Supply chain development under Industry 4.0 conditions. *Oeconomia Copernicana*, 10(2), 273–290. <https://doi.org/10.24136/oc.2019.014>
- Lee, E. A. (2008). Cyber physical systems: Design challenges. In 2008 11th IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC) (pp. 363–369). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISORC.2008.25>
- Lee, H. L., Padmanabhan, V. , Whang, S. (1997). The bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review*, 38(3), 93-102.
- Lee, C.-H., Liu, C.-L., Trappey, A. J. C., Mo, J. P. T., & Desouza, K. C. (2021). Understanding digital transformation in advanced manufacturing and engineering: A bibliometric analysis, topic modeling and research trend discovery. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101428. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101428>
- Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., & Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>
- Liu, S., Zheng, P., & Bao, J. (2024). Digital Twin-based manufacturing system: A survey based on a novel reference model. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(6), 2517–2546. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02172-7>
- Marinagi, C., Reklitis, P., Trivellas, P., & Sakas, D. (2023). The impact of Industry 4.0 technologies on key performance indicators for a resilient supply chain 4.0. *Sustainability*, 15(6), 5185. <https://doi.org/10.3390/su15065185>
- Manta-Costa, A., Araújo, S. O., Peres, R. S., & Barata, J. (2024). Machine learning applications in manufacturing—Challenges, trends, and future directions. *IEEE Open Journal of the*

- Industrial Electronics Society, 5, 1085–1103.
<https://doi.org/10.1109/OJIES.2024.3431240>
- Mekkunel, F. (2019). Industry 5.0: Man-machine revolution [Master's thesis, Technische Universität Wien]. <https://doi.org/10.34726/hss.2019.65408>
- Menteşe, Y. B. (2026). Endüstriyel ekipmanlarda Yapay Zeka destekli ön kestirimci bakım stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanması (Yüksek lisans tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mekatronik Anabilim Dalı).
- Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1–25.
<https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>
- Mubarik, M., Žvinienė, S. M., Mubarak, M. F., Ghobakhloo, M., & Evans, R. (2024). Transforming supply chain management with Industry 4.0: Post-COVID-19 digital advancements. In 2024 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/COLCOM62950.2024.10720276>.
- Mueller, D., & Vogelsang, F. (2021). Towards smart manufacturing logistics: A case study of potentials of smart label data in electronics manufacturing. *Procedia CIRP*, 104, 1741–1746. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.293>
- Mukherjee, S., Sharma, R., Panigrahi, R. R., & Shrivastava, A. K. (2026). Leveraging digital transformation to enhance circular supply chain performance: A systematic review. *FIIB Business Review*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1177/23197145261417114>
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A human-centric solution. *Sustainability*, 11(16), 4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>
- Moghrabi, I. A. R., Bhat, S. A., Szczuko, P., AlKhaled, R. A., & Dar, M. A. (2023). Digital transformation and its influence on sustainable manufacturing and business practices. *Sustainability*, 15(4), 3010. <https://doi.org/10.3390/su15043010>
- Narula, S., Prakash, S., Dwivedy, M., Talwar, V., & Tiwari, S. P. (2020). Industry 4.0 adoption key factors: An empirical study on manufacturing industry. *Journal of Advances in Management Research*, 17(5), 697–725. <https://doi.org/10.1108/JAMR-03-2020-0039>
- Narula, S., Puppala, H., Kumar, A., Luthra, S., Dwivedy, M., Prakash, S., & Talwar, V. (2023). Are Industry 4.0 technologies enablers of lean? Evidence from manufacturing industries. *International Journal of Lean Six Sigma*, 14(1), 115–138. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-04-2021-0085>
- Newey, W. K., & West, K. D. (1987). A simple, positive semi-definite, heteroskedasticity and autocorrelation consistent covariance matrix. *Econometrica*, 55(3), 703–708. <https://doi.org/10.2307/1913610>
- Nguyen, H. X., Trestian, R., To, D., & Tatipamula, M. (2021). Digital Twin for 5G and Beyond. *IEEE Communications Magazine*, 59(2), 10–15.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000343>.
- OECD. (2025). Electrical machinery and electronics—Türkiye.

- OECD. (2023). Industrial digital transformation and resilience.
- OECD. (2024). OECD digital economy outlook 2024.
- Ömerali, M. (2022). Nesnelerin interneti ve dijital dönüşüm (Endüstri 4.0) stratejilerinin üretim firmalarına faydaları (Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı).
- Ozkeser, B. (2018). Lean innovation approach in Industry 5.0. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics*, 2, 422–428.
- Özkurt, S. (2026). Dijital dönüşüm, iş performansı ve iş tatmini üzerine bir alan araştırması [Yüksek lisans tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, İşletme Bilim Dalı].
- Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2014). How smart, connected products are transforming competition. *Harvard Business Review*, 92(11), 64–88.
- PwC. (2025). Digital supply chains and operations.
- Raileanu, S., Borangiu, T., Lențoiu, I., Anton, F., & Negoită, R. (2024). Data acquisition system for developing digital twin solutions: A practical guide. In *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future (SOHOMA 2023)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53445-4_4
- Rajput, S., & Singh, S. P. (2020). Industry 4.0 model for circular economy and cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123853. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123853>
- Rao, Sriganesh & Prasad, Ramjee. (2018). Impact of 5G Technologies on Industry 4.0. *Wireless Personal Communications*. 100. 1-15. [10.1007/s11277-018-5615-7](https://doi.org/10.1007/s11277-018-5615-7).
- Rashid, A., & Rasheed, R. (2026). AI-powered risk mitigation and organizational sensemaking for supply chain resilience. *Supply Chain Management: An International Journal*, 31(4), 610–625. <https://doi.org/10.1108/SCM-11-2025-1161>
- Reuters. (2025). Global manufacturing and semiconductor market outlook 2025. Reuters.
- Romero, D., Stahre, J., Wuest, T., Noran, O., Bernus, P., Fast-Berglund, Å., & Gorecky, D. (2016). Towards an operator 4.0 typology: A human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. *Proceedings of the International Conference on Computers and Industrial Engineering*.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. Boston Consulting Group.
- Salik Ata, N. (2024). Türkiye'nin Endüstri 4.0'a geçiş sürecinin değerlendirilmesi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 22(51), 119–141. <https://doi.org/10.35408/comuybd.1344608>
- Sanders, N. R. (2013). *Operations management: An integrated approach*.
- Sanders, N. R. (2014). *Big data driven supply chain management: A framework for implementing analytics and turning information into intelligence*. Pearson Education.

- Sandhu, S., Zumeit, A., Tian, Z., Vinciguerra, V., & Dahiya, R. (2025). Semiconductor manufacturing wastewater challenges and the potential solutions via printed electronics. *iScience*, 28(10), 113576. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.113576>
- Saray, G. (2024). Üretimde dijital dönüşüm etkinliğinin değerlendirilmesi için bir performans ölçüm sistemi geliştirilmesi (Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı).
- Sarkar, B. D., Shardeo, V., Dwivedi, A., & Pamucar, D. (2024). Digital transition from industry 4.0 to industry 5.0 in smart manufacturing: A framework for sustainable future. *Technology in Society*, 78, 102649. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102649>
- Sarı, M. (2023). Üretimde dijital dönüşüm kapsamında artırılmış gerçeklik (AR) uygulamaları: Bir üretim işletmesinde farklı artırılmış gerçeklik (AR) yatırım senaryolarının değerlendirilmesi [Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Üretim Yönetimi ve Endüstri İşletmeciliği Bilim Dalı].
- Sarvari, P. A., Ustundag, A., Cevikcan, E., Kaya, I., & Cebi, S. (2018). Technology roadmap for Industry 4.0 transformation. In *Industry 4.0: Managing the Digital Transformation* (pp. 95–103). Springer.
- Semiconductor Industry Association. (2025). State of the semiconductor industry.
- Singh, S., Sharma, M., & Dhir, S. (2021). Modeling the effects of digital transformation in Indian manufacturing industry. *Technology in Society*, 67, 101763. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101763>
- Slack, N., Brandon-Jones, A., & Burgess, N. (2022). *Operations management* (10th ed.). Pearson.
- Stadtler, H. (2015). Supply chain management: An overview. In H. Stadtler, C. Kilger & H. Meyr (Eds.), *Supply Chain Management and Advanced Planning* (5th ed.). Springer.
- TESİD. (2025). Elektronik sektörü genel görünüm raporu.
- Tian, M., Chen, Y., Tian, G., Huang, W., & Hu, C. (2023). The role of digital transformation practices in the operations improvement in manufacturing firms: A practice-based view. *International Journal of Production Economics*, 262, 108929. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108929>
- Tokel, H. (2023). Uluslararası sürdürülebilir havacılık endüstrisi [Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi].
- Torrecilla-García, J. A., del Pardo-Ferreira, M. C., Skotnicka, A. G., Herrera-Pérez, V., & Rubio-Romero, J. C. (2023). IoT as an enabler of emergent Manufacturing-as-a-Service business model in the precision electronics components industry: The exploratory case study of two European companies. In *Innovations in Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 861-872). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27915-7_74
- TÜİK. (2024). Yıllık sanayi ve hizmet istatistikleri.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2025). On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028) Sanayi Politikaları ve Dijital Dönüşüm Özel İhtisas Komisyonu Raporu. SBB.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2025). Elektronik sanayii çalışma grubu ve İmalat sanayii politikaları özel ihtisas komisyonu raporu. SBB.

- Tüzün, İ. (2026). Investigating the Procurement 4.0 strategy adoption in SME suppliers (Master's thesis, İzmir University of Economics, Graduate School, Department of Logistics Management).
- Ünsal, N. (2023). Bir üretim işletmesinde dijital dönüşüm uygulaması [Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri ve Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı].
- Verhoef, P. C., Broekhuizen, T., Bart, Y., Bhattacharya, A., Dong, J. Q., Fabian, N. , Haenlein, M. (2021). Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda. *Journal of Business Research*, 122, 889–901. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.09.022>
- Vial, G. (2019). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), 118–144. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003>
- Wagner, A. K., Soumerai, S. B., Zhang, F., & Ross-Degnan, D. (2002). Segmented regression analysis of interrupted time series studies in medication use research. *Journal of Clinical Pharmacy and Therapeutics*, 27(4), 299–309. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2710.2002.00430.x>
- Wan, J., Cai, H., & Zhou, K. (2015). Industrie 4.0: Enabling technologies. In *Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things* (pp. 135-140). IEEE.
- Wang, Y., & Su, X. (2021). Driving factors of digital transformation for manufacturing enterprises: A multi-case study from China. *International Journal of Technology Management*, 87(2/3/4), 229–253. <https://doi.org/10.1504/IJTM.2021.120932>
- WSTS. (2025). Semiconductor market forecast.
- Yazır, S. (2018). Türkiye'de bulut bilişimin teknolojik gelişimi ve bulut platformu üzerinde örnek bir kişisel web uygulamasının sunulması (Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.).
- Zhang, L., Gu, F., & He, M. (2024). The influence of digital transformation on the reconfigurability and performance of supply chains: A study of the electronic, machinery, and home appliance manufacturing industries in China. *Sustainability*, 16(7), 2689. <https://doi.org/10.3390/su16072689>
- Zinn, J., & Vogel-Heuser, B. (2019). A qualitative study of Industry 4.0 use cases and their implementation in electronics manufacturing. *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 1224-1230. <https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972323>
- Zhong, X. (2025). Research on risk management strategies under global supply chain disruptions: A case study of the electronics manufacturing industry. *International Journal of e-Collaboration*. <https://doi.org/10.4018/IJeC.393074>

Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) (pp. 2147–2152). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>

EK1 ORJİNALLİK FORMU

EK 2 ETİK KURUL MUAFİYET FORMU

