



CMMI SERTİFİKALI BT ŞİRKETLERİNİN ENDÜSTRİ 4.0'A HAZIRLIK DURUMU: KOLAY ÖLÇÜM İÇİN BİR YÖNTEM ÖNERİSİ

Hakan YILDIRIM ¹, Cihan ÜNAL^{2*}

¹ Beykent Üniversitesi, Mimarlık Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
İstanbul

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5959-2691>

² Hacettepe Üniversitesi, Başkent OSB Teknik Bilimler MYO, Bilgisayar Programcılığı
Bölümü, Ankara

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5255-4078>

Anahtar Kelimeler

Öz

Endüstri 4.0, CMMI, süreç yönetimi, kalite güvencesi, dijital dönüşüm

Bu makale, CMMI (Capability Maturity Model Integration-Yetenek Olgunluk Modeli Entegrasyonu) sertifikalı BT (Bilgi Teknolojileri) şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık durumlarını değerlendirmek için karşılaştırmalı ve sistematik bir yöntem önermektedir. CMMI, yazılım süreç yönetimi ve kalite güvencesi için geliştirilmiş uluslararası bir standart olup, günümüzde BT sektörü başta olmak üzere birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hâlihazırda on binden fazla BT şirketi CMMI sertifikasına sahiptir ve bu şirketlerin süreç yönetimi konusundaki yetkinlikleri, Endüstri 4.0 gibi dijital dönüşüm süreçlerine ne kadar hazır olduklarını anlamada önemli bir rol oynamaktadır.

CMMI'nin Seviye 4 ve Seviye 5 düzeylerine sahip olan şirketlerin, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği yüksek otomasyon, veriye dayalı karar alma süreçleri ve ileri teknoloji entegrasyonuna sahip olma zorunluluğu vurgulanmaktadır. Bu makalede, CMMI kriterlerine dayalı bir Endüstri 4.0 hazırlık seviyesini ölçmek için kullanılan bir çerçeve sunulmaktadır. Bu çerçeve, BT sektörünün ötesine geçerek diğer sektörlere de uygulanabilir potansiyele sahiptir. Önerilen yöntem, CMMI'nin çeşitli alanlara uyarlanmış yaklaşımlarını kullanarak, Endüstri 4.0 için gerekli olan dönüşüm süreçlerini yönetmede rehberlik edebilecek bir model ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, CMMI'nin süreç iyileştirme yeteneklerinden yararlanarak, şirketlerin Endüstri 4.0'a hazırlık seviyelerini objektif bir şekilde ölçülebilmektir. Önerilen modelin BT sektöründe başarılı bir şekilde uygulanabileceği, daha sonra diğer sanayi dallarında da genişletilebileceği belirtilmektedir.

* cihan.unal@hacettepe.edu.tr
doi : 10.46399/muhendismakina.1456837

READINESS OF CMMI LEVEL 4-5 CERTIFIED IT COMPANIES FOR INDUSTRY 4.0: A SYSTEMATIC EVALUATION AND MEASUREMENT APPROACH

Keywords

Industry 4.0, CMMI, process management, quality assurance, digital transformation

Abstract

This article proposes a comparative and systematic method for evaluating the readiness of CMMI (Capability Maturity Model Integration) certified IT companies for Industry 4.0. CMMI is an international standard developed for software process management and quality assurance and is widely used across many sectors, particularly in the IT industry. Currently, more than ten thousand IT companies hold CMMI certification, and the capabilities of these companies in process management play a critical role in determining their readiness for digital transformation processes like Industry 4.0.

It is emphasized that companies with CMMI Level 4 and Level 5 certifications are required to have high levels of automation, data-driven decision-making processes, and advanced technology integration, which are key requirements for Industry 4.0. The article presents a framework based on CMMI criteria to measure the Industry 4.0 readiness level. This framework is not limited to the IT sector but also has the potential to be applied in other industries. The proposed method utilizes adapted approaches from CMMI to provide guidance in managing the transformation processes necessary for Industry 4.0.

The main objective of this study is to leverage the process improvement capabilities of CMMI to objectively measure companies' readiness for Industry 4.0. While the model is particularly applicable to the IT sector, it is also suggested that it can be expanded to other industries.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 21.03.2024

Kabul Tarihi : 21.10.2024

Research Article

Submission Date : 21.03.2024

Accepted Date : 21.10.2024

Extended Abstract

Introduction

This study focuses on evaluating the readiness of Capability Maturity Model Integration (CMMI) certified IT companies for Industry 4.0. The research aims to provide a systematic approach that aligns the objectives of Industry 4.0 with the processes defined at CMMI Levels 4 and 5. CMMI, originally developed as a framework for software process management and quality assurance, has evolved into a global standard applicable across various industries. More than 10,000 IT companies worldwide hold CMMI certification, demonstrating their process management competencies, which are critical for adapting to the technological demands of Industry 4.0.

Industry 4.0 represents the fourth industrial revolution, characterized by cyber-physical systems, the Internet of Things (IoT), and advanced technologies like Artificial Intelligence (AI) and big data. Companies certified at CMMI Levels 4 and 5 are considered well-prepared to meet Industry 4.0 requirements, such as automation, data-driven decision-making, and technology integration. However, assessing their actual readiness for this digital transformation necessitates a comparative framework based on CMMI criteria.

Methodology

The research adopts a comparative analysis method, examining how CMMI processes, particularly at Levels 4 and 5, overlap with Industry 4.0 requirements. The methodology includes the following steps:

Literature Review

Academic studies on CMMI and Industry 4.0 were reviewed to understand the technological requirements and process management capabilities in these frameworks.

Data Sources: Case studies of IT companies with CMMI certification and their adoption of Industry 4.0 technologies were collected. These companies' progress in digital transformation was analyzed.

Tabular Comparison

A table was developed to compare the processes and technologies outlined in CMMI Levels 4 and 5 with the key principles of Industry 4.0, such as interoperability, virtualization, and real-time operation.

Case Analysis

Selected IT companies with high CMMI maturity were studied to assess their performance in adopting Industry 4.0 technologies.

Data Analysis

Qualitative methods were used to evaluate the technological advancements and process management benefits provided by CMMI in relation to Industry 4.0.

Results Evaluation

The effectiveness of CMMI in facilitating the digital transition to Industry 4.0 was measured, and recommendations for applying this framework to other sectors were provided.

Findings

The study reveals that CMMI-certified companies, especially those at Levels 4 and 5, are generally well-equipped to implement Industry 4.0 technologies. These companies already possess advanced process management systems, enabling them to seamlessly integrate AI, IoT, and other innovations. The comparative framework developed in this research provides a clear method for assessing a company's readiness for Industry 4.0 based on CMMI criteria. Notably:

CMMI's emphasis on process optimization aligns closely with the data-driven nature of Industry 4.0.

Automation and real-time monitoring, key to Industry 4.0, are already foundational elements in CMMI Level 4 and 5-certified companies.

The study identifies that using CMMI to evaluate Industry 4.0 readiness is not only feasible in IT but can be adapted to other industries, such as manufacturing and healthcare.

Discussion

The study's findings highlight the compatibility between CMMI Level 4-5 processes and Industry 4.0 requirements, particularly in IT companies. However, some gaps between the two frameworks need further exploration. For example, while CMMI is highly effective in software process management, its application to physical industries that require advanced robotics and autonomous systems may require additional adjustments.

Additionally, the study raises questions about the adaptability of CMMI in non-IT sectors. While CMMI offers strong process optimization tools, the unique challenges of Industry 4.0—such as integrating physical systems with digital networks—may require supplementary frameworks.

Another consideration is the human factor in Industry 4.0. CMMI, particularly at higher levels, focuses on continuous improvement and reducing human error. However, Industry 4.0 emphasizes human-machine collaboration, which may necessitate modifications to traditional CMMI frameworks to fully address this aspect.

Ultimately, while CMMI provides a solid foundation for assessing Industry 4.0 readiness, the study suggests that sector-specific adaptations may be necessary to fully realize the potential of this framework in diverse industrial environments.

Conclusion

The findings suggest that CMMI provides a robust framework for assessing and enhancing Industry 4.0 readiness. The advanced process management capabilities outlined in CMMI Levels 4 and 5 support companies in meeting the complex technological demands of the fourth industrial revolution. While the study focuses on IT companies, the proposed model can be applied to other sectors to measure and improve their digital transformation efforts.

This research highlights the value of CMMI as a tool for achieving Industry 4.0 objectives, offering a clear pathway for companies to enhance their competitiveness in the rapidly evolving digital landscape.

1. Giriş

Standartlar, insanlık tarihinin her aşamasında çeşitli alanlarda düzenleme ve iyileştirme amacıyla kullanılmıştır. Genel olarak ikiye ayrılan bu standartlar, zorunlu düzenleyici standartlar ve gönüllü standartlar olarak bilinir. Zorunlu standartlar yasal gereklilikler içerirken, gönüllü standartlar teşvik edici yapıları ve rekabet avantajı sağlama potansiyelleri nedeniyle geniş kabul görür (Schwab, 2016). Bu bağlamda, dijitalleşmenin yükselişiyle birlikte Endüstri 4.0 gibi yeni standartlar, sektörler arası bir dönüşüm hareketi yaratmıştır. Bu hareket, üretim ve hizmet sektörlerinde dijitalleşme, otomasyon ve veri odaklı süreçlerin entegrasyonuna odaklanmaktadır. Endüstri 4.0, 2011 yılında Almanya'daki Hannover Fuarı'nda tanıtılmasından bu yana hızla yaygınlaşmış ve sanayinin geleceğini şekillendiren devrimsel bir süreç olarak kabul görmüştür (Schwab, 2016).

Endüstri 4.0 kavramı, dijitalleşmenin getirdiği yeniliklerle birlikte, iş dünyasında köklü bir değişim anlamına gelir. Bu değişim, Yapay Zeka (YZ), Nesnelerin İnterneti (NiT), otonom robotlar, 3D yazıcılar ve artırılmış gerçeklik gibi teknolojilerin entegrasyonu ile mümkün olmuştur. Ancak, her sektörün bu teknolojileri ne ölçüde ve hangi hızda benimsediği büyük bir sorudur. Örneğin, otomotiv sektöründe otonom robotlar ve 3D yazıcılar ön plana çıkarken, sağlık ve havacılık gibi sektörlerde Yapay Zekâ ve Nesnelerin İnterneti daha kritik rol oynayabilir.

Bu dönüşüm süreci sadece teknolojik altyapı ile sınırlı kalmamakta, aynı zamanda şirketlerin süreç yönetimi olgunluklarına da bağlıdır. Bu noktada, yazılım sektöründen başlayarak süreç iyileştirme ve kalite kontrolüne odaklanan bir model olan CMMI (Capability Maturity Model Integration), Endüstri 4.0'a uyum sağlama sürecinde önemli bir rol oynayabilir. CMMI, organizasyonların süreç yönetiminde olgunlaşmalarını sağlarken, aynı zamanda dijitalleşme ve otomasyon süreçlerinde yüksek verimlilik elde etmelerine olanak tanır.

CMMI, başlangıçta Carnegie Mellon Üniversitesi'ne bağlı Software Engineering Institute (SEI) tarafından yazılım üretim süreçlerinde kaliteyi artırmak ve süreç yönetimini standart hale getirmek amacıyla geliştirilmiştir. SEI'nin Yetenek Olgunluk Modeli (CMM), yazılım geliştirme süreçlerindeki boşlukları doldurmak için icat edilmiştir ve ardından daha geniş bir kapsamda CMMI adıyla evrilmiştir (SEI, 2021). CMMI, organizasyonların süreç yönetiminde bir olgunluk seviyesi elde etmelerine ve bu seviyeyi sürekli olarak iyileştirmelerine olanak sağlar. İlk olarak yazılım sektöründe kullanılan bu model, zamanla farklı endüstrilere de uygulanabilir hale gelmiştir.

Endüstri 4.0, dijitalleşmeye dayalı olarak sanayi devrimlerinin dördüncü aşaması olarak kabul edilirken, bu yeni çağın gereksinimlerini karşılamak için organizasyonların süreçlerini olgunlaştırmaları ve dijital teknolojilere uyum sağlamaları gerekmektedir. CMMI 4 ve 5 seviyelerine ulaşmış organizasyonlar, Endüstri 4.0'ın

gerektirdiği dijitalleşmeye daha hazırdır. Çünkü CMMI'ın sunduğu süreç iyileştirme ve kalite kontrol mekanizmaları, Endüstri 4.0'da kritik olan otomasyon, veri temelli karar alma ve ileri teknoloji entegrasyonu gibi unsurları destekler.

Bu bağlamda, CMMI 4-5 seviyeleri, bir organizasyonun süreç yönetiminde yüksek olgunluk seviyesine ulaştığını gösterir. Bu olgunluk, sadece yazılım geliştirme süreçlerinde değil, aynı zamanda üretim ve hizmet sektörlerindeki dijital dönüşüm süreçlerinde de başarı sağlar. CMMI'ın sürekli iyileştirme prensipleri, organizasyonların Endüstri 4.0'ın gereksinimlerine uyum sağlamalarına yardımcı olur ve bu sayede dijital dönüşüm süreçlerinde yüksek verimlilik elde edilebilir.

Mevcut literatür incelendiğinde, CMMI'ın Endüstri 4.0'a olan etkisine dair yeterli araştırma yapılmadığı görülmektedir. Özellikle, CMMI 4-5 seviyelerine sahip BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazır olup olmadıkları konusunda önemli bir bilgi eksikliği mevcuttur. Bu çalışma, bu bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlayarak, aşağıdaki araştırma sorularına yanıt arayacaktır:

CMMI 4-5 seviyelerine sahip BT şirketleri, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği dijital dönüşüm, otomasyon ve veri temelli karar alma süreçlerine ne kadar hazırdır?

CMMI olgunluk seviyeleri, BT dışındaki sektörlerde Endüstri 4.0'a geçişte nasıl uygulanabilir ve etkili bir çerçeve sunabilir?

CMMI'nın sunduğu süreç olgunluğu, Endüstri 4.0'ın gereksinimlerini karşılamak için yeterli midir, yoksa bu iki model arasında belirli uyumsuzluklar veya eksiklikler mevcut mudur?

Bu çalışmanın amacı, CMMI 4-5 seviyelerine sahip BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık durumlarını değerlendirmek ve bu modelin diğer sektörlerde uygulanabilirliğini incelemektir. CMMI süreç yönetimi ve kalite güvencesi kriterlerinin, Endüstri 4.0'ın ileri teknoloji gereksinimlerini nasıl desteklediği analiz edilerek, objektif bir değerlendirme çerçevesi sunulacaktır. Bu doğrultuda, CMMI olgunluk seviyelerine sahip şirketlerin dijital dönüşüme ne kadar hazır olduğu ortaya konulacak ve Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde kullanabilecekleri kolaylaştırıcı unsurlar tartışılacaktır.

Daha önce SEI tarafından geliştirilen CMMI çerçevesi, yalnızca yazılım süreçlerini değil, aynı zamanda süreç yönetimi olgunluğunu gerektiren diğer sektörleri de kapsamaktadır. Federal Havacılık İdaresi (FAA), CMMI modellerini entegre ederek bu süreci optimize eden ilk büyük endüstrilerden biri olmuştur. 1997 yılında FAA tarafından geliştirilen FAA-iCMM modeli, yazılım edinme süreçlerini ve sistem mühendisliği süreçlerini birleştiren entegre bir modeldir ve süreç iyileştirmede başarılı sonuçlar elde etmiştir (SEI, 2021).

Bu örnekten de görüldüğü gibi, CMMI modelleri, sadece BT sektöründe değil,

daha geniş bir endüstriyel uygulama alanına sahiptir. Bu bağlamda, CMMI 4-5 seviyelerinin, Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde şirketlere nasıl rehberlik edebileceği ve süreç iyileştirme açısından ne gibi avantajlar sağlayabileceği üzerinde durulacaktır.

Bu çalışma, CMMI 4-5 seviyelerine sahip şirketlerin Endüstri 4.0'a olan hazırlık durumlarını incelemekte ve bu iki modelin süreç iyileştirme kapasitelerini bir araya getirmektedir. CMMI ve Endüstri 4.0 arasındaki bu bağ, süreç olgunluğunu artırarak dijitalleşme sürecini hızlandırabilir ve organizasyonların rekabet avantajı elde etmesine olanak tanıyabilir. Çalışma sonucunda, dijital dönüşüm süreçlerinde CMMI'nin sektörel uyulanabilirliği ve Endüstri 4.0'a hazırlıkta sunduğu avantajlar üzerine öneriler sunulacaktır.

2. Kavramsal Arka Plan

Standartlar gönüllü ve zorlayıcı standartlar olarak ikiye ayrılır. Ekonomik, sosyal, teknolojik taleplerin sonucudur ve tarihi geçmişe ve olgunlaşma süreçlerine de sahiptir. Ülkeler, bölgeler, birlikler veya düzenleyici kurumlar tarafından karar verilen standartlar mevcuttur. Örnek Standart enstitülerden bazıları TSE, ITU, CE, ANSI, ETSI ve IEEE'dir. TSE (Türk Standartları Enstitüsü): Türkiye'de ulusal standartların hazırlanmasından ve uygulanmasından sorumlu kuruluştur. Bunlarla ilgili kısa açıklamalar şöyledir:

ITU (International Telecommunication Union): Uluslararası Telekomünikasyon Birliği, bilgi ve iletişim teknolojileri için küresel standartlar geliştiren Birleşmiş Milletler'e bağlı bir kurumdur.

CE (Conformité Européenne): Avrupa Birliği'nde üretilen veya ithal edilen ürünlerin belirli sağlık, güvenlik ve çevre koruma gerekliliklerine uygun olduğunu gösteren işarettir.

ANSI (American National Standards Institute): ABD'de ulusal standartları geliştiren, koordine eden ve denetleyen kuruluştur.

ETSI (European Telecommunications Standards Institute): Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü, telekomünikasyon ve dijital teknoloji standartları geliştiren Avrupa merkezli bir kurumdur.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers): Elektrik, elektronik, bilgisayar mühendisliği ve diğer ilgili disiplinlerde dünya çapında standartlar geliştiren profesyonel bir dernektir.

Standartların oluşum sürecinde ilgili tüm tarafların bir araya getirilmesi gerekir. Bu taraflar tüketiciler, üreticiler, hükümetler, enstitüler, üniversitelerdir. Standartlara olan ihtiyaçları teknolojik gelişmeler ve sosyal ihtiyaçlar ortaya çıkartır ve belirler. Bazı standartlar yalnızca küçük bir işletme ve grupta bilinir ve etki

düzeyi sınırlıdır. Bununla birlikte, bazıları dünyadaki tüm taraflarca genel kabul görür. Mesela ISO 9001 gibi bir standart tüm ekonomik sektörlerde yayılmıştır. Bu standartlar çoğu ilk tanımlanmasının ardından, zamana ve ülkelere göre yeniden adlandırılmış veya kodlanmıştır.

Standartlar, teknolojik ve sosyal talepler değiştikçe evrim geçirir ve farklı bir boyut kazanır. Yeni standartlar yayınlanabilir, mevcut standartlar güncellenebilir ya da birden fazla standart daha uyumlu bir yaklaşımla bir çatı altında birleştirilebilir. Standartların bir diğer önemli özelliği ise ölçüm ve değerlendirme yapabilme yeteneğidir. Bu ölçümler, gerçek ihtiyaçlara dayandırılır ve birçok farklı hedef doğrultusunda kullanılabilir.

Yetenek ve olgunluk düzeyini anlama yöntemleri, farklı sektörler için de benzerdir. İlk olarak, gerçek ihtiyaçları ve talepleri kapsayan bir konsept çerçevesi (White Paper) oluşturulmalıdır. Bunun yanı sıra, önceki standartların da gözden geçirilmesi gereklidir.

Geçmişte, o dönemin gereksinimlerini yansıtan standartlar bulunmaktaydı. Ancak günümüzdeki modern standartlar, başlangıçta ticaretin yalnızca iki temel bileşeninden biri olan “mallar” için tanımlanmıştı. Zamanla, “hizmetler” de kendi standartlarına kavuştu ve böylece bu iki unsur, ekonominin ayrılmaz parçaları haline geldi.

Yazılım sektörü, hizmet sektörünün içindedir. Ancak farklı özelliklere sahip olduğu ve mevcut kriter ve standartlarla ölçme ve değerlendirmesinin mümkün olmadığı da ortaya çıkmıştır. Yazılım sektöründe organizasyonel tasarımın merkezi bir paradigması olan süreç oryantasyonu ve sürekli süreç iyileştirmenin üst düzey yöneticinin gündemlerinde üst sıralarda yer almasıyla birlikte, işletme süreci yönetiminde de CMMI yetenek ve olgunluk modeli geliştirilmiştir.

Modelin farklı firmalarda ve coğrafik bölgelerde uygulanması ile birlikte hem tasarım ürünleri olarak olgunluk modellerine hem de olgunluk modeli tasarım sürecine atıfta bulunulan çok sayıda eksiklik ortaya çıkmıştır. Araştırma tasarım sürecini zaten doğrulamış olsa da olgunluk modellerinin karşılaması gereken tasarım ilkeleri olan biçim ve işlev ilkelerinin bütüncül bir anlayışı yoktur. Bu modelde yapılan geliştirmeler ile modelin öğrenen ve eksiklikleri gideren tarafları geliştirilmiştir.

BT ve özellikle Yazılım sektöründe CMMI hem yönetim hem de üretim tarafında kullanılacak bir model olarak pratik uygulamalarda test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Literatür taraması, olgunluk modelinin çok geniş bir alanda kullanıldığını ortaya koymuştur.

Çok sayıda unsur ve sorun potansiyel olarak risk taşıyabilir. BT şirketleri, ticari gizlilik ve konuya olan ilgi ve uzmanlıkları nedeniyle, Endüstri 4.0 bağlamında

kritik öneme sahip olan bilgi güvenliği uygulamalarına daha yatkındır. Yönetimden üretimin tüm aşamalarına kadar olan süreçler, artık yeni teknolojilerle düşünülmelidir. Yeni kavramlar ve yöntemler, farklı seviyelerdeki BT teknolojileriyle güçlü bir ilişki içindedir. (Basl, 2018)

CMMI olarak bilinen yazılım alanında geliştirilen olgunluk yönteminin kullanılması için Endüstri 4.0 bakımından tarihi süreçler ışığında öne çıkan teknolojiler mevcuttur. CMMI- Kapasite Olgunluk Ölçümü İndeksleme, geliştirme süreçlerine rehberlik eden bir modeldir. Bir organizasyonda doğrudan uygulanabilecek bir dizi süreç tanımlaması değildir. Bir kuruluş tarafından kullanılan gerçek yöntemler, uygulama alanı ve kuruluş yapısı ve boyutu dahil olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, bir CMMI modelinin süreç alanları genellikle bir organizasyonda kullanılan süreçlerle tam olarak ve bire bir örtüşmez. Bir kurumda uygulanan prosedürler, çalışma alanı, organizasyon yapısı ve büyüklüğü gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. CMMI modelleri doğrudan süreçler değildir; bunun yerine, süreçlerin nasıl yürütülmesi gerektiğine dair rehberlik sağlayan süreç tanımları sunar. (SEI, 2021)

CMMI modelleri, çeşitli ilgi ve işlem alanlarını kapsar. Bu süreç alanları, her kurumun ve sürecin organik olarak birbirine bağlanmasından meydana gelir. Süreç alanlarıyla sonuçlanan herhangi bir süreç iyileştirme faaliyeti, kurum yapısı içinde birbirinden bağımsız olarak tanımlanır; ancak bu faaliyetlerin etkileşimi her zaman göz önünde bulundurulmalıdır (Ariffin and Ahmad, 2021).

Çeşitli süreç iyileştirme modellerini bir araya getirerek oluşturulan CMMI modeli, bu modellerden hedeflere doğal bir geçiş sağlar ve bu nedenle iki farklı temsile sahip eşdeğer sonuçlar üretir. Bu temsillerden ilki «sürekli iyileştirme» olarak adlandırılır ve herhangi bir alandaki süreç yeterlilik ve olgunluk seviyesi tarafından belirlenir.

2.1 Literatür Taraması

Bu çalışmada, CMMI (Capability Maturity Model Integration) 4-5 seviyelerine sahip BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık düzeyleri ele alınmaktadır. Literatür incelemesi, bu iki önemli kavramın birbirleriyle ilişkisini ortaya koyan önceki çalışmalara dayanarak, CMMI ve Endüstri 4.0'ın süreç yönetimi ve dijital dönüşümdeki rollerine odaklanmıştır.

CMMI Üzerine Çalışmalar

CMMI, öncelikle Carnegie Mellon Üniversitesi'ne bağlı Software Engineering Institute (SEI) tarafından yazılım süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla geliştirilmiştir (SEI, 2021). Bu model, yazılım geliştirme süreçlerinin optimizasyonu için başlangıçta kullanılmış, zamanla diğer sektörlerde de süreç iyileştirme ve kalite

yönetimi aracı olarak yaygınlaşmıştır. Yıldırım (2018), Türkiye'deki tersanelerde CMMI'in uygulanabilirliğini inceleyerek modelin süreç yönetimi üzerinde olumlu etkilerini ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Wood ve Vickers (2018), havacılık sektöründe CMMI'in güvenlik ve süreç yönetimi üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir.

Endüstri 4.0 Üzerine Çalışmalar

Endüstri 4.0, dijitalleşmenin sanayi sektöründeki yansımalarını temsil eden bir kavramdır. Schwab (2016) tarafından öne sürülen bu kavram, sanayi devriminin dördüncü aşaması olarak kabul edilmektedir ve yapay zeka, Nesnelerin İnterneti (IoT), otonom sistemler gibi yenilikçi teknolojileri kapsamaktadır. Brettel ve arkadaşları (2014), Endüstri 4.0'ın süreç yönetimi üzerindeki etkilerini incelemiş ve bu yeni sanayi devriminin özellikle üretim süreçlerinde büyük bir dönüşüm yol açtığını vurgulamışlardır. Endüstri 4.0 Platformu, Endüstri 4.0 konseptini destekleyen önemli bir yapıdır. Almanya merkezli olarak kurulan bu platform, sanayi sektörünü dijital dönüşüm konusunda yönlendiren ve teşvik eden bir yapıya sahiptir. Platform, devlet kurumları, araştırma kuruluşları, teknoloji sağlayıcıları ve sanayi temsilcilerini bir araya getirerek Endüstri 4.0'ın temel prensiplerinin uygulanmasını kolaylaştırmayı hedefler. Ayrıca, sanayide dijitalleşme süreçlerini hızlandırmak amacıyla ortak bir dil ve standart oluşturulmasına katkı sağlar. Bu platform sayesinde, Endüstri 4.0'ın getirdiği teknolojik yeniliklerin iş dünyasına entegrasyonu daha verimli bir şekilde gerçekleştirilmektedir (Endüstri 4.0 Platformu, 2021).

Literatürdeki Eksiklikler

Yapılan literatür taraması, CMMI 4-5 seviyelerine sahip şirketlerin Endüstri 4.0'a hazırlık seviyelerine dair bir çalışmanın mevcut olmadığını göstermektedir. Bu çalışmanın temel amacı, CMMI'in süreç iyileştirme kapasitelerini analiz ederek, BT şirketlerinin dijital dönüşüm süreçlerindeki hazırlık durumlarını ölçmek ve bu modelin diğer sektörlerde uygulanabilirliğini araştırmaktır.

2.2 İş ve Süreçlerle İlgili Olgunluk Modeli Benimsemeyin Faydaları

CMMI tekniği, yalnızca şirketlerin süreç olgunluklarını değerlendirmekle kalmaz, aynı zamanda projeyi üstlenen şirketin, işi önceden belirlenen süre ve maliyet içinde tamamlayacağına dair bir güvence sağlar. ABD'de savunma projelerinde yaşanan tarih sapmaları ve büyük maliyet artışları, böyle bir modele olan ihtiyacı doğurmuştur. Bu duruma en bilinen örnek, F-35 savaş uçağı projesindeki gecikmeler ve sapmalardır. Bu nedenle CMMI, başlangıçta ABD savunma sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise CMMI, çok çeşitli organizasyonlarda iş süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla giderek daha yaygın bir şekilde benimsenmektedir (SEI, 2021).

Yerel yazılım geliştirme endüstrisinin küresel ölçekte daha rekabetçi olabilmesi için uluslararası standartlara uyum sağlaması gerekecektir. Bu sayede, uluslararası sözleşmeler arayan yerel şirketler, yabancı firmalar tarafından talep edilen CMMI seviyelerini karşılayabilecektir. CMMI, çeşitli organizasyonların proje öngörülebilirliğini ve tutarlılığını önemli ölçüde iyileştiren somut faydalar sağlayan kanıtlanmış bir yaklaşım sunar.

Yukarıda belirtilen faktörlerin herhangi biri ya da tamamı, bir kuruluşun CMMI'a olan ilgisini yönlendirebilirken, yöneticilerin bu modeli uygulamaya odaklanmasının temel faydası, teslimatta sağlanan tutarlılıktır. CMMI güdümlü süreç iyileştirme, aynı zamanda daha erken ve etkili hata tespiti gibi maliyet tasarrufları sağlar. Bu sayede iyileştirme maliyetleri düşerken, değişiklikler daha etkili bir şekilde yönetilir. Sonuç olarak, yeniden çalışma maliyetleri azalır, program değişiklikleri minimuma iner ve maliyet öngörülebilirliği artar (SEI, 2021).

Bir kuruluşun nasıl çalıştığına, hangi işlemlere ihtiyaç duyduğuna ve bu işlemlerin nasıl etkileşim kurduğuna dair bir model olmadan, iyileştirme çabalarına liderlik etmek zor olabilir. Model, bir organizasyondaki ayrı unsurların anlaşılmasını sağlar ve dilin formüle edilmesine ve neyin iyileştirilmesi gerektiği ve ne kadar iyileştirme sağlanabileceğinin tartışılmasına yardımcı olur.

Geçen 20 yıl boyunca teknoloji, endüstrilerin verimliliği artırma ve üretkenliği artırma ihtiyaçlarını karşılamaya yardımcı oldu. Pandemi dolayısı ile günümüzde Dünya'nın ciddi ekonomik zorlukları vardır. BT teknolojileri daha yüksek büyüme fırsatları sunmakla birlikte rekabet gücünü de azaltmamaktadır.

CMMI ölçeği, kuruluşların süreç olgunluğu ve iyileştirme seviyelerini değerlendirmek için kullanılan bir modeldir. CMMI'nın beş aşamasının özet ifadesi şöyledir:

Başlangıç Seviyesi- Seviye 1

Bu seviyede kuruluşlar genellikle tahmin edilemez ve tepkisel bir yapıdadır. Süreçler düzensiz ve sıklıkla kaotiktir. İşler tamamlanır; ancak, genellikle belirlenen zaman ve bütçenin üzerine çıkılır.

Yönetilen Seviye- Seviye 2

Bu aşamada, organizasyon projeleri bireysel bir temelde yönetir. Planlama ve yönetim süreçleri daha düzenli hale gelmiş, projelerin uygulanması, ölçülmesi ve kontrol edilmesi sistematik bir yaklaşımdır.

Tanımlanmış Seviye- Seviye 3

Proaktif bir yaklaşım öne çıkar; kuruluş genelindeki standartlar belirlenmiş ve uygulanmaktadır. Bu standartlar kuruluşun tüm projelerine, programlarına ve portföylerine rehberlik eder, tutarlılık ve verimliliği artırır.

Niceliksel Olarak Yönetilen Seviye- Seviye 4

Bu düzeyde, kuruluşlar süreçlerini ve performanslarını sayısal verilere dayalı olarak yönetir. Organizasyon, ölçülebilir hedefler belirleyerek ve bu hedeflere ulaşmak için veri analizi yaparak iç ve dış paydaşların ihtiyaçlarını karşılayabilir bir yapıya sahiptir.

Optimizasyon Seviyesi- Seviye 5

Organizasyonlar bu aşamada sürekli iyileştirme sürecine odaklanır, değişim ve fırsatlara hızlı ve etkili yanıtlar verebilir. Kuruluşlar, istikrarlı, esnek ve yenilikçi çözümler sunarak endüstri lideri olma yolunda ilerler.

Endüstri 4.0'a ulaşmış firmalar, özellikle CMMI'nın 4. ve 5. seviyelerinde belirtilen ölçütleri yerine getirme kapasitesine sahiptirler. Bu seviyeler, yüksek teknolojik entegrasyon ve otomasyon seviyesi gerektiren kapsamlı ve gelişmiş süreç yönetimi uygulamalarını içerir. Bu firmalar, süreçlerindeki verimliliği ve etkinliği artırmak için ileri teknolojileri ve süreç iyileştirme metodolojilerini kullanmaktadır (SEI, 2021).

Tablo 1. CMMI Seviyeleri Tanım ve Açıklamaları Tablosu (Kaynak: <https://www.sei.cmu.edu/>)

CMMI-SEVİYE	TANIM	AÇIKLAMA
Seviye 1	Başlangıç	Kuruluşlar genellikle tahmin edilemez ve tepkisel bir yapıdadır. Süreçler düzensiz ve kaotiktir. İşler genellikle zaman ve bütçe sınırlarının dışına çıkar.
Seviye 2	Yönetilen	Projeler bireysel düzeyde yönetilir. Planlama ve yönetim süreçleri daha düzenlidir. Projeler sistematik olarak uygulanır, ölçülür ve kontrol edilir
Seviye 3	Tanımlanmış	Kuruluş genelinde standartlar belirlenmiş ve uygulanmaktadır. Bu standartlar, projelere, programlara ve portföylere rehberlik eder, verimliliği artırır.
Seviye 4	Niceliksel Olarak Yönetilen	Süreçler ve performanslar sayısal verilere dayanarak yönetilir. Ölçülebilir hedefler belirlenir, veri analizi ile kararlar alınır.
Seviye 5	Optimizasyon	Sürekli iyileştirme süreci öne çıkar. Değişim ve fırsatlara hızlı yanıt verilir, istikrarlı, esnek ve yenilikçi çözümler sunulur.

2.3 Endüstri 4.0

Endüstri 1.0, 1780'lerde su ve buhar gücünü kullanarak mekanik üretim sistemlerinin ortaya çıkmasıyla başladı. En bilinen sonuçları buharlı motorlar, buharlı trenler ve buharlı gemilerdir. Endüstri 2.0, 1890'larda elektrik gücünün devreye girmesiyle seri üretim araçlarının kullanılmaya başlanmasını tanımlar. Endüstri 3.0 olarak adlandırılan dönem ise 1990'lı yıllarda dijital dönüşümün başlaması ve yarı iletken teknolojilerinin kullanımıyla öne çıkar. Günümüzde, Endüstri 4.0, 2011 sonrasında üretim süreçlerinin tamamen son teknoloji Bilgi Teknolojileri (BT) ürün ve araçlarından faydalanılarak gerçekleştirilmesini ifade eder.

Bu makalenin amacı, Endüstri 4.0 için gerekli dönüşüm süreçlerinin yönetimini sağlamak üzere CMMI modelinin 4 ve 5. seviye yaklaşımlarında geliştirilen prosedür ve yöntemlerden nasıl yararlanılabileceğini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, sistematik bir yaklaşımın geliştirilmesi gerekliliği açıktır. İlk olarak BT şirketlerinden başlanmasının nedeni, CMMI'nin başlangıçta yazılım sektörü için tasarlanmış olmasıdır. Bu sayede, zaten CMMI sertifikasına sahip olan ve bu sürece aşina olan BT şirketlerinin mevcut potansiyellerinden daha etkin bir şekilde faydalanılması hedeflenmiştir.

İnceleme için BT şirketlerinin seçilmesinin bir diğer nedeni ise şudur: Endüstri 4.0, teknolojiler ile kurumsal olgunluk gerektiren değerler ve kavramlar zincirinin iş birliğini içeren kapsamlı bir yapıdır. Bu yapı, siber-fiziksel sistemler, Nesnelerin İnterneti-NiT (Internet of Things) ve Hizmetlerin İnterneti (Internet of Sevices-IoS) kavramlarına dayanmaktadır.

Endüstri 4.0 genel olarak 3 yapıdan oluşmaktadır. Bunlar; 1) Nesnelerin İnterneti 2) Hizmetlerin İnterneti 3) Siber-Fiziksel Sistemlerdir.

Görüldüğü üzere, Endüstri 4.0 ile modüler yapıya sahip akıllı üretim tesisleri arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki, fiziksel işlemlerin siber-fiziksel sistemler aracılığıyla izlenmesi, fiziksel dünyanın sanal bir kopyasının oluşturulması ve merkezi olmayan karar mekanizmalarının devreye sokulmasını hedefler (Stentoft, Jensen, Philipsen and Haug, 2019).

Endüstri 4.0, genel kabul görmüş altı temel ilkeye dayanmaktadır. Bu ilkeler şunlardır: Karşılıklı Çalışabilirlik (Interoperability), Sanallaştırma (Virtualisation), Özerk Yönetim, Gerçek Zamanlı Çalışma Yeteneği (Real Time Operation), Hizmet Oryantasyonu (Service Orientation) ve Modüler Olma (Modularity).

CMMI kullanımının Endüstri 4.0 hedefleri ile örtüştüğü ve özellikle 4. ve 5. seviyelerine ait hedeflerle benzerlik gösterdiği söylenebilir. Bu hedefler arasında; sistemin izlenmesiyle aksayan yönlerin kolayca tespit edilmesi, insan ve sistem bileşenlerinin öz farkındalık kazanması, sistemin çevre dostu ve kaynak tasarruflu bir yapıya kavuşarak sürdürülebilirlik sağlanması, yüksek verimliliğin elde

edilmesi, üretimde esneklik ve elastikiyetin benimsenmesi, verimliliğin artırılması ve öğrenen, kendini sürekli geliştiren sistemlere geçilmesi gibi unsurlar bulunmaktadır (Shumaker, Erol and Sihn, 2016).

BT şirketlerinin yapısında, Endüstri 4.0 için öngörülen tüm yeni teknolojiler bulunmaktadır. Bu açıdan, bu şirketler küçük bir laboratuvar işlevi görmektedir. Ayrıca, CMMI 4-5 seviyelerinde yer alan üretim ve yönetim süreçlerinde, tüm sistemin uzaktan yönetilebilmesi mümkündür (Yıldırım, 2018). Bu durum, yalnızca uygun ve en son teknoloji ürünlerin kullanılmasıyla sağlanabilir. Dolayısıyla, bir BT şirketinin Endüstri 4.0'a hazır olma seviyesini değerlendirmek için CMMI 4-5 seviyelerindeki ölçütlerin incelenmesi faydalı olacaktır.

2.4 Yapay Zekâ-YZ

Yapay zekâ kavramı günümüzde sıkça duyulan bir terimdir ve beraberinde Derin Öğrenme, Büyük Veri ve Artırılmış Gerçeklik gibi kavramlarla birlikte anılmaktadır. Ayrıca Nesnelerin İnterneti ve Hizmetlerin İnterneti gibi terimler de sıklıkla aynı bağlamda kullanılır. Derin Öğrenme (Deep Learning-DL), aslında Makine Öğrenimi (Machine Learning-ML) alanının bir alt kategorisidir ve denetimli, denimsiz ve pekiştirmeli öğrenme gibi farklı öğrenme türlerini içerir.

Derin Öğrenme, ismini Yapay Sinir Ağlarından (Artificial Neural Networks-ANN) aldı ve bu ağlar, insan biyolojisinin sinir ağlarından esinlenilerek tasarlandı. Derin Öğrenme, Makine Öğreniminin bir yöntemi olarak kullanılır. Temelde, girdi ve çıktı katmanı arasına birçok gizli katman eklemekten ibarettir. Her bir katman, ağırlıkları öğrenmeye çalışır ve girdiyle işlendiğinde istenen sonuca yakın bir tahmin sağlar.

Derin Öğrenme yöntemlerini uygulamak için farklı teknikler bulunmaktadır. Hangi yöntemin kullanılacağı, sahip olunan veri türüne, uygulanmak istenen denetimli veya denimsiz öğrenme görevine ve çözümlenmek istenen problem türüne bağlıdır. Bu faktörler göz önüne alınarak, en uygun yöntem seçilir.

Makine Öğrenimi ile Derin Öğrenme arasında bazı farklar bulunur. İşlevsellik açısından, Derin Öğrenme, girdi verilerini alır ve katmanlar aracılığıyla sezgisel ve akıllı kararlar verirken, Makine Öğrenimi, verileri işler, özelliklerini ayıklar ve bu özelliklere dayanarak kararlar alır.

Ayrıca, Derin Öğrenme verilerden anlamlı özellikleri çıkarmak için uygun bir yöntem olarak kabul edilir. El yapımı özelliklere dayanmadan öğrenir ve katmanlar arası hiyerarşik özellik çıkarımı yapar. Makine Öğrenimi ise el yapımı özelliklere daha fazla güvenir ve verilerden anlamlı özellikler çıkarmak konusunda daha az etkilidir. Bu nedenle, Derin Öğrenme, veri analizi ve tanıma gibi görevlerde genellikle daha etkili bir seçenek olarak kabul edilir (Goodfellow, Bengio and Courville, 2016).

2.5 NiT (IoT) Sensörleri

NiT'in temelini oluşturan bu sensörler, Nesnelerin İnternetindeki "şeylerin" canlılık kazanmasını sağlar. Bir örnek vermek gerekirse, bir makinenin sıcaklığını izleyen bir NiT hizmetini ele alalım. Bu senaryoda, bir ısı sensörü, sıcaklığı analog veya dijital bir formda ölçer ve sıcaklık belirli bir eşiği aştığında veya altına düştüğünde daha karmaşık bir işlemi başlatmak için bir sinyal gönderir. Geleneksel bir senaryoda bu sinyali gözlemci veya kullanıcı alır ve gerektiğinde müdahale eder.

Ancak NiT kurulumunda, bu sensörler bu tür olayları otomatik olarak algılayan ve belirli kurallara sahip bir karar motoruna bilgi gönderebilirler. Bu nedenle, NiT sensörleri çok çeşitli türlerde bulunabilir: sıcaklık sensörleri, nem sensörleri, basınç sensörleri, CO2sensörleri, ışık sensörleri, doluluk sensörleri, hareket sensörleri ve daha fazlası. Önemli olan, bu sensörlerin NiT cihazlarının önemli bir bileşeni olduğu, gerçek dünyadaki verilerin kaynağı olduğu ve bir karar motoruyla entegre olduğunda çeşitli işlevleri otomatikleştirebildiğidir.

IoT ve IoS kavramları, günümüzde teknolojideki büyük değişiklikleri yansıtıyor ve nesnelerin ve hizmetlerin daha akıllı ve otomatik hale gelmesine yardımcı oluyorlar (Gubbi, Buyya, Marusic and Palaniswami, 2013).

2.6 Ağ ve Bağlantı

Sensörlerin nasıl çalıştığını anladıktan sonra, bu sensörlerin karar verme süreçleriyle nasıl etkileşim kurduğunu inceleyelim. Karar verme motorları, genellikle Programlanabilir Mantık Denetleyicisi (PLC) adı verilen cihazlarla sağlanır ve uzun yıllardır bu şekilde kullanılmaktadır. Ancak, eskiden bu tür bağlantıların çoğu kabloyla yapılırdı. Günümüzde, sensörlerin sayısının artması ve bu sensörlerin daha fazla cihazda kullanılmasıyla kablosuz bağlantı çok daha önemli hale geldi.

Son yıllarda, sensörlerden gelen verileri kablosuz olarak iletmek için birçok yeni teknoloji geliştirildi. Örneğin, Bluetooth Low Energy (düşük enerji tüketen Bluetooth), LoRa (uzun mesafeli iletişim), ZigBee (kısa mesafe için güvenilir bir ağ), SigFox (düşük enerjiyle uzun mesafe veri iletimi), ve NB-IoT (dar bantta çalışan Nesnelerin İnterneti teknolojisi) gibi seçenekler bulunuyor. Bu isimler kulağa teknik gelebilir, ancak hepsi aslında aynı amacı taşır: Sensörlerin topladığı bilgileri radyo frekansları kullanarak kablosuz bir şekilde iletmek (Raza, Kulkarni and Sooriyabandara, 2017).

Bu teknolojilerden en popüler olanı Bluetooth Low Energy (BLE) yani düşük enerji tüketen Bluetooth'tur. Birçok IoT (Nesnelerin İnterneti) sensörü, verilerini BLE üzerinden göndermek için bazı iletişim proto kollerini kullanır. Örneğin, UART ve Modbus gibi protokoller sensörlerin topladığı bilgileri BLE cihazlarına

iletmesine yardımcı olur. BLE cihazları, bu bilgileri kablosuz olarak diğer BLE cihazlarına ya da “Ağ Geçidi” denen özel alıcılara aktarır.

Altyapı ya da maliyet sınırlamaları nedeniyle çok sayıda alıcı cihaz eklemek her zaman mümkün olmasa da, BLE cihazları bir “Mesh Ağ” adı verilen sistemle düzenlenebilir. Bu sistemde, ağa bağlı cihazlar birbirine veri aktararak hedef alıcıya ulaşır. Bu yenilikçi teknoloji, IoT sensörlerinin sağlık hizmetleri, perakende, lojistik ve imalat gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır.

Verileri alan bu alıcılara, bilgileri genellikle GPRS (mobil veri), Wi-Fi veya LTE (4G) gibi bağlantılar aracılığıyla bulut tabanlı sistemlere iletir. Bu sistemler, topladıkları verileri analiz etmek ve işlem yapmak için özel ya da kamuya ait bulut hizmetlerinde çalışır (Raza et al., 2017).

2.7 NiT Bulut Teknolojisi ve Veri Yönetimi

Günümüzde dijital dünyada toplanan verilerin büyük çoğunluğu, işlenmek ve depolanmak üzere bulut sistemlerine gönderilmektedir. “Nesnelerin İnterneti (NiT) Bulutu” kavramı, bu verilerin toplanması, iletilmesi ve işlenmesi için kullanılan bir altyapıdır. NiT cihazları, sınırlı işlem gücüne ve depolama kapasitesine sahip olduklarından, topladıkları verileri daha güçlü sunuculara göndermek zorundadır. Bu noktada, bulut teknolojisi devreye girer.

NiT sensörleri, çeşitli verileri topladıktan sonra bu verileri belirli bir hedefe iletme ihtiyacı duyarlar. Bu veri iletiminde en çok tercih edilen protokollerden biri MQTT’dir (Mesaj Kuyruğu Telemetri Taşınması). MQTT, hafif ve verimli bir iletişim protokolü olup, düşük bant genişliği kullanan cihazlar için idealdir. Bir aracı gibi çalışan MQTT, sensörlerden gelen verileri toplar ve ilgilene kullanıcıya ya da sistemlere dağıtır. Kullanıcılar, belirli bir konuya abone olduklarında, bu konu hakkında sensörlerden gelen bilgilere erişebilirler.

MQTT sunucusu, genellikle “NiT sunucusu” olarak adlandırılır. Bu sunucu, sensörlerden gelen verileri toplar ve işleme sürecini yönetir. NiT sunucusunda kurallar belirlenir ve bu kurallar çerçevesinde gelen veriler filtrelenir. Verilerin filtrelenmesi, sadece gerekli ve ilgili bilgilerin işlenmesini sağlar, bu da sistemin verimli çalışmasına katkı sunar.

Bazı kullanıcılar, NiT sensörleri için neden özel bir sunucuya ihtiyaç olduğunu merak edebilir. Bunun temel nedeni, sensörlerin ürettiği veri hacminin çok büyük olabilmesidir. Özellikle büyük endüstriyel tesislerde ya da akıllı şehirlerde kullanılan NiT sistemleri, saniyede binlerce veri paketini işleyebilir. Standart bir sunucu, bu yoğun veri trafiğini yönetmekte yetersiz kalabilir. Bu yüzden, özelleşmiş NiT sunucuları kullanılır. Bu sunucular, yüksek hacimli verileri işleyip analiz edebilecek kapasitededir ve gerçek zamanlı veri işlemeye uygundur.

NiT verilerinin buluta taşınması, sadece verilerin depolanmasını değil, aynı zamanda bu verilerin analiz edilmesini ve anlamlı bilgiye dönüştürülmesini sağlar. Bulut sistemleri, büyük veri analitiği, yapay zeka ve makine öğrenimi gibi teknolojilerle entegre edilerek, toplanan verilerin daha hızlı ve etkili bir şekilde işlenmesine olanak tanır. Örneğin, bir üretim hattındaki NiT sensörleri tarafından toplanan veriler, bulut tabanlı sistemlere aktarılır ve burada analiz edilerek üretim süreçlerinin optimize edilmesi sağlanır.

NiT Bulutu, sağlık hizmetlerinden perakendeye, tarımdan imalat sanayine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu sistemler, verimlilik, maliyet tasarrufu ve gerçek zamanlı izleme gibi birçok avantaj sunar. Örneğin, sağlık sektöründe, bir hastanın vücut değerlerini ölçen sensörler, verileri sürekli olarak buluta aktarır ve doktorlar bu verilere anında erişerek gerekli müdahaleleri yapabilirler. Benzer şekilde, tarım sektöründe kullanılan toprak nem sensörleri, verileri buluta gönderir ve çiftçiler, bu verileri analiz ederek sulama stratejilerini optimize edebilirler.

NiT sensörlerinin topladığı büyük miktarda verinin verimli bir şekilde yönetilmesi ve işlenmesi için bulut teknolojisinin kullanılması gereklidir. Bulut teknolojisi hem depolama hem de analiz için ideal bir platform sunar ve bu sayede NiT tabanlı sistemler, farklı sektörlerde devrim niteliğinde yenilikler sağlayabilir (Tang, Sun, Liu and Gaudiot, 2017).

2.8 Artırılmış Gerçeklik-AG (Augmented Reality-AR)

Artırılmış gerçeklik (AG), günümüzün en hızlı büyüyen ve dinamik teknoloji trendlerinden biri olarak öne çıkıyor. Bu teknoloji, akıllı telefonlar ve diğer AG uyumlu cihazların artan erişilebilirliği sayesinde her geçen gün daha fazla kullanıcıya ulaşıyor. AG teknolojisi, kullanıcıların fiziksel dünyayı dijital bilgilerle zenginleştirerek, gerçek dünyayla etkileşim kurmasını sağlıyor. Günlük yaşamdan profesyonel alanlara kadar geniş bir yelpazede devrim niteliğinde yenilikler sunan bu teknoloji, BT şirketleri ve teknoloji devleri tarafından sürekli olarak geliştiriliyor ve yeni kullanım alanlarına entegre ediliyor.

AG ve BT Şirketleri: AG teknolojisinin sunduğu olanaklar, özellikle bilgi teknolojisi (BT) şirketleri için büyük fırsatlar yaratmaktadır. BT firmaları, AG uygulamaları geliştirerek farklı sektörlerin dijital dönüşüm süreçlerine katkıda bulunuyor. Örneğin, AG tabanlı yazılımlar ve çözümler, BT şirketlerinin müşterilerine daha etkileşimli ve kullanıcı dostu hizmetler sunmasını sağlıyor. İşletmeler, AG'nin sunduğu görselleştirme ve veri entegrasyonu olanaklarını kullanarak müşterileri deneyimini dönüştürmektedir. Bu durum, e-ticaret, dijital eğitim, sağlık ve iş gücü eğitiminde büyük etkiler yaratıyor.

Meta (eski adıyla Facebook) gibi teknoloji devleri, artırılmış gerçeklik teknolo-

jisinin potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için büyük yatırımlar yapmaktadır. Meta, "Metaverse" kavramını tanıtarak AG ve sanal gerçekliği (VR) birleştiren dijital bir evren oluşturmayı hedeflemektedir. Bu yeni dijital dünya, kullanıcıların gerçek zamanlı olarak sanal ortamlarla ve diğer kullanıcılarla etkileşim kurmasını sağlamaktadır. Meta, AG teknolojisini kullanıcı deneyimlerinin merkezine koyarak, iş dünyasından eğlenceye, eğitimden sosyal etkileşimlere kadar geniş bir alanda yenilikler sunmayı planlamaktadır. Bu girişim, BT sektöründe yeni iş modellerinin doğmasına ve dijital dönüşümün hızlanmasına katkıda bulunmaktadır (Alharthi, Alghamdi, Al-Ghaith and McAllen, 2022).

AG'nin Sektörel Kullanımları

Perakende Sektörü: AG, perakende sektöründe müşteri deneyimlerini büyük ölçüde geliştiren bir araç haline gelmiştir. Örneğin, IKEA'nın AG uygulaması IKEA Place, müşterilere mobilyaların evlerinde nasıl görüneceğini gerçek zamanlı olarak görselleştirme imkânı sunar. Bu tür uygulamalar, müşterilerin alışveriş deneyimlerini daha kişiselleştirilmiş ve etkileşimli hale getirir; aynı zamanda satın alma kararlarını kolaylaştırır.

Eğitim ve Simülasyon: Artırılmış gerçeklik, eğitim ve simülasyon alanlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Tıp öğrencileri, AG sayesinde insan vücudunun karmaşık yapısını 3D modellerle daha iyi anlayabilirken, mühendisler karmaşık makine yapılarını AG aracılığıyla inceleyebilirler. Bu teknoloji, öğrenme süreçlerini daha etkili hale getirerek, teorik bilgileri somut deneyimlere dönüştürür.

Askeri Uygulamalar: AG, askeri alanlarda da kritik bir rol oynamaktadır. Askeri pilotlar, kask vizörlerindeki AG projeksiyonları aracılığıyla uçuş sırasında önemli bilgileri gerçek zamanlı olarak görebilirler. Bu sistemler, savaş pilotlarının çevresel farkındalığını artırır ve karar verme süreçlerini hızlandırır.

Tıp ve Cerrahi Uygulamalar: Tıp alanında AG, cerrahların operasyonları daha hassas bir şekilde gerçekleştirmesine yardımcı olur. Beyin cerrahları, operasyon sırasında 3D beyin projeksiyonlarını kullanarak daha doğru kesimler yapabilir ve hastanın beyin yapısını daha iyi anlayabilirler. Bu tür AG uygulamaları, hem tıbbi hataları azaltır hem de hasta güvenliğini artırır.

Navigasyon ve Harita Sistemleri: AG, harita ve navigasyon sistemlerini de dönüştürmektedir. Gelişen AG destekli harita uygulamaları, kullanıcıların bir şehirde dolaşırken gerçek zamanlı olarak yönlendirilmesine olanak tanır. Bu sayede kullanıcılar, sanki fiziksel olarak şehirde gezmüş gibi bir deneyim elde ederler. Bu teknoloji, özellikle turizm ve lojistik gibi sektörlerde büyük faydalar sağlamaktadır (Ünal, 2022).

Meta'nın AG Stratejisi ve Metaverse

Meta (eski adıyla Facebook), AG ve VR teknolojilerine büyük yatırımlar yapı-

rak, bu teknolojilerin geleceğini şekillendirme konusunda öncülük etmektedir. Meta'nın "Metaverse" girişimi, sanal ve artırılmış gerçekliği birleştirerek dijital bir evren yaratmayı hedeflemektedir. Bu evrende kullanıcılar, sanal ortamlarla ve diğer kullanıcılarla gerçek zamanlı olarak etkileşim kurabilir, iş yapabilir ve sosyalleşebilir. Meta'nın bu stratejisi, AG ve VR'nin sadece eğlence sektörüyle sınırlı kalmadığını, iş dünyası, eğitim ve sosyal yaşamda da büyük değişiklikler yaratacağını göstermektedir.

Meta, aynı zamanda BT şirketleri için yeni iş fırsatları sunmaktadır. Metaverse'in altyapısını oluşturacak yazılım ve uygulamaların geliştirilmesi, BT firmalarına geniş bir pazar açmaktadır. Ayrıca, Meta'nın geliştirdiği AG uygulamaları, kullanıcıların işlerini daha verimli bir şekilde yürütmesine, sanal toplantılar yapmasına ve eğitim süreçlerini daha etkili hale getirmesine olanak tanır. Bu durum, hem Meta'nın teknoloji liderliğini pekiştirirken, hem de BT sektöründe AG'nin benimsenmesini hızlandırmaktadır.

Artırılmış gerçeklik, yalnızca eğlence değil, birçok sektörde devrim yaratan bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Kullanıcı deneyimini önemli ölçüde artıran AG, hem iş hem de günlük yaşamda daha fazla kullanılacak ve gelişmeye devam edecektir. AG'nin sunduğu olanaklar, BT şirketleri ve Meta gibi teknoloji devleri için büyük fırsatlar sunarken, kullanıcıların dünyayı algılayışını da dönüştürmektedir. Gelecekte, AG'nin akıllı şehirler, endüstriyel üretim ve eğitim gibi alanlarda daha fazla yaygınlaşması beklenmektedir. Meta'nın Metaverse vizyonu ve AG yatırımları, bu teknolojinin hem tüketici hem de kurumsal alanlarda önemli bir yer edinmesini sağlayacaktır (Ünal, 2022).

2.9 Endüstri 4.0'a Hazırlık Durumlarının Kolay Ölçüm Yöntemi

Endüstri 4.0'ın kapsamı yalnızca tedarik zinciri veya üretimle sınırlı kalmaz; aksine, organizasyonun, sektörün ve hatta toplumun tüm yönlerini kapsar (Brettel, Friederichsen, Keller and Rosenberg, 2014). Bu nedenle, Endüstri 4.0'ın organizasyon stratejisi üzerindeki etkisi son derece belirleyici olacaktır. Organizasyonlar içinde Endüstri 4.0 ile birlikte değişecek uzun vadeli ilişkiler, organizasyon ve çevre arasındaki dinamikleri de etkileyecektir.

Artan dijital yakınlık, müşteri kabulü ve müşterilerin tasarım ile üretim süreçlerine entegrasyonu üzerine kurulu organizasyonlar ve değer zincirleri, iş birliğine dayalı süreçler aracılığıyla dağıtılmış ve esnek üretim sistemlerini hayata geçirir. Bu sayede, ürün ve hizmetlerin toplu olarak özelleştirilmesi mümkün hale gelir. Bu bağlamda, örgütsel strateji, bu ilişkilerin her birinde kritik bir rol oynayacak ve kuruluşların Endüstri 4.0'a hazırlıklı olup olmadıklarını değerlendirmenin en önemli bileşenlerinden biri olacaktır (Endüstri 4.0 Platformu, 2021).

Bu çalışmanın en önemli bulgularından biri, Tablo 2'de detaylandırılan CMMI

4-5 seviyeleri ile Endüstri 4.0 gereksinimlerinin karşılaştırılmasıdır. Tablo 2, iki modelin kritik unsurlarını doğrudan kıyaslayarak BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık seviyelerinin ölçümünde nasıl kullanılabilmesine dair somut bir çerçeve sunmaktadır. CMMI'nın 4 ve 5. seviyelerindeki süreç yönetimi ve kalite kontrol yöntemlerinin, Endüstri 4.0'ın talep ettiği ileri teknoloji, otonom sistemler ve dijitalleşme gibi gereksinimlerle büyük oranda örtüştüğü bu tabloda açıkça görülmektedir. Tablo 2, sadece BT sektöründe değil, diğer üretim ve hizmet sektörlerinde de Endüstri 4.0'a uyum sağlamada CMMI'nın ne kadar etkin bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu kıyaslama, Endüstri 4.0'ın altı temel ilkesinin (karşılıklı çalışabilirlik, sanallaştırma, özerk yönetim, gerçek zamanlı çalışma, hizmet oryantasyonu, modülerlik) CMMI'nın üst seviye hedefleriyle nasıl uyumlu olduğunu gözler önüne sermektedir.

Tablo 2. Endüstri 4.0 ile CMMI karşılaştırma tablosu (BT şirketleri için ve CMMI 4-5. Seviyelerde kullanılan ölçeklerden yararlanma tablosu)

	CMMI 4-5. SEVİYE	ENDÜSTRİ 4.0
Standart Gönüllü mü Zorlayıcı mı?	Gönüllü Standart (Zorlayıcı Değildir)	Gönüllü Standart (Zorlayıcı Değildir)
Kullanılmaya Başlandığı ilk sektör	Önce BT şirketlerinde yazılım süreç ve kalite kontrolü amacıyla icat edildi	İlk defa ağır sanayi şirketleri için önerildi
İlk önerilme tarihi	2002	2011
Diğer sektörlerde kullanımı	İçinde Üretim ve Süreç Yönetimi olan her sektörde kullanılabileceği konusunda kendisini ispat etmiştir.	Son teknoloji ürünleri BT'ye dayalı üretim olan her sektörde kullanılabileceği konusunda kendisini ispat etmiştir
Gelişmeye devam ediyor mu?	Son olarak 2018 yılında ciddi bir güncelleme görmüştür	Şimdiden Endüstri 5.0 tanımlanmıştır.
İlk İcat edildiği Ülke	ABD	Almanya (Japonya)
Prosedürleri	Çok yetenekli deneticileri ve sıkı prosedürleri vardır	Prosedür takibi yerine Hazırlık İndeksi konusunda görüş belirlemiştir.
Kaç seviyesi var	5	Geliştirilen ölçeğe göre puanı olabilir

Öne çıkan teknolojiler	Yapay Zekâ (AI), Big Data, Nesnelerin İnterneti, Hizmetlerin İnterneti, 3 Boyutlu Yazıcılar, Otonom Robotlar, Siber Güvenlik, Bulut Teknolojileri, Artırılmış Gerçeklik, Yatay ve Dikey Entegrasyon, Mobil Teknolojiler, RFID ve RTLS, Benzetim (Simülasyon)	Yapay Zekâ (AI), Big Data, Nesnelerin İnterneti, Hizmetlerin İnterneti, 3 Boyutlu Yazıcılar, Otonom Robotlar, Siber Güvenlik, Bulut teknolojileri, Artırılmış Gerçeklik, Yatay ve Dikey Entegrasyon, Mobil Teknolojiler, RFID ve RTLS, Benzetim (Simülasyon)
------------------------	--	--

Tablo-2’de, Endüstri 4.0 ve CMMI (Yetenek Olgunluk Model Entegrasyonu) 4-5. seviyeleri arasında karşılaştırmalar görülmektedir. Her iki modelin benzerlikleri ve farklılıkları belirtilmiş, özellikle standartların gönüllü olma durumu, ilk hizmete sunulma tarihi/yılı, diğer sektörlerdeki kullanımı, sürekli gelişim, ilk icat edildiği ülkeler, prosedürleri, kaç seviyesi olduğu ve öne çıkan teknolojiler gibi çeşitli başlıklar altında kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırma, BT şirketlerinin Endüstri 4.0’a hazırlık durumlarını CMMI kriterleri ile değerlendirmek için kullanılmaktadır. Her iki modelin de gönüllü standartlar olduğu, farklı sektörlerde kullanılabilirliği ve sürekli gelişim gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, her iki modelin de benzerlikleri tablo halinde gösterilmiştir.

Tablo-2 incelendiğinde Otonom Robotlar’ın BT şirketleri ve özellikle kod yazılımcıları için geçerli olmayabileceği düşünülebilir. Oysa bu görüş yanlıştır. Son zamanlarda her sektörde olduğu gibi BT şirketleri ve özellikle yazılım sektörleri için de kod üreten yazılımlar öne çıkmıştır.

Yukarıda görülen Tablo-2, Endüstri 4.0 ve CMMI arasındaki ilişkiyi göstermesi bakımından önemlidir. Özellikle, Endüstri 4.0’ın 4. ve 5. seviyeleriyle CMMI’nin ilgili yönleri arasındaki paralellikler ve etkileşimler karşılaştırmalı olarak ifade edilmiştir. Tablo 2, her iki kavramın nasıl birbirini tamamladığını ve birleştiğinde nasıl daha güçlü bir çerçeve oluşturduğunu anlamak açısından önemlidir. Tablonun içeriği, CMMI ve Endüstri 4.0 modellerinin uygulama süreçlerindeki kritik unsurları ve bu unsurların iş dünyasındaki etkilerini daha görünür hale getirmektedir. Özellikle, işletmelerin süreç iyileştirmesi, verimlilik artışı ve dijital dönüşüm gereksinimlerine nasıl cevap verdikleri tablo üzerinden net bir şekilde anlaşılabilir.

Tablo-2, Endüstri 4.0 ve CMMI (Yetenek Olgunluk Modeli Entegrasyonu) 4-5. seviyeleri arasındaki ilişkiyi vurgulamak ve daha iyi anlamak bakımından önemlidir. Bu, Endüstri 4.0’ın temel unsurları ve CMMI’nin ilgili yetkinlik seviyeleri arasındaki uyumu ortaya koyuyor. Tablo-2, Endüstri 4.0 kapsamında teknolojik ve işlemsel gelişmelerin, CMMI’nin daha yüksek seviyelerine ulaşmak için nasıl

entegre edilebileceğini vurguluyor. Bu entegrasyonun, işletmelerin süreçlerini ve performansını iyileştirmede kritik bir rol oynadığı anlaşılıyor.

Hazırlık durumunu anlamak için öne çıkan teknoloji ve insan etkileşimini etkileyen yeni nesil konsept anlayışının uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu durumda Endüstri 4.0 için farklı sanayiler ve farklı bölgelerde kullanılabilecek bir hazırlık durumunun ölçümü konusunda daha önce yapılmış CMMI 4-5 seviyelerindeki şirketlerin incelemesinde ve süreç analiz ve yönetiminde kullanılan yol ve yöntemlerden ve araştırılan konulardan derinlemesine yararlanabileceği de ortaya konulmuştur.

2021 itibarıyla, 106'dan fazla ülkede 10,000'den fazla işletme CMMI modellerini benimsemiştir. Bu sayı, yalnızca BT şirketleri değil, geniş bir organizasyon yelpazesini içerir ve CMMI standartlarının küresel olarak benimsenme derecesi hakkında yaklaşık bir fikir verir (www.isaca.org).

Eş deyişle yukarıda temelleri anlatılan ve oluşturulacak bir çerçeve ile hazırlık durumlarının ölçümü sayesinde dünya üzerinde on binin üzerinde BT işletmesinin Endüstri 4.0 hazırlık durumu son derece optimum bir yöntemle ölçülebilecektir.

Kısaca bakılacak olursa, CMMI seviyesi 4 ve 5 olarak sertifikalandırılmış BT şirketlerinin Endüstri 4.0 hedeflerine sahip olduğu söylenebilir. Bunun altındaki seviyelerde ise bu sertifikanın seviyesine göre yapılacak işler bir bakıma aynı akış şemasındaki seviyenin 4 ve 5 seviyesine çıkarılması ile aynıdır. Yani bir bakıma 3 seviyesindeki bir BT şirketinin 4'e ulaşması Endüstri 4.0 hedefine ulaşması ile aynı anlamı taşıyacaktır.

BT şirketleri ile ilgili bu düzeyde hazır olan yöntemin diğer alanlar ile ilgili olarak da kullanılması olanaklıdır. Hatta günümüzde tüm üretim süreçlerinde kendisini hissettiren YZ ve BT teknolojilerine dayalı süreçler düşünüldüğünde bu teknik tüm alanlara uygulanabilir. Bir bakıma içinde üretim olan tüm işletmeler için CMMI kullanılabileceğinden ve üretim süreçlerinin ise giderek artan oranda BT teknolojilerine dayandığından bu yöntemin kullanılabilir olduğu ve sanayide sürekli değişen modeller kullanılmasından kaynaklı kafa karışıklığının giderileceği de söylenebilir.

2.10 Çalışmanın Metodoloji

Bu çalışma, CMMI 4 ve 5 seviyelerine sahip BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık durumlarını değerlendirmek için sistematik bir yaklaşım geliştirmeyi hedeflemektedir. Araştırmada, karşılaştırmalı analiz yöntemi kullanılarak, CMMI süreç yönetimi standartları ile Endüstri 4.0 gereksinimleri arasındaki benzerlikler incelenmiştir. Çalışmanın temel adımları aşağıdaki gibidir:

Literatür Taraması: CMMI ve Endüstri 4.0 ile ilgili mevcut akademik literatür ve sektörel raporlar incelenmiştir. Bu bağlamda, Endüstri 4.0'ın getirdiği yeni teknolojik gereksinimler ve CMMI seviyelerinin süreç yönetimi açısından sunduğu katkılar değerlendirilmiştir (Brettel et al., 2014; Yıldırım, 2018).

Veri Kaynakları: Çalışma kapsamında, 2011 sonrası Endüstri 4.0 uygulamalarına dair vaka incelemeleri ve CMMI sertifikasına sahip şirketlerle ilgili bilgiler elde edilmiştir. Ayrıca, CMMI sertifikasına sahip işletmelerin Endüstri 4.0'a uyum düzeylerini anlamak için geçmiş çalışmalardan faydalanılmıştır.

Tablo 1 Karşılaştırma Modeli: Çalışmanın odak noktasını oluşturan Tablo 1, CMMI 4-5 seviyeleri ile Endüstri 4.0 standartlarını karşılaştıran temel çerçeve olarak geliştirilmiştir. Bu tablo, BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a ne ölçüde hazır olduklarını değerlendirmede kullanılan bir araçtır. Bu karşılaştırma sayesinde, iki modelin süreç yönetimi ve teknoloji entegrasyonu açısından örtüşen ve farklılaşan yönleri belirlenmiştir.

Alan Uygulamaları ve Vaka Çalışmaları: BT sektöründe CMMI'nin 4 ve 5. seviyelerine ulaşan firmalar incelenmiş ve bu firmaların Endüstri 4.0'a geçiş süreçlerindeki performansları analiz edilmiştir. Özellikle üretim süreçlerinin otomasyonu, veri temelli karar alma mekanizmaları ve ileri teknoloji kullanımı bu aşamada dikkate alınmıştır.

Veri Analizi: Çalışma boyunca elde edilen bulgular, nitel analiz teknikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Endüstri 4.0'ın teknolojik gereksinimlerini karşılamak üzere, CMMI'nin sağladığı süreç yönetimi avantajları karşılaştırılmıştır.

Sonuçların Değerlendirilmesi: BT şirketleri ve diğer sektörler için Endüstri 4.0'a geçişte CMMI 4-5 seviyelerinin ne ölçüde etkili olduğu incelenmiş ve öneriler geliştirilmiştir. Bu yöntem, diğer sektörlerde de uygulanabilir bir model önerisi sunmaktadır.

2.11 Tartışma

Bu çalışma, CMMI Seviye 4-5 sertifikalı BT şirketlerinin Endüstri 4.0'a hazırlık durumunu değerlendirirken, süreç olgunluğu ile dijital dönüşüm arasındaki güçlü ilişkiyi ortaya koymaktadır. CMMI'nin ileri seviye süreç iyileştirme ve kalite güvence yaklaşımlarının, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği veri odaklı karar alma, otomasyon ve ileri teknoloji entegrasyonu gibi unsurlarla örtüştüğü gözlenmiştir. Ancak, CMMI ile Endüstri 4.0 arasında %100 uyumlu bir yapının olup olmadığı konusunda bazı belirsizlikler devam etmektedir. Örneğin, CMMI süreç yönetimi modeli, Endüstri 4.0'ın belirli sektörlerde gerektirdiği özel teknoloji ve operasyonel değişikliklere tam anlamıyla cevap veremeyebilir. Bununla birlikte, çalışma bulguları, CMMI'nin süreç odaklı yaklaşımının, Endüstri 4.0'a geçiş sürecinde organizasyonlara büyük avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Özellikle BT şirketleri açısından CMMI'nin üst seviye olgunluk seviyelerine ulaşmış olanların, Endüstri 4.0'ın ileri düzeyde otomasyon ve dijitalleşme gereksinimlerine büyük ölçüde hazır olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, CMMI'nin diğer sanayi dallarına uygulanabilirliği, her sektörde aynı derecede etkili olup olmadığı konusunda daha fazla araştırmayı gerekli kılmaktadır. Örneğin, üretim sektörü gibi fiziksel operasyonların daha yoğun olduğu alanlarda, Endüstri 4.0'ın temel prensipleriyle tam bir uyum sağlanması, CMMI'nin sunduğu süreç yönetimi modeli ile yeterince desteklenemeyebilir.

Literatürde, Endüstri 4.0 ile CMMI arasındaki ilişkiye dair sınırlı sayıda araştırma bulunmakta olup, bu çalışma literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. CMMI'nin Endüstri 4.0'a entegrasyonunu daha geniş bir perspektiften ele alarak, özellikle veri temelli yönetim ve otomasyon odaklı sistemlerde süreç iyileştirmenin potansiyel etkilerini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, BT dışındaki sektörlerin CMMI'nin sunduğu modelle ne ölçüde dijital dönüşüm gerçekleştirebileceği konusu da daha derinlemesine araştırılmalıdır.

CMMI 4 ve 5 seviyeleri ile Endüstri 4.0'ın gerektirdiği olgunluk ve dijitalleşme süreçