

Received/Geliş : 2026 July/Temmuz Accepted/Kabul : 2026 August/Ağustos Published/Yayın : 2026 September/Eylül

Bir Gübre Üretim Tesisinin Endüstri 4.0'a Hazır Oluşunun İncelenmesi: Nitel Bir Durum Çalışması¹

Samet Tanrıverdi²

Atıf/Reference: Tanrıverdi, S. (2026). Bir Gübre Üretim Tesisinin Endüstri 4.0'a Hazır Oluşunun İncelenmesi: Nitel Bir Durum Çalışması. *Yönetim ve Eğitim Bilimleri Dergisi*, 5(3), 320-334.

Özet

Endüstri 4.0, üretim süreçlerinde otomasyonun ötesine geçerek fiziksel üretim sistemleri ile dijital teknolojilerin, verilerin ve bilgi sistemlerinin bütünleşmesini esas alan bir dönüşüm yaklaşımıdır. Bu araştırmanın amacı, bir gübre üretim tesisinin mevcut teknolojik altyapısını Endüstri 4.0 bileşenleri açısından incelemek; işletmenin Endüstri 4.0'a geçişini destekleyen ve sınırlandıran unsurları ortaya koymak ve geleceğe yönelik teknolojik dönüşüm ve yatırım yönelimlerini belirlemektir. Araştırma, nitel durum çalışması olarak tasarlanmıştır. Araştırmanın katılımcılarını gübre tesisi baş mühendisi, üretim müdürü, otomasyon sistemleri baş mühendisi ve bilgi işlem sorumlusu olmak üzere dört çalışan oluşturmuştur. Veriler yarı yapılandırılmış görüşmeler yoluyla toplanmış ve betimsel analiz yaklaşımıyla analiz edilmiştir. Bulgular; mevcut teknolojik altyapı ve otomasyon düzeyi, dijital altyapı ve Endüstri 4.0 bileşenleri, Endüstri 4.0'a geçişi sınırlandıran faktörler, teknolojik ve örgütsel kapasite ile gelecek yönelimi, yatırımlar ve Ar-Ge olmak üzere beş ana tema altında değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda tesiste yarı otomasyon sistemleri, bulut tabanlı bilgi sistemleri, ERP uygulamaları, siber güvenlik önlemleri ve otomatik arıza izleme gibi dijital dönüşümü destekleyen uygulamaların bulunduğu belirlenmiştir. Buna karşılık sensörler ve üretim sistemleri arasında tam bütünleşik iletişimin bulunmaması, Siber-Fiziksel Sistemlerin sınırlı düzeyde kullanılması ve kimyasal üretim süreçlerinde insan denetimine duyulan gereksinim, tam bütünleşik ve otonom bir Endüstri 4.0 üretim yapısına geçişi sınırlandırmaktadır. Sonuç olarak işletmenin Endüstri 4.0'a hazır oluşunun ikili bir “hazır/hazır değil” sınıflandırmasından ziyade, farklı teknolojik bileşenlerde farklı düzeylerde ilerleyen kademeli bir dijital dönüşüm süreci olarak değerlendirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, dijital dönüşüm, teknolojik hazır oluş, otomasyon, gübre üretimi.

An Examination of a Fertilizer Production Plant's Readiness for Industry 4.0: A Qualitative Case Study

Abstract

Industry 4.0 represents a transformation approach that goes beyond conventional automation by integrating physical production systems with digital technologies, data, and information systems. This study aimed to examine the existing technological infrastructure of a fertilizer production plant in terms of Industry 4.0 components, identify the factors supporting and constraining its transition to Industry 4.0, and explore its future technological transformation and investment orientations. The research was designed as a qualitative case study. The participants were four employees with direct knowledge of the plant's production and technological infrastructure: the fertilizer plant chief engineer, the production manager, the automation systems chief engineer, and the information technology officer. Data were collected through semi-structured interviews and analyzed

¹ Bu çalışma, Samet Tanrıverdi'nin Dr. Öğr. Üyesi Emre Aslan danışmanlığında Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İşletme Anabilim Dalında 2021 yılında tamamladığı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

² Doktora Öğrencisi; Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü; <https://orcid.org/0000-0001-6256-2533>; samettanriverdi@gmail.com;

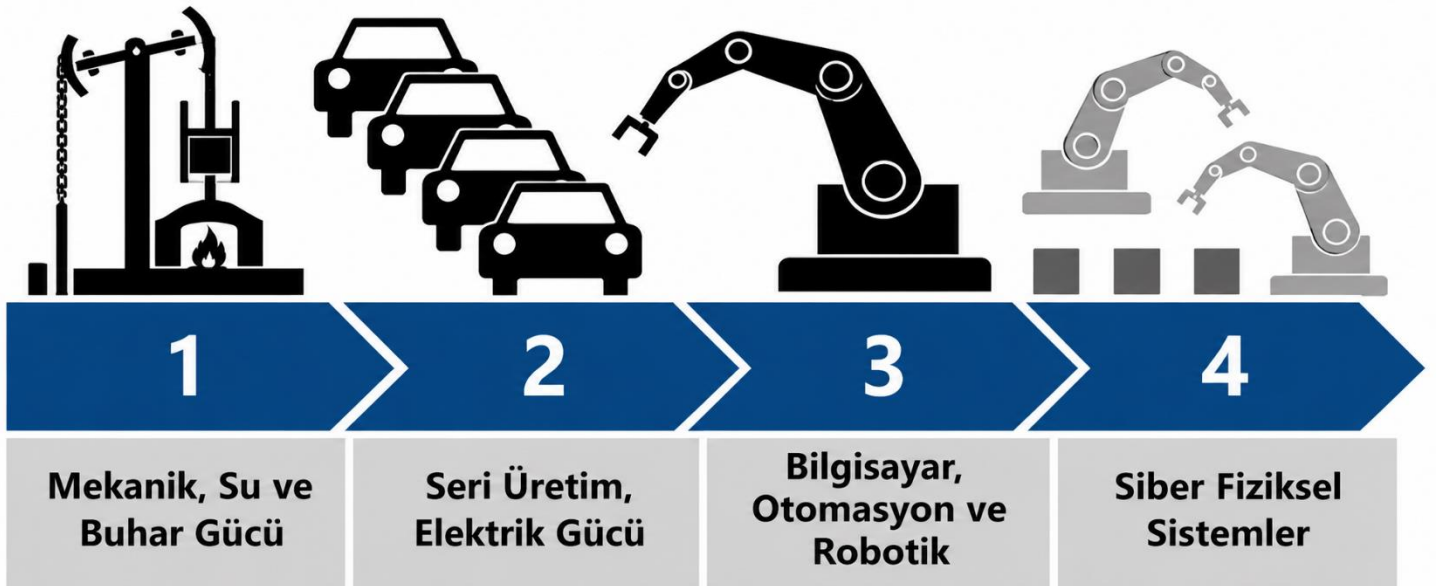
using a descriptive analysis approach. The findings were organized into five main themes: current technological infrastructure and level of automation, digital infrastructure and Industry 4.0 components, factors constraining the transition to Industry 4.0, technological and organizational capacity, and future orientation, investments, and R&D. The findings indicated that the plant employs several practices supporting digital transformation, including semi-automated production systems, cloud-based information systems, ERP applications, cybersecurity measures, and automated fault monitoring. However, the lack of fully integrated communication among sensors and production systems, the limited use of Cyber-Physical Systems, and the continuing need for human supervision in chemical production processes constrain the transition toward a fully integrated and autonomous Industry 4.0 production structure. Overall, the plant's Industry 4.0 readiness should be understood not through a binary “ready/not ready” classification but as a gradual digital transformation process in which different technological components have reached different levels of development.

Keywords: Industry 4.0, digital transformation, technological readiness, automation, fertilizer production.

1. Giriş

Teknolojik gelişmeler, dijitalleşme ve küresel rekabet, imalat işletmelerinin üretim sistemlerini ve yönetim süreçlerini yeniden yapılandırmalarını gerekli hâle getirmektedir. Üretimde verimlilik ve esnekliğin artırılması, ürün kalitesinin geliştirilmesi, üretim süreçlerinin daha etkin izlenmesi ve veriye dayalı karar verme kapasitesinin güçlendirilmesi, dijital teknolojilerin imalat sistemleriyle bütünleştirilmesini stratejik bir gereklilik hâline getirmiştir. Bu dönüşümün temel çerçevelerinden biri olan Endüstri 4.0, geleneksel otomasyonun ötesine geçerek fiziksel üretim süreçlerinin dijital teknolojiler, veri ve iletişim sistemleriyle bütünleştirildiği bağlantılı üretim ortamlarını ifade etmektedir. Güncel literatür, Endüstri 4.0'ın çok disiplinli bir araştırma alanına dönüştüğünü ve akıllı fabrikaların oluşturulmasında özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) ile Siber-Fiziksel Sistemlerin (CPS) merkezi rol üstlendiğini göstermektedir (Lemstra ve de Mesquita, 2023).

Endüstri 4.0, üretim teknolojilerinin tarihsel gelişiminde dördüncü temel dönüşüm aşaması olarak değerlendirilmektedir. Birinci Endüstri Devrimi su ve buhar gücüne dayalı mekanik üretimle, İkinci Endüstri Devrimi elektrik enerjisi ve seri üretimle, Üçüncü Endüstri Devrimi ise elektronik ve bilgi teknolojilerinin üretimde kullanılmasıyla karakterize edilmiştir. Dördüncü Endüstri Devrimi'ni önceki aşamalardan ayıran temel özellik, üretimin yalnızca otomatikleştirilmesi değil; makinelerin, üretim süreçlerinin ve bilgi sistemlerinin gerçek zamanlı veri akışı üzerinden birbirleriyle bağlantılı hâle gelmesidir. Bu yapı, üretim işletmelerinin izole otomasyon birimlerinden bütünlük veri ve üretim akışlarına doğru dönüşmesini öngörmektedir (Schumacher, Erol, ve Sihn, 2016; Ünlü, Demirörs, ve Garousi, 2024).



Şekil 1. Endüstri Devrimleri (TÜBİTAK, 2016)

Endüstri 4.0 ile birlikte üretim sistemleri; Siber-Fiziksel Sistemler (CPS), Nesnelerin İnterneti (IoT), sensör teknolojileri, bulut bilişim, büyük veri analitiği, yapay zekâ ve gelişmiş otomasyon sistemleri gibi birbirini tamamlayan teknolojilerin oluşturduğu bağlantılı bir yapıya dönüşmektedir. CPS, fiziksel üretim ortamıyla hesaplama ve iletişim altyapısını bütünleştirerek üretim süreçlerinin izlenmesine, verilerin paylaşılmasına ve

sistemlerin kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır. IoT ve sensör teknolojileri fiziksel üretim ortamından veri elde edilmesini ve makineler arasında bağlantı kurulmasını desteklerken; bulut bilişim ve veri analitiği bu verilerin depolanması, işlenmesi ve karar süreçlerinde kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla Endüstri 4.0'ın temel özelliği, tek tek dijital teknolojilerin kullanımından çok bu teknolojilerin bağlantılı bir üretim sistemi içerisinde birlikte çalışabilmesidir (Dafflon, Moalla, ve Ouzrout, 2021; Sahoo ve Lo, 2022).

Endüstri 4.0'ın işleyişinde sensör, veri, bilgi ve işlem arasındaki ilişki kritik bir öneme sahiptir. Üretim ortamındaki fiziksel değişkenler sensörler aracılığıyla algılanmakta, elde edilen veriler iletişim ağları üzerinden aktarılmakta ve dijital sistemler tarafından işlenerek üretim süreçlerine ilişkin anlamlı bilgiye dönüştürülmektedir. Bu bilgi; izleme, kontrol, optimizasyon ve karar verme süreçlerinde kullanılarak tekrar fiziksel üretim sistemlerine yansıtılabilmektedir. CPS'nin temel yapısı da fiziksel bileşenler, siber bileşenler ve insan unsuru arasındaki bu karşılıklı veri ve kontrol ilişkisine dayanmaktadır (Dafflon vd., 2021).



Şekil 2. Endüstri 4.0'ın Dört İşlemi (Şener ve Elevli, 2017)

Endüstri 4.0'a geçiş yalnızca yeni teknolojilerin satın alınması veya işletmede belirli dijital uygulamaların bulunmasıyla açıklanabilecek bir süreç değildir. İşletmelerin teknolojik altyapılarının yanı sıra strateji, liderlik, örgüt kültürü, çalışan yetkinlikleri, operasyonlar ve yönetim gibi örgütsel özellikleri de Endüstri 4.0 olgunluğunun belirleyicileri arasında değerlendirilmektedir (Schumacher vd., 2016). Nitekim güncel bir sistematik derlemede incelenen 22 Endüstri 4.0 hazır oluş ve olgunluk modelinin yapı, kapsam ve değerlendirme yaklaşımı bakımından önemli ölçüde farklılaştığı; alan genelinde yaygın biçimde kabul edilmiş tek bir hazır oluş/olgunluk modelinin bulunmadığı belirlenmiştir (Ünlü vd., 2024). Bu nedenle işletmelerin Endüstri 4.0'a hazır oluşunun değerlendirilmesinde teknolojilerin yalnızca mevcut olup olmadığı değil, bunların üretim ve yönetim süreçlerine entegrasyonu ile işletmenin dönüşümü sürdürebilecek örgütsel kapasitesi de dikkate alınmalıdır.

Bu gereklilik kimya ve proses endüstrileri açısından daha belirgin hâle gelmektedir. Proses endüstrileri kesintisiz üretim akışları, karmaşık fiziksel ve kimyasal süreçler, birbirine bağımlı proses değişkenleri ve yüksek güvenlik gereksinimleri nedeniyle ayrık imalat sistemlerinden farklı özellikler taşımaktadır. Kimya endüstrisinde dijitalleşme; proses otomasyonu ve kestirimci bakımdan tedarik zinciri bütünleşmesine, gelişmiş analitiğe ve yapay zekâ destekli karar süreçlerine kadar genişleyen bir dönüşüm yaratmaktadır. Bununla birlikte güvenilirlik, proses güvenliği ve insanın değişen rolü, dijital dönüşümün temel konuları olmaya devam etmektedir (Feise ve Schaer, 2021; Chiang vd., 2022). Bu nedenle kimyasal üretim tesislerinde Endüstri 4.0'a hazır oluşun değerlendirilmesi, yalnızca otomasyon düzeyini değil, proses özellikleri, güvenlik gereksinimleri, teknolojik entegrasyon ve insan denetimini birlikte dikkate almayı gerektirmektedir.

Endüstri 4.0 konusunda geniş bir literatür oluşmuş olmasına rağmen, araştırmaların önemli bir bölümü kavramsal çalışmalar ve belirli kolaylaştırıcı teknolojiler üzerinde yoğunlaşmaktadır. Lemstra ve de Mesquita (2023), 46 sistematik derlemeyi ve bu derlemelerde yer alan 1.542 çalışmayı kapsayan üçüncül literatür incelemelerinde, Endüstri 4.0 literatüründe kavramsal çalışmaların ağırlığını koruduğunu ve teknolojilerin işletmelerde uygulanmasına odaklanan araştırmaların görece sınırlı kaldığını ortaya koymuştur. Benzer biçimde Endüstri 4.0 hazır oluşuna ilişkin çalışmalar artmakla birlikte, güncel sistematik incelemeler mevcut modellerin önemli ölçüde farklılaştığını ve uygulamadaki geçerlilikleri konusunda hâlen açık araştırma alanlarının bulunduğunu göstermektedir (Ünlü vd., 2024). Bu bulgular, belirli sektör ve işletme bağlamlarında Endüstri 4.0 dönüşümünün nasıl gerçekleştiğini inceleyen ampirik çalışmalara duyulan gereksinimi desteklemektedir.

Bu araştırma boşluğu proses endüstrileri açısından daha da özgül bir nitelik taşımaktadır. Zhao ve diğerleri (2023), mevcut Endüstri 4.0 hazır oluş ve olgunluk yaklaşımlarının önemli ölçüde genel imalat bağlamına dayandığını belirterek proses endüstrilerinin özelliklerine yönelik özel bir akıllı üretim hazır oluş modeli geliştirmiştir. Araştırmacılar modeli gerçek proses endüstrisi işletmelerinde uygulayarak hazır oluşun yalnızca teknolojiyle değil, işletme, örgüt, teknoloji ve akıllı üretim kapasitesini içeren çok boyutlu bir yapı olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Proses endüstrilerindeki dijital ikiz uygulamalarını inceleyen Perno, Hvam ve Haug (2022) da bu alandaki çalışmaların görece sınırlı olduğunu ve fiziksel üretim süreçlerinin karmaşıklığının dijital teknolojilerin uygulanmasında önemli güçlükler yarattığını bildirmiştir. Dolayısıyla proses/kimya endüstrilerinde Endüstri 4.0'a geçişin işletme düzeyinde ve bağlama özgü olarak incelenmesi güncel literatürde anlamlı bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

Bu doğrultuda araştırmanın amacı, Samsun'da faaliyet gösteren bir gübre üretim tesisinin mevcut teknolojik altyapısını Endüstri 4.0 bileşenleri açısından incelemek; işletmenin Endüstri 4.0'a geçişini destekleyen ve sınırlandıran teknolojik, örgütsel ve sektörel unsurları ortaya koymak ve geleceğe yönelik teknolojik dönüşüm ile yatırım yönelimlerini belirlemektir. Çalışmanın özgün değeri, hazır oluşu yalnızca belirli teknolojilerin işletmede bulunup bulunmaması üzerinden değerlendirmemesi; otomasyon ve dijital altyapının yanı sıra teknolojik entegrasyon, örgütsel kapasite ve proses endüstrisine özgü koşulları kilit teknik ve yönetsel aktörlerin deneyimleri üzerinden birlikte incelemesidir. Bu yaklaşım, Endüstri 4.0 hazır oluşunun teknolojiyle sınırlı olmayan çok boyutlu bir yapı olarak ele alınması gerektiğini ortaya koyan güncel çalışmalarla uyumludur (Monshizadeh, Sadeghi Moghadam, Mansouri, ve Kumar, 2023; Zhao vd., 2023).

Bu amaç doğrultusunda aşağıdaki araştırma sorularına yanıt aranmıştır:

1. İşletmenin mevcut teknolojik altyapısı Endüstri 4.0 bileşenleri açısından nasıl değerlendirilmektedir?
2. İşletmede Endüstri 4.0'a geçişi destekleyen mevcut teknolojik ve örgütsel kapasite unsurları nelerdir?
3. Endüstri 4.0'a geçişi sınırlandıran teknik, sektörel ve örgütsel faktörler nelerdir?
4. İşletmenin Endüstri 4.0'a yönelik gelecek yatırım ve dönüşüm planları nasıl şekillenmektedir?

2. Yöntem

2.1. Araştırma Deseni

Bu araştırma, bir gübre üretim tesisinin mevcut teknolojik altyapısının Endüstri 4.0 bileşenleri açısından incelenmesini amaçlayan **nitel bir durum çalışması** olarak tasarlanmıştır. Durum çalışmaları, sınırları belirli bir olgu, kurum, süreç veya durumun kendi bağlamı içerisinde ayrıntılı ve bütüncül olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada incelenen durum, Samsun'da faaliyet gösteren bir gübre üretim tesisinin Endüstri 4.0'a teknolojik hazır oluşudur.

Araştırmada işletmenin mevcut teknolojik altyapısının Endüstri 4.0 uygulamalarıyla uyumu, dijital dönüşümü destekleyen ve sınırlandıran unsurlar ile işletmenin gelecekteki teknolojik yatırım yönelimleri, üretim ve bilgi sistemleri konusunda doğrudan bilgi sahibi olan katılımcıların görüşleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu yönüyle çalışmada sayısal bir Endüstri 4.0 olgunluk düzeyi hesaplamak yerine, işletmenin mevcut durumunun bağlama özgü ve bütüncül biçimde ortaya konulması amaçlanmıştır.

2.2. Araştırma Ortamı

Araştırma, Samsun'un Tekkeköy ilçesinde faaliyet gösteren ve birbirleriyle entegre üretim tesislerinden oluşan bir işletmenin, **2014 yılında faaliyete geçen amonyum sülfat gübresi üretim tesisinde** gerçekleştirilmiştir. İncelenen tesis, işletmenin diğer üretim birimlerine kıyasla daha yeni teknolojik sistemlerle donatılmış olması nedeniyle araştırma kapsamında ele alınmıştır.

Tesiste amonyum sülfat üretimi, bakır üretimi sırasında ortaya çıkan sülfür gazının önce sülfürik aside dönüştürülmesi ve ardından amonyak gazıyla nötralizasyonu yoluyla gerçekleştirilmektedir. Üretilen amonyum

sülfat, %21 oranında azot içeren ve çeşitli kompoze gübrelerin üretiminde ham madde olarak da kullanılabilen bir gübre türüdür.

Araştırmanın gerçekleştirildiği dönemde tesisin yıllık üretim kapasitesi yaklaşık **600.000 ton**, günlük üretim kapasitesi ise **1.810 ton** olarak belirtilmiştir. Tesiste iki üretim mühendisi, beş vardiya formeni, 13 üretim operatörü ve 10 saha personeli olmak üzere toplam **30 çalışan** görev yapmakta ve üretim faaliyetleri 7 gün 24 saat esasına göre sürdürülmektedir. Bu özellikler, araştırma durumunun teknolojik altyapı, otomasyon ve üretim süreçlerinin bütünleşmesi açısından incelenmesine uygun bir bağlam oluşturmuştur.

2.3. Katılımcılar

Araştırmanın katılımcıları, incelenen tesisin üretim süreçleri, otomasyon altyapısı, bilgi sistemleri ve teknolojik dönüşüm uygulamaları hakkında doğrudan bilgi ve deneyime sahip çalışanlar arasından belirlenmiştir. Araştırmaya **gübre tesisi baş mühendisi, üretim müdürü, otomasyon sistemleri baş mühendisi ve bilgi işlem sorumlusu olmak üzere dört katılımcı** dâhil edilmiştir.

Katılımcıların belirlenmesinde amaçlı örnekleme yaklaşımından yararlanılmıştır. Katılımcıların üretim, otomasyon ve bilgi teknolojileri gibi Endüstri 4.0'a hazır oluşun farklı boyutları hakkında doğrudan bilgi sahibi olmaları seçimlerinde temel ölçüt olarak dikkate alınmıştır. Böylece aynı tesisin teknolojik altyapısının farklı uzmanlık ve sorumluluk alanlarından değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Tablo 1. Katılımcıların Görev Alanları

Katılımcı	Görev/uzmanlık alanı	Araştırmadaki bilgi alanı
K1	Gübre tesisi baş mühendisi	Üretim süreçleri ve tesis altyapısı
K2	Üretim müdürü	Üretim yönetimi ve yatırım süreçleri
K3	Otomasyon sistemleri baş mühendisi	Otomasyon ve üretim teknolojileri
K4	Bilgi işlem sorumlusu	Bilgi sistemleri, ERP, bulut ve siber güvenlik

Not. K1–K4 kodları katılımcıların kimliklerinin gizliliğini sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

2.4. Veri Toplama Aracı

Araştırma verilerinin toplanmasında araştırmacı tarafından hazırlanan yarı yapılandırılmış görüşme formu kullanılmıştır. Görüşme sorularının oluşturulmasında Çıkdın (2018) ve Barutçu'nun (2019) çalışmalarından yararlanılmış ve hazırlanan form uzman görüşleri doğrultusunda düzenlenmiştir.

Görüşme formu; işletmenin üretim yaklaşımı, mevcut teknolojik altyapısı, Endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanım durumu, otomasyon sistemleri, bulut bilişim, siber güvenlik, Siber-Fiziksel Sistemler, kurumsal kaynak planlama (ERP) sistemleri, Ar-Ge faaliyetleri, insan kaynağı ve geleceğe yönelik teknolojik yatırım planlarını belirlemeye yönelik sorulardan oluşmaktadır. Görüşmelerde temel soruların yanı sıra, katılımcıların verdikleri yanıtların ayrıntılandırılması gereken durumlarda ek ve sondaj soruları yöneltilmiştir. Araştırmada kullanılan yarı yapılandırılmış görüşme formu **Ek 1'de** sunulmuştur.

2.5. Veri Toplama Süreci

Araştırma verileri katılımcılarla gerçekleştirilen yüz yüze ve derinlemesine görüşmeler yoluyla elde edilmiştir. Görüşmelerde yarı yapılandırılmış görüşme formu izlenmiş; katılımcıların deneyimlerini ve değerlendirmelerini ayrıntılı biçimde açıklamalarına olanak sağlamak amacıyla gerekli durumlarda ek sorular yöneltilmiştir. Katılımcıların izni doğrultusunda görüşmeler ses kayıt cihazıyla kaydedilmiştir. Böylece görüşme verilerinin analiz sürecinde eksiksiz biçimde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2.6. Verilerin Analizi

Görüşmelerden elde edilen verilerin analizinde betimsel analiz yaklaşımı esas alınmıştır. Analiz sürecinde öncelikle araştırmanın amacı ve araştırma soruları doğrultusunda analitik bir çerçeve oluşturulmuş; görüşme verileri bu çerçeve kapsamında düzenlenmiş, benzer anlam taşıyan ifadeler bir araya getirilmiş ve bulgular tematik başlıklar altında değerlendirilmiştir.

Analiz sonucunda bulgular; (1) mevcut teknolojik altyapı ve otomasyon düzeyi, (2) dijital altyapı ve Endüstri 4.0 bileşenleri, (3) Endüstri 4.0'a geçişi sınırlandıran faktörler, (4) teknolojik ve örgütsel kapasite ve (5) gelecek yönelimi, yatırımlar ve Ar-Ge olmak üzere beş ana tema altında düzenlenmiştir. Bu temalar doğrultusunda katılımcıların benzer ve farklı değerlendirmeleri birlikte ele alınmış ve işletmenin Endüstri 4.0'a hazır oluşuna ilişkin mevcut durum bütüncül olarak değerlendirilmiştir.

Katılımcıların görüşlerini doğrudan yansıtmak ve yapılan değerlendirmelerin araştırma verileriyle ilişkisini görünür kılmak amacıyla bulgular bölümünde doğrudan alıntılara yer verilmiştir. Katılımcıların kimliklerinin

gizliliğini korumak amacıyla görüşler K1, K2, K3 ve K4 kodları kullanılarak sunulmuştur.

2.7. Araştırmanın İnandırıcılığı

Araştırmanın inandırıcılığını desteklemek amacıyla, Endüstri 4.0'a hazır oluşun farklı bileşenleri hakkında doğrudan bilgi sahibi olan farklı görevlerdeki katılımcılardan veri elde edilmiştir. Üretim, otomasyon ve bilgi teknolojileri alanlarında görev yapan katılımcıların görüşlerinin birlikte değerlendirilmesi, incelenen durumun farklı uzmanlık alanlarından ele alınmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca bulguların sunumunda katılımcı görüşlerinden doğrudan alıntılara yer verilerek araştırmacının ulaştığı değerlendirmeler ile araştırma verileri arasındaki ilişkinin görünür kılınması amaçlanmıştır.

3. Bulgular

Yarı yapılandırılmış görüşmelerden elde edilen veriler, araştırma soruları doğrultusunda betimsel olarak analiz edilmiş ve bulgular beş ana tema altında düzenlenmiştir: **(1) mevcut teknolojik altyapı ve otomasyon düzeyi, (2) dijital altyapı ve Endüstri 4.0 bileşenleri, (3) Endüstri 4.0'a geçişi sınırlandıran faktörler, (4) teknolojik ve örgütsel kapasite ve (5) gelecek yönelimi, yatırımlar ve Ar-Ge.**

Tablo 2. Endüstri 4.0'a Hazır Oluşa İlişkin Tema ve Alt Temalar

Ana tema	Alt temalar	Bulgularda öne çıkan göstergeler
1. Mevcut teknolojik altyapı ve otomasyon	Üretim otomasyonu; insan-makine etkileşimi; arıza izleme	Yarı otomasyon; otomatik uyarı ve arıza tespiti; insan kontrolünün devam etmesi
2. Dijital altyapı ve Endüstri 4.0 bileşenleri	Bulut bilişim; ERP; siber güvenlik; CPS	Bulut tabanlı veri yönetimi; D365; SOME; kısmi CPS altyapısı
3. Endüstri 4.0'a geçişi sınırlandıran faktörler	Kimyasal proseslerin niteliği; entegre tesis yapısı; insan müdahalesi; sınırlı sistem entegrasyonu	Tam otonom üretimin uygulanamaması; sensörler arası doğrudan haberleşmenin bulunmaması
4. Teknolojik ve örgütsel kapasite	Teknik bilgi; uzman insan kaynağı; dijital dönüşüm farkındalığı	Teknolojik gelişmelerin izlenmesi; mühendislik ve bilgi işlem kapasitesi; süreç optimizasyonu
5. Gelecek yönelimi, yatırım ve Ar-Ge	Yeni tesis yatırımları; pilot uygulamalar; Ar-Ge; insan faktörünün azaltılması	Yeni teknolojilerin test edilmesi; otomasyon yoğunluğunun artırılması; Ar-Ge merkezi planı

3.1. Mevcut Teknolojik Altyapı ve Otomasyon Düzeyi

Katılımcı görüşleri, incelenen tesisin üretim süreçlerinde otomasyon teknolojilerinden aktif olarak yararlanıldığını, ancak sistemin tam otonom bir üretim yapısına ulaşmadığını göstermektedir. Üretim süreçleri ağırlıklı olarak **yarı otomasyon sistemi** üzerinden yürütülmekte; otomasyon sistemleri üretim parametrelerinin izlenmesi, süreç kontrolü ve arızaların belirlenmesi gibi işlevleri yerine getirmektedir. Bununla birlikte, kimyasal üretimin doğası ve tesisin diğer üretim birimleriyle entegre biçimde çalışması nedeniyle insan denetimi üretim sürecindeki önemini korumaktadır.

Baş mühendis bu durumu şu şekilde ifade etmiştir:

“...otomasyon sistemleri ile çalışıyoruz... Entegre tesislerde maalesef bazen etkileşimden dolayı olumlu ve olumsuz dönüşler olabiliyor... kimyasal tesislerde kontrolün tamamen elden çıkarılıp insiyatif alınması gereken durumlar olduğundan mevcut sistemde devam etmek zorundayız...” (K1)

Bu bulgu, işletmenin otomasyon açısından belirli bir teknolojik kapasiteye sahip olduğunu; ancak otomasyonun varlığının tek başına Endüstri 4.0'a tam geçiş anlamına gelmediğini göstermektedir.

3.2. Dijital Altyapı ve Endüstri 4.0 Bileşenlerinin Kullanımı

İşletmenin dijital altyapısında Endüstri 4.0 ile ilişkilendirilebilecek çeşitli teknolojilerin kullanıldığı belirlenmiştir. Katılımcı ifadelerine göre üretim ve işletme verilerinin yönetiminde **bulut tabanlı sistemlerden** yararlanılmakta; işletmenin farklı birimlerinde ise Microsoft tabanlı **D365 ERP sistemi** kullanılmaktadır. ERP sistemi muhasebe ve finans, insan kaynakları, satın alma, stok yönetimi, iş sağlığı ve güvenliği ile üretim gibi farklı işlevleri desteklemektedir.

Siber güvenlik açısından işletmede kurumsal veri ve sistem sürekliliğini korumaya yönelik tedbirlerin bulunduğu; Siber Olaylara Müdahale Ekibi (SOME) tarafından gerekli görülen güvenlik altyapısından yararlanıldığı ifade edilmiştir.

Bununla birlikte, Siber-Fiziksel Sistemler bakımından daha sınırlı bir entegrasyon söz konusudur. Otomasyon sistemleri ve bilgisayarlar arasında iletişim bulunmasına ve arızalar otomatik olarak tespit edilebilmesine rağmen, sensörlerin doğrudan birbirleriyle haberleştiği tam bütünleşik bir yapı mevcut değildir:

“Fabrikamızda genel olarak birbiri ile haberleşen otomasyon sistemleri ve bunları izlemek için kullandığımız bilgisayarlar var... Direkt sensörlerin birbiri ile haberleştiği bir sistemimiz yok.” (K3)

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde işletmenin dijitalleşme düzeyinin belirgin olduğu, ancak tam bütünleşik Siber-Fiziksel Sistem yapısının henüz oluşmadığı görülmektedir.

3.3. Endüstri 4.0'a Geçiş Sınırlandıran Faktörler

Katılımcı görüşlerinde Endüstri 4.0'a tam geçiş sınırlandıran en önemli unsur, üretimin kimyasal proseslere dayalı olması olarak öne çıkmaktadır. Kritik üretim koşullarında insan müdahalesine ve kararına ihtiyaç duyulması, tamamen otonom bir üretim yapısının oluşturulmasını güçleştirmektedir. Ayrıca tesisin başka üretim birimleriyle entegre çalışması, bir tesiste meydana gelen değişimin diğer süreçleri etkileyebilmesine neden olmaktadır.

Teknolojik açıdan diğer önemli sınırlılık ise otomasyon sistemlerinin tam bir CPS mimarisi içerisinde bütünleşmemiş olmasıdır. Üretim sırasında arızalar otomatik olarak tespit edilebilmekte, ancak üretimin bütün aşamalarında kaynak gereksinimlerinin otomatik belirlenerek sipariş oluşturulduğu bütünleşik bir yapı bulunmamaktadır. Otomatik stok takibi yalnızca belirli malzemeler için kullanılmaktadır.

Dolayısıyla işletmede karşılaşılan temel sınırlılık teknolojinin tamamen bulunmamasından ziyade, mevcut teknolojilerin uçtan uca bütünleşik ve otonom bir üretim ekosistemi oluşturacak düzeye ulaşmamış olmasıdır.

3.4. Teknolojik ve Örgütsel Kapasite

Katılımcılar, işletmenin teknik personel, mühendislik altyapısı ve bilgi teknolojileri açısından Endüstri 4.0 uygulamalarını takip edebilecek kapasiteye sahip olduğunu belirtmektedir. Mühendislik personelinin teknolojik gelişmeleri izlediği, üretim süreçlerinin optimizasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirdiği ve dijitalleşmenin üretime sağlayabileceği katkıların değerlendirildiği ifade edilmektedir.

Üretim müdürü bu durumu şu şekilde açıklamıştır:

“Mühendis kadromuzda yer alan personellerimiz sürekli olarak teknolojik gelişmeleri takip ederek bu teknolojik gelişmelerin üretim hatlarımıza ve üretim süreçlerimize ne gibi katkı ve kolaylık sağlayabileceği konusunda... AR-GE faaliyetleri sürdürmektedirler.” (K2)

Bu bulgu, Endüstri 4.0'a hazır oluşun yalnızca fiziksel teknoloji yatırımlarına bağlı olmadığını; teknik bilgi, insan kaynağı ve örgütsel öğrenme kapasitesinin de dönüşüm sürecinin önemli bileşenleri olduğunu göstermektedir.

3.5. Gelecek Yönelimi, Yatırımlar ve Ar-Ge

Katılımcı görüşlerinde işletmenin teknolojik dönüşüme yönelik gelecekteki yatırım yaklaşımı belirgin biçimde ortaya çıkmaktadır. İşletmede otomasyon düzeyinin artırılması, çalışanların fiziksel ve zihinsel iş yükünün azaltılması ve yeni teknolojilerin üretim süreçlerine entegrasyonuna yönelik çalışmalar yürütüldüğü belirtilmiştir.

Yeni tesis yatırımlarında Endüstri 4.0 ile ilişkili teknolojilerin değerlendirilmesi de bu dönüşüm yöneliminin bir parçasıdır. Katılımcılar, başka bir tesiste yeni ekipman ve sistemlerin pilot uygulamalarının gerçekleştirildiğini ve olumlu sonuçların gelecekteki yatırımlara aktarılmasının planlandığını belirtmiştir.

Ar-Ge açısından ise araştırmanın gerçekleştirildiği dönemde tesis bünyesinde bağımsız bir Ar-Ge merkezinin bulunmadığı, grup bünyesindeki Ar-Ge merkezinden yararlanıldığı ve işletme içerisinde yeni bir Ar-Ge merkezinin kurulmasına yönelik çalışmaların devam ettiği ifade edilmiştir.

Katılımcılar Endüstri 4.0 teknolojilerinin özellikle üretim sürekliliği, çalışanların riskli veya yoğun işlerden uzaklaştırılması, otomasyon düzeyinin artırılması ve rekabet kapasitesinin geliştirilmesi açısından işletmeye katkı sağlayabileceğini değerlendirmektedir.

Bulguların tamamı birlikte değerlendirildiğinde işletmenin Endüstri 4.0 açısından **“hazır/hazır değil” biçiminde ikili bir sınıflandırmayla değerlendirilmesinin uygun olmadığı** görülmektedir. İşletme; bulut bilişim, ERP, siber güvenlik, otomasyon ve arıza izleme gibi alanlarda önemli bir dijital altyapıya sahiptir. Buna karşılık tam bütünleşik CPS yapısının bulunmaması, sensörler arası doğrudan iletişimin sınırlılığı, üretim süreçlerinde insan müdahalesine duyulan gereksinim ve kimyasal proseslerin özellikleri tam otonom üretime geçiş sınırlandırmaktadır.

4. Tartışma

Bu çalışmada, bir gübre üretim tesisinin mevcut teknolojik altyapısı Endüstri 4.0 bileşenleri açısından incelenmiş; işletmenin dijital dönüşüm kapasitesi, Endüstri 4.0'a geçiş destekleyen ve sınırlandıran unsurlar ile geleceğe yönelik teknolojik yatırım yönelimleri katılımcı görüşleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bulgular, işletmede belirgin bir dijitalleşme ve otomasyon altyapısının bulunduğunu, ancak bu altyapının henüz tam

bütünleşik ve otonom bir Endüstri 4.0 üretim sistemine dönüşmediğini göstermektedir. Bu sonuç, Endüstri 4.0'a hazır oluşun yalnızca belirli teknolojilerin işletmede bulunmasıyla açıklanamayacağını ortaya koyan güncel literatürle uyumludur. Ünlü, Demirörs ve Garousi (2024), 22 hazır oluş ve olgunluk modelini inceledikleri sistematik derlemede Endüstri 4.0'a geçişin çok boyutlu bir süreç olduğunu ve işletme kapasitesinin farklı boyutlar üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Benzer şekilde Monshizadeh, Sadeghi Moghadam, Mansouri ve Kumar (2023), teknolojik ve teknolojik olmayan unsurlar arasındaki karşılıklı ilişkilerin işletmelerin Endüstri 4.0'a hazır oluşunun değerlendirilmesinde birlikte dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Dolayısıyla bu araştırmada ortaya çıkan kademeli dönüşüm görünümü, hazır oluşun tek bir teknoloji veya ikili bir "hazır/hazır değil" sınıflandırması üzerinden değerlendirilmemesi gerektiğini desteklemektedir.

Araştırmanın dikkat çeken bulgularından biri, tesiste üretim süreçlerinin yarı otomasyon sistemiyle yürütülmesi ve kritik durumlarda insan kontrolü ile müdahalesine gereksinim duyulmasıdır. Ayrıca tesisin diğer üretim birimleriyle entegre çalışması, tam otonom bir yapıya geçişi sınırlandıran bir unsur olarak ortaya çıkmıştır. Bu bulgu, özellikle proses endüstrilerinin kendine özgü teknolojik ve operasyonel koşullarına ilişkin güncel çalışmalarla örtüşmektedir. Zhao ve diğerleri (2023), proses endüstrileri için geliştirdikleri akıllı üretim hazır oluş modelinde, bu sektörlerin Endüstri 4.0 dönüşümünün genel imalat işletmelerinden farklı özellikler taşıdığını ve hazır oluşun işletme, organizasyon, teknoloji ve akıllı üretim gibi çoklu boyutlar üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Perno, Hvam ve Haug (2022) ise proses endüstrilerinde dijital ikiz uygulamalarını inceledikleri sistematik derlemede, üretim süreçlerinin fiziksel yapısını doğru biçimde modellemenin karmaşıklığının dijital teknolojilerin uygulanmasında önemli güçlükler yarattığını belirtmektedir. Bu çerçevede mevcut araştırmanın bulguları, Endüstri 4.0'a geçişin yalnızca otomasyon düzeyinin yükseltilmesine bağlı olmadığını; kimyasal proseslerin yapısı, tesisler arasındaki bağımlılık ve operasyonel gereksinimlerin de dönüşümün sınırlarını belirlediğini göstermektedir.

Bununla birlikte, işletmenin dijital altyapısının bazı Endüstri 4.0 bileşenleri bakımından gelişmiş olduğu belirlenmiştir. Bulut tabanlı sistemlerin kullanılması, D365 tabanlı ERP sisteminin farklı işletme fonksiyonlarına yayılmış olması, siber güvenliğe yönelik kurumsal önlemler ve otomatik arıza izleme kapasitesi, işletmenin geleneksel bir üretim yapısından uzaklaştığını göstermektedir. Bununla birlikte bu teknolojilerin varlığı, tek başına ileri düzey Endüstri 4.0 olgunluğu anlamına gelmemektedir. Ünlü ve diğerleri (2024), Endüstri 4.0'ın izole ve optimize edilmiş üretim birimlerinden bütünleşik veri ve ürün akışlarına geçişi ifade ettiğini ve hazır oluş/olgunluk değerlendirmesinin örgütün bu dönüşümü gerçekleştirme kapasitesini dikkate alması gerektiğini belirtmektedir. Monshizadeh ve diğerleri (2023) de Endüstri 4.0 hazır oluşunun birbirleriyle ilişkili teknolojik ve teknolojik olmayan boyutlardan oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu açıdan araştırmanın bulguları, incelenen işletmenin bazı dijital bileşenlerde ileri kapasiteye sahip olmakla birlikte, Endüstri 4.0 dönüşümünün bütün bileşenlerinde aynı düzeye ulaşmadığı kademeli ve çok boyutlu bir dönüşüm sürecine işaret etmektedir.

Bu değerlendirmeyi destekleyen en önemli bulgulardan biri Siber-Fiziksel Sistemlere (CPS) ilişkindir. İşletmede birbirleriyle haberleşebilen otomasyon sistemleri ve bunların izlenmesini sağlayan bilgisayar sistemleri bulunmakta, üretim sürecindeki bazı arızalar otomatik olarak tespit edilebilmektedir. Bununla birlikte sensörlerin doğrudan birbirleriyle haberleştiği ve üretim süreçlerinin uçtan uca bütünleştiği bir CPS yapısının bulunmadığı belirlenmiştir. Bu sonuç, otomasyon, dijitalleşme ve Endüstri 4.0 olgunluğunun birbirinin yerine kullanılmaması gerektiğini göstermektedir. Ünlü ve diğerleri (2024), Endüstri 4.0'ın temel yönlerinden birinin izole üretim birimlerinden tam bütünleşik veri ve ürün akışlarına geçiş olduğunu vurgulamaktadır. Proses endüstrilerinde dijital ikiz uygulamalarını inceleyen Perno ve diğerleri (2022) de dijital teknolojilerin uygulanmasının yalnızca teknolojinin varlığına değil, mevcut sistemlerle bütünleşme, veri yönetimi ve proseslerin modellenebilirliği gibi çeşitli kolaylaştırıcı ve sınırlandırıcı faktörlere bağlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışmada ERP, bulut teknolojileri ve otomasyon altyapısının bulunmasına rağmen CPS bütünleşmesinin sınırlı kalması, dijital teknolojiye sahip olmak ile bütünleşik akıllı üretim yapısına ulaşmak arasındaki farkı görünür kılan önemli bir bulgudur.

Araştırmanın bir diğer bulgusu, işletmenin teknolojik dönüşüme ilişkin örgütsel farkındalık ve teknik kapasiteye sahip olmasıdır. Katılımcılar mühendislik ve bilgi işlem personelinin teknolojik gelişmeleri izlediğini, üretim süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yürüttüğünü ve yeni teknolojilerin uygulanabilirliğini değerlendirdiğini ifade etmiştir. Bu sonuç, Endüstri 4.0'a hazır oluşun yalnızca makine, sensör veya yazılım yatırımlarına indirgenemeyeceğini göstermektedir. Monshizadeh ve diğerleri (2023), geliştirdikleri hazır oluş modelinde Endüstri 4.0 dönüşümünün teknolojik ve teknolojik olmayan boyutlarının birbirleriyle ilişkili olduğunu ve bu ilişkilerin işletmenin toplam hazır oluş düzeyini etkilediğini ortaya koymaktadır. Ünlü ve diğerlerinin (2024) sistematik derlemesi de mevcut hazır oluş ve olgunluk modellerinin Endüstri 4.0 dönüşümünü

çok sayıda örgütsel ve teknolojik boyut üzerinden ele aldığını göstermektedir. Bu bakımdan incelenen işletmede teknik personelin bilgi birikimi, teknolojik gelişmeleri izleme kapasitesi ve üretim süreçlerini iyileştirmeye yönelik faaliyetleri, fiziksel teknolojik altyapıyı tamamlayan önemli bir örgütsel dönüşüm kapasitesi olarak değerlendirilebilir.

Geleceğe yönelik değerlendirmeler de işletmenin dijital dönüşümü tek aşamalı bir değişimden ziyade kademeli bir teknolojik gelişim süreci olarak ele aldığını göstermektedir. Yeni yatırımlarda otomasyon düzeyinin artırılması, çalışanların fiziksel ve zihinsel iş yükünün azaltılması, yeni teknolojilerin pilot uygulamalar yoluyla sınanması ve başarılı uygulamaların gelecekteki tesislere aktarılması bu yönelimin başlıca göstergeleridir. Bu yaklaşım, proses endüstrilerindeki dijital dönüşümün teknolojik ve örgütsel kapasitenin aşamalı olarak geliştirilmesini gerektirdiğini gösteren çalışmalarla uyumludur. Zhao ve diğerleri (2023), proses endüstrilerinde akıllı üretime hazır oluşu tek bir teknolojik göstergeden ziyade farklı boyutların birlikte geliştiği bir dönüşüm süreci olarak ele almaktadır. Benzer şekilde Perno ve diğerleri (2022), proses endüstrilerinde ileri dijital teknolojilerin uygulanmasının çeşitli teknik ve örgütsel kolaylaştırıcılarla engellerin birlikte yönetilmesini gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Bu açıdan pilot uygulamalar, Ar-Ge kapasitesi ve yeni tesis yatırımlarının birlikte planlanması, işletmenin dijital dönüşümünü aşamalı olarak geliştirebilecek mekanizmalar olarak değerlendirilebilir.

İnsan faktörüne ilişkin bulgular ise çalışmanın özellikle güncel insan-merkezli üretim ve Endüstri 5.0 tartışmalarıyla ilişkilendirilebilecek yönünü oluşturmaktadır. Katılımcılar insan gücüne dayalı bazı faaliyetlerin azaltılmasından söz etmekle birlikte, verdikleri örnekler insanın üretim sürecinden tamamen çıkarılmasından çok çalışanların fiziksel ve zihinsel iş yükünün azaltılması, riskli veya rutin işlemlerin otomasyona aktarılması ve proses kontrolünün geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu yaklaşım, Lu ve diğerlerinin (2022) insan-merkezli üretim anlayışıyla doğrudan örtüşmektedir. Araştırmacılar insan-merkezli üretimde insan-makine ilişkisinin basit birlikte varoluştan iş birliği ve ortak gelişime doğru ilerlediğini belirtmektedir. Zhang ve diğerleri (2023) de insan-merkezli akıllı üretimin insanın esnekliği ile makinelerin hassasiyetini ve dijital teknolojilerin kapasitesini birlikte kullanmayı amaçladığını vurgulamaktadır. Li, Nassehi, Wang, Hu ve Epureanu (2023) ise Industry 5.0 bağlamında insan becerileri ile üretim sistemlerinin yeteneklerinin insan-makine iş birliği yoluyla birlikte gelişmesini esas alan bir üretim yaklaşımı önermektedir. Dolayısıyla bu araştırmanın bulguları, teknolojik dönüşümün “insansız üretim” hedefi üzerinden değil, insan ile teknolojik sistemler arasındaki görev dağılımının yeniden yapılandırılması üzerinden yorumlanmasının daha uygun olduğunu göstermektedir.

Bu yorum daha güncel sistematik derlemeler tarafından da desteklenmektedir. Castagnoli, Cugno, Maroncelli ve Cugno (2024), 69 çalışmayı kapsayan sistematik derlemelerinde Industry 5.0'ın insan-merkezli yaklaşımının çalışanı teknolojik dönüşümün dışında bırakmak yerine üretim sisteminin merkezinde konumlandığını ve insan-merkezliliğin ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliğe katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde Coelho, Bessa, Landeck ve Silva (2023), Industry 5.0'ın çalışan refahını ve insan yetkinliklerini ön plana çıkaran bir yaklaşım olduğunu; dijital teknolojilerin insanı ikame etmekten çok insanın beceri ve kapasitesini destekleyecek şekilde kullanılmasının önem taşıdığını belirtmektedir. Bu bağlamda incelenen gübre tesisinde insan müdahalesinin sürdürülmesi Endüstri 4.0'a geçiş açısından yalnızca bir “eksiklik” olarak değerlendirilmemelidir. Özellikle güvenliğin kritik olduğu kimyasal proseslerde insan uzmanlığının otomasyon sistemleriyle birlikte kullanılması, insan-merkezli ve güvenli bir dijital dönüşümün bileşeni olarak da yorumlanabilir.

Genel olarak araştırma bulguları, incelenen işletmenin Endüstri 4.0'a geçiş sürecinin teknolojik varlık → sistem entegrasyonu → örgütsel kapasite → insan-teknoloji iş birliği eksenlerinde ilerleyen çok boyutlu bir dönüşüm olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, Endüstri 4.0'a hazır oluşu yalnızca kullanılan teknoloji sayısı ile değerlendirmek yerine teknolojilerin entegrasyon düzeyini, proses endüstrisine özgü kısıtları, örgütsel kapasiteyi ve insan faktörünü birlikte ele almaktadır. Bu bütüncül değerlendirme, güncel hazır oluş modellerinin teknolojik ve teknolojik olmayan unsurların birlikte değerlendirilmesi gerektiğine ilişkin yaklaşımıyla ve Industry 5.0 literatürünün insan-merkezli üretim vurgusuyla örtüşmektedir (Monshizadeh vd., 2023; Ünlü vd., 2024; Castagnoli vd., 2024).

5. Sonuç ve Öneriler

Bu araştırma sonucunda, incelenen gübre üretim tesisinin Endüstri 4.0'a geçişi destekleyebilecek belirli bir teknolojik ve örgütsel altyapıya sahip olduğu, ancak tam bütünlüklü ve otonom bir Endüstri 4.0 üretim yapısına henüz ulaşmadığı sonucuna varılmıştır. Tesiste yarı otomasyon sistemlerinin kullanılması, bulut tabanlı bilgi sistemlerinin bulunması, ERP uygulamalarının farklı işletme fonksiyonlarına yayılmış olması, siber güvenliğe

yönelik kurumsal önlemler ve otomatik arıza izleme kapasitesi dijital dönüşümü destekleyen başlıca unsurlar olarak belirlenmiştir. Buna karşılık sensörler ve üretim sistemleri arasında tam bütünleşik iletişimin bulunmaması, Siber-Fiziksel Sistemlerin sınırlı düzeyde kullanılması ve kimyasal üretim süreçlerinde insan denetimine duyulan gereksinim tam otonom üretime geçişi sınırlandırmaktadır.

Araştırmanın ortaya koyduğu temel sonuçlardan biri, dijitalleşme ile Endüstri 4.0'a hazır oluşun aynı kavramlar olmadığıdır. İşletmede farklı dijital teknolojilerin kullanılması önemli bir dönüşüm kapasitesine işaret etmekle birlikte, Endüstri 4.0 açısından belirleyici olan bu teknolojilerin üretim süreçleriyle ve birbirleriyle ne ölçüde bütünleştiğidir. Bu nedenle işletmenin mevcut durumu “Endüstri 4.0'a uygun” veya “uygun değil” biçimindeki ikili bir sınıflandırmadan ziyade, farklı teknolojik bileşenlerde farklı düzeylerde ilerleyen kademeli bir dijital dönüşüm süreci olarak değerlendirilmelidir.

Uygulama açısından işletmenin öncelikle mevcut otomasyon, ERP, bulut bilişim ve üretim sistemleri arasındaki veri bütünleşmesini güçlendirmesi; sensör tabanlı izleme ve makineler arası iletişim kapasitesini geliştirmesi önerilebilir. Özellikle mevcut sistemlerden üretilen verilerin yalnızca izleme ve depolama amacıyla değil, kestirimci bakım, süreç optimizasyonu ve karar desteği gibi alanlarda kullanılmasına yönelik uygulamaların geliştirilmesi, dijital dönüşümün daha ileri bir düzeye taşınmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte kimyasal üretim tesislerinin proses güvenliği dikkate alınarak, teknolojik dönüşümün insan kontrolünü tamamen ortadan kaldırmaya yönelik değil, insan-makine iş birliğini güçlendiren güvenli bir otomasyon yaklaşımı çerçevesinde yürütülmesi daha uygun olacaktır.

İşletmenin yeni tesis ve Ar-Ge yatırımlarında Endüstri 4.0 bileşenlerinin başlangıç aşamasından itibaren üretim tasarımına dâhil edilmesi de önem taşımaktadır. Katılımcıların başka tesislerde gerçekleştirilen pilot uygulamalara ve yeni teknolojilerin denenmesine ilişkin açıklamaları, işletmenin bu yönde bir dönüşüm kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu süreçte teknik personelin dijital üretim, veri analitiği, Siber-Fiziksel Sistemler, endüstriyel IoT ve siber güvenlik alanlarındaki yetkinliklerinin geliştirilmesi, teknolojik yatırımların etkin kullanımını destekleyebilir.

Araştırmanın sonuçları aynı zamanda Endüstri 4.0 dönüşümünün yalnızca teknoloji yatırımı olarak değerlendirilmemesi gerektiğine işaret etmektedir. Teknolojik altyapının yanında nitelikli insan kaynağı, Ar-Ge kapasitesi, örgütsel öğrenme, yatırım planlaması ve dijital dönüşüm stratejisinin birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle işletmelerin Endüstri 4.0'a geçiş süreçlerinde mevcut teknolojik kapasitelerini belirli aralıklarla değerlendirmeleri ve teknolojik yatırımlarını üretim süreçlerinin özellikleriyle uyumlu bir yol haritası çerçevesinde planlamaları önerilmektedir.

Araştırmanın Sınırlılıkları ve Gelecek Araştırmalar

Araştırmanın bulguları, tek bir gübre üretim tesisi ile bu tesiste üretim, otomasyon ve bilgi sistemleri alanlarında görev yapan dört katılımcının görüşlerine dayanmaktadır. Bu nedenle sonuçların farklı işletmelere ve sektörlerle genellenmesi amaçlanmamaktadır. Ayrıca işletmenin Endüstri 4.0'a hazır oluşu standartlaştırılmış nicel bir olgunluk modeli kullanılarak ölçülmemiş; katılımcıların deneyimleri ve işletmenin araştırmanın gerçekleştirildiği dönemdeki mevcut teknolojik altyapısı üzerinden nitel olarak değerlendirilmiştir.

Gelecek araştırmalarda farklı kimyasal üretim tesislerinin dâhil edildiği **çoklu durum çalışmaları** gerçekleştirilebilir ve tesisler arasındaki teknolojik dönüşüm süreçleri karşılaştırılabilir. Ayrıca nitel görüşmelerin standartlaştırılmış Endüstri 4.0 olgunluk modelleri, teknolojik altyapı göstergeleri ve üretim performansı verileriyle birlikte değerlendirildiği **karma yöntem araştırmaları** yürütülebilir. Boylamsal araştırmalarla işletmelerin otomasyon, veri bütünleşmesi, CPS, yapay zekâ ve diğer dijital üretim teknolojilerine ilişkin dönüşümlerinin zaman içerisindeki gelişimi de incelenebilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı (Author Contributions)

Bu çalışma tek yazar tarafından yürütülmüştür.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Bu araştırmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Etik Kurul Onayı (Ethics Approval)

Bu çalışma, Samet Tanrıverdi'nin Dr. Öğr. Üyesi Emre Aslan danışmanlığında Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İşletme Anabilim Dalında 2021 yılında tamamladığı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Finansal Destek (Funding)

Bu çalışma herhangi bir kurum veya kuruluş tarafından desteklenmemiştir.

Kaynakça

- Alçın, S. (2016). Üretim için yeni bir izlek: Sanayi 4.0. *Yaşam Ekonomisi Dergisi*, 3(2), 19–30.
- Barutçu, H. C. (2019). *Endüstri 4.0 uygulamalarının üretim süreçlerine etkisi: Bosch Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi örneği* (Yayımlanmış yüksek lisans tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 perspective. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 8(1), 37–44.
- Castagnoli, R., Cugno, M., Maroncelli, S., & Cugno, A. (2024). A new research agenda for human-centric manufacturing: A systematic literature review. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 15236–15253. doi:10.1109/TEM.2024.3479775
- Chiang, L. H., Braun, B., Wang, Z., & Castillo, I. (2022). Towards artificial intelligence at scale in the chemical industry. *AIChE Journal*, 68(6), e17644. doi:10.1002/aic.17644
- Coelho, P., Bessa, C., Landeck, J., & Silva, C. (2023). Is Industry 5.0 a human-centred approach? A systematic review. *Processes*, 11(1), 193. doi:10.3390/pr11010193
- Çıkdın, M. B. (2018). *İşletmelerin organizasyon yapısı ve kaynakları açısından Endüstri 4.0 eğiliminin değerlendirilmesi: Antalya ili örneği* (Yayımlanmış yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Antalya.
- Dafflon, B., Moalla, N., & Ouzrout, Y. (2021). The challenges, approaches, and used techniques of CPS for manufacturing in Industry 4.0: A literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 2395–2412. doi:10.1007/s00170-020-06572-4
- Feise, H. J., & Schaer, E. (2021). Mastering digitized chemical engineering. *Education for Chemical Engineers*, 34, 78–86. doi:10.1016/j.ece.2020.11.011
- Lemstra, M. A. M. S., & de Mesquita, M. A. (2023). Industry 4.0: A tertiary literature review. *Technological Forecasting and Social Change*, 186, 122204. doi:10.1016/j.techfore.2022.122204
- Li, X., Nassehi, A., Wang, B., Hu, S. J., & Epureanu, B. I. (2023). Human-centric manufacturing for human-system coevolution in Industry 5.0. *CIRP Annals*, 72(1), 393–396. doi:10.1016/j.cirp.2023.04.039
- Lu, Y., Zheng, H., Chand, S., Xia, W., Liu, Z., Xu, X., Wang, L., Qin, Z., & Bao, J. (2022). Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 612–627. doi:10.1016/j.jmsy.2022.02.001
- Monshizadeh, F., Sadeghi Moghadam, M. R., Mansouri, T., & Kumar, M. (2023). Developing an Industry 4.0 readiness model using fuzzy cognitive maps approach. *International Journal of Production Economics*, 255, 108658. doi:10.1016/j.ijpe.2022.108658
- Öztuna, B. (2017). *Endüstri 4.0 (Dördüncü Sanayi Devrimi) ile çalışma yaşamının geleceği*. Ankara: Gece Kitaplığı.
- Perno, M., Hvam, L., & Haug, A. (2022). Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Computers in Industry*, 134, 103558. doi:10.1016/j.compind.2021.103558
- Sahoo, S., & Lo, C.-Y. (2022). Smart manufacturing powered by recent technological advancements: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 236–250. doi:10.1016/j.jmsy.2022.06.008
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161–166. doi:10.1016/j.procir.2016.07.040
- Şener, S., ve Elevli, B. (2017). Endüstri 4.0'da yeni iş kolları ve yüksek öğrenim. *Mühendis Beyinler Dergisi*, 2(1), 1–13.
- TÜBİTAK. (2016). *Yeni sanayi devrimi: Akıllı üretim sistemleri teknoloji yol haritası*. Ankara: TÜBİTAK.
- Ünlü, H., Demirörs, O., ve Garousi, V. (2024). Readiness and maturity models for Industry 4.0: A systematic literature review. *Journal of Software: Evolution and Process*, 36(7), e2641. doi:10.1002/smr.2641
- Zhang, C., Wang, Z., Zhou, G., Chang, F., Ma, D., Jing, Y., Cheng, W., Ding, K., & Zhao, D. (2023). Towards new-generation human-centric smart manufacturing in Industry 5.0: A systematic review. *Advanced Engineering Informatics*, 57, 102121. doi:10.1016/j.aei.2023.102121
- Zhao, L., Shao, J., Qi, Y., Chu, J., & Feng, Y. (2023). A novel model for assessing the degree of intelligent manufacturing readiness in the process industry: Process-industry intelligent manufacturing readiness index (PIMRI). *Frontiers of Information Technology ve Electronic Engineering*, 24(3), 417–432. doi:10.1631/FITEE.2200080

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rapid developments in digital technologies have substantially transformed manufacturing systems, organizational processes, and the ways in which firms respond to global competition. Within this transformation, Industry 4.0 represents an approach that goes beyond conventional automation by integrating physical production systems with digital technologies, data, machines, and information systems. Technologies such as Cyber-Physical Systems (CPS), the Internet of Things (IoT), cloud computing, sensors, big data, artificial intelligence, and advanced automation provide the technological foundation for increasingly connected and data-driven manufacturing environments.

However, the readiness of a manufacturing organization for Industry 4.0 cannot be assessed solely on the basis of whether individual digital technologies are available. The extent to which these technologies are integrated into production processes, communicate with one another, support organizational decision-making, and contribute to a sustainable digital transformation process is also important. Organizational capabilities, technical human resources, cybersecurity infrastructure, R&D activities, and investment strategies therefore constitute important dimensions of Industry 4.0 readiness.

These issues are particularly relevant to chemical manufacturing plants, where continuous production processes, process safety requirements, interdependencies among production units, and the need for human intervention in critical situations may constrain the implementation of fully autonomous production systems. Accordingly, Industry 4.0 transformation should be considered within the specific technological and operational context of an organization rather than as a standardized process that occurs in the same way across industries.

Against this background, this study aimed to examine the existing technological infrastructure of a fertilizer production plant in Samsun, Türkiye, in terms of Industry 4.0 components, identify the technological and organizational factors supporting and constraining its transition to Industry 4.0, and explore its future technological transformation and investment plans. More specifically, the study addressed four research questions concerning (a) the current technological infrastructure of the plant in relation to Industry 4.0 components, (b) the technological and organizational capabilities supporting the transition, (c) the technical, sectoral, and organizational factors constraining the transition, and (d) future investment and transformation plans.

Method

The study was designed as a qualitative case study. The case examined was the technological readiness for Industry 4.0 of an ammonium sulfate fertilizer production plant located in Samsun, Türkiye. The plant, which became operational in 2014, operates as part of an integrated manufacturing structure and was selected because of its relatively recent technological infrastructure.

Four participants with direct knowledge and experience of the plant's production processes, automation infrastructure, information systems, and technological transformation practices participated in the study. These participants were the fertilizer plant chief engineer, the production manager, the automation systems chief engineer, and the information technology officer. Participants were selected purposively on the basis of their expertise and responsibilities related to different dimensions of Industry 4.0 readiness.

Data were collected through face-to-face, in-depth interviews using a semi-structured interview form developed by the researcher. The interview questions addressed the plant's production approach, existing technological infrastructure, use of Industry 4.0 technologies, automation systems, cloud computing, cybersecurity, Cyber-Physical Systems, Enterprise Resource Planning (ERP), R&D activities, human resources, and future technological investment plans. With the participants' permission, the interviews were audio-recorded.

The interview data were analyzed using a descriptive analysis approach. An analytical framework was developed in accordance with the purpose and research questions of the study. Similar participant statements were organized and interpreted under thematic categories, and direct quotations were used to establish a clear connection between the findings and the participants' accounts. The findings were organized into five main themes: (1) current technological infrastructure and level of automation, (2) digital infrastructure and Industry 4.0 components, (3) factors constraining the transition to Industry 4.0, (4) technological and organizational capabilities, and (5) future orientation, investment, and R&D.

Findings

The findings indicated that the plant has a notable level of automation and digital infrastructure, although

it has not yet achieved a fully integrated and autonomous Industry 4.0 production structure. Production processes are largely operated through a semi-automated system. Automation technologies are used to monitor production parameters, control processes, and detect system failures. Nevertheless, human supervision continues to play an important role because of the characteristics of chemical production processes and the integrated structure of the plant.

With regard to digital infrastructure, the findings showed that several technologies associated with Industry 4.0 are already in use. Cloud-based systems are utilized for data management, while a Microsoft-based D365 ERP system supports different organizational functions, including accounting and finance, human resources, purchasing, inventory management, occupational health and safety, and production. The plant also has institutional cybersecurity measures aimed at protecting information systems and maintaining system continuity.

However, the level of integration regarding Cyber-Physical Systems remains limited. Although automation systems communicate with computers and production failures can be automatically detected, the plant does not have a fully integrated structure in which sensors directly communicate with one another. Similarly, automated inventory monitoring is available for certain materials, but resource requirements and procurement processes are not fully automated throughout all stages of production. These findings indicate that the plant possesses important elements of digitalization and automation but has not yet established an end-to-end integrated and autonomous production ecosystem.

Another major finding concerns the sector-specific constraints on Industry 4.0 transformation. Participants emphasized that the chemical nature of production requires human judgment and intervention in critical situations. In addition, the interdependence of different production facilities creates operational conditions that make fully autonomous production difficult. Thus, the main constraint does not appear to be the complete absence of digital technology, but rather the limited integration of existing technologies and the operational requirements specific to chemical manufacturing.

The findings also revealed considerable technological and organizational capacity for further digital transformation. Participants reported that engineering and information technology personnel follow technological developments, evaluate opportunities for production optimization, and conduct activities aimed at improving production processes. Future investment plans include increasing the level of automation, reducing employees' physical and cognitive workload, testing new technologies, and transferring successful pilot applications to future facilities. The organization also benefits from R&D capabilities at the group level and, at the time of the study, was working toward establishing an R&D center within the facility.

Discussion

The findings suggest that digitalization, automation, and Industry 4.0 readiness should not be treated as equivalent concepts. The presence of automation systems, cloud technologies, ERP applications, cybersecurity infrastructure, and automated fault detection demonstrates a substantial digital transformation capacity. Nevertheless, the defining issue for more advanced Industry 4.0 readiness is the extent to which these technologies are integrated with production processes and with one another.

In this respect, the case examined in this study represents a gradual digital transformation process rather than a binary state of being either ready or unready for Industry 4.0. The plant demonstrates relatively advanced capabilities in certain areas, such as cloud computing, ERP, cybersecurity, automation, and fault monitoring, while limitations remain in areas such as fully integrated CPS architecture, direct sensor-to-sensor communication, and autonomous production.

The findings further indicate that the human factor should not simply be interpreted as an obstacle to Industry 4.0. In chemical manufacturing, human supervision may remain necessary because of process safety requirements and the need for judgment in critical situations. Accordingly, the transformation observed in the plant can be interpreted less as the complete elimination of human involvement and more as a reconfiguration of the division of tasks between humans and technological systems. Automation can reduce routine, physically demanding, or potentially risky activities while human expertise continues to contribute to supervision, intervention, and decision-making.

Conclusions and Recommendations

The study concludes that the fertilizer production plant has a technological and organizational infrastructure that can support further transition toward Industry 4.0, but it has not yet achieved a fully integrated and autonomous Industry 4.0 production structure. Semi-automated production systems, cloud-based information technologies, ERP applications, cybersecurity measures, and automated fault-monitoring capabilities constitute important strengths. Conversely, limited integration among sensors and production systems, the partial use of

Cyber-Physical Systems, and the continuing need for human supervision in chemical production processes constrain the development of fully autonomous production.

The findings indicate that the plant's current position should be interpreted as a gradual and multidimensional digital transformation process rather than classified simply as Industry 4.0-ready or not ready. Future technological investments should therefore focus on strengthening data integration among automation, ERP, cloud, and production systems; expanding sensor-based monitoring and machine-to-machine communication; and making greater use of production data for process optimization, decision support, and predictive maintenance.

Future investments should also consider the specific safety requirements of chemical manufacturing. Rather than pursuing automation solely for the purpose of eliminating human involvement, a safer and more sustainable approach would be to strengthen human-machine collaboration and transfer routine or potentially hazardous tasks to technological systems while maintaining appropriate human supervision.

The study is limited to a single fertilizer production plant and the perspectives of four participants with responsibilities in production, automation, and information systems. Therefore, the findings are intended to provide a context-specific understanding rather than statistical generalization. Future research may employ multiple-case designs involving different chemical manufacturing facilities, compare Industry 4.0 transformation processes across sectors, or combine qualitative evidence with standardized Industry 4.0 maturity models and quantitative technological performance indicators. Longitudinal studies may also provide valuable evidence regarding how organizations progress over time in automation, data integration, Cyber-Physical Systems, artificial intelligence, and other digital manufacturing technologies.

EK 1. YARI YAPILANDIRILMIŞ GÖRÜŞME FORMU

Bu görüşme formu, işletmelerin **Endüstri 4.0 teknolojilerini kullanım durumlarını, dijital dönüşüm süreçlerini, teknolojik altyapılarını, üretim yönetimi uygulamalarını ve Endüstri 4.0'a yönelik hazırlık düzeylerini** belirlemek amacıyla hazırlanmıştır. Görüşme kapsamında aşağıdaki sorular katılımcılara yöneltilmiştir.

1. İşletmenizde hangi üretim yaklaşımı kullanılmaktadır? Bu üretim yaklaşımı içerisinde Endüstri 4.0 uygulamalarının yeri nedir?
2. Endüstri 4.0; internet, elektronik sistemler, yazılımlar ve sensörlerle donatılmış fiziksel nesnelerin birbiriyle bağlantılı bir yapı oluşturması ve bu yapı içerisinde sürekli veri ve bilgi alışverişinin gerçekleştirilmesiyle ilişkilendirilmektedir. Bu çerçevede işletmenizde Endüstri 4.0 teknolojileri uygulanmakta mıdır? Uygulanıyorsa hangi alanlarda kullanılmaktadır?
3. İşletmenizin Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm teknolojilerine yönelik mevcut veya geleceğe dönük bir yatırım planı bulunmakta mıdır? Varsa bu yatırımların kapsamını açıklayabilir misiniz?
4. Son yıllarda üretim süreçlerinize hangi yeni nesil teknolojileri eklediniz? Bu teknolojilerin üretim süreçlerinde nasıl kullanıldığını açıklayabilir misiniz?
5. Endüstriyel dijital dönüşüm sürecinde işletmenizin ve üretim yönetiminizin başarılı olabilmesi için hangi gereksinimlerin karşılanması gerektiğini düşünüyorsunuz?
6. Üretim yönetimi süreçlerinizi Endüstri 4.0'a uyumlu hâle getirmeye yönelik yürüttüğünüz veya geçmişte gerçekleştirdiğiniz çalışmalar bulunmakta mıdır? Varsa bu uygulamalar sonucunda işletmenizin insan kaynağı gereksiniminde herhangi bir değişiklik meydana gelmiş midir?
7. İşletmenizin mevcut bilgi sistemleri altyapısını Endüstri 4.0 uygulamalarına uygunluk açısından nasıl değerlendiriyorsunuz?
8. Bulut bilişim, Endüstri 4.0'ın önemli teknolojik bileşenlerinden biridir. İşletmenizde verilerin depolanması, işlenmesi veya paylaşılması amacıyla bulut tabanlı bilişim sistemleri kullanılmakta mıdır? Kullanılıyorsa hangi amaçlarla kullanılmaktadır?
9. Endüstri 4.0 uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte siber güvenlik önemli bir gereksinim hâline gelmektedir. İşletmenizde olası siber saldırı ve güvenlik tehditlerine karşı ne tür önlemler alınmaktadır? Mevcut önlemleri yeterli buluyor musunuz?
10. İşletmenizin üretim altyapısı, bilgi sistemleri, organizasyonel yapısı, insan kaynağı ve diğer mevcut kaynakları dikkate alındığında, Endüstri 4.0'a geçiş konusundaki mevcut kapasitenizi nasıl değerlendiriyorsunuz?
11. Endüstri 4.0 ve benzeri dijital teknolojilerin işletmenize ne tür katkılar sağlayabileceğini düşünüyorsunuz? Açıklayabilir misiniz?
12. Siber-Fiziksel Sistemler (Cyber-Physical Systems-CPS), fiziksel süreçlerin bilgi ve iletişim teknolojileriyle bütünleştirildiği ve sistemlerin ağ üzerinden birbirleriyle iletişim kurabildiği Endüstri 4.0 bileşenlerinden biridir. İşletmenizde Siber-Fiziksel Sistemlerden yararlanılmakta mıdır? Yararlanılıyorsa hangi süreçlerde kullanılmaktadır?
13. Üretimin herhangi bir aşamasında ortaya çıkan kaynak veya malzeme ihtiyacının otomatik olarak belirlenmesi ve sipariş edilmesi ya da üretim sistemlerindeki arızaların anlık olarak tespit edilmesi gibi süreçlerde otomatik veya Siber-Fiziksel Sistemlerden yararlanılmakta mıdır? Varsa uygulamaları açıklayabilir misiniz?
14. İşletmenizde **Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP)** veya benzeri bütünleşik yönetim yazılımları kullanılmakta mıdır? Kullanılıyorsa bu sistemlerin üretim ve yönetim süreçlerindeki rolünü açıklayabilir misiniz?
15. İşletmeniz bünyesinde bir **Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) merkezi veya birimi** bulunmakta mıdır? Bulunuyorsa bu birimin dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0 çalışmalarındaki rolü nedir?
16. Son olarak, araştırma kapsamında değerlendirilen tesisin **üretim alanı, üretim kapasitesi, temel faaliyetleri, teknolojik altyapısı ve organizasyonel özellikleri** hakkında genel bilgi verebilir misiniz?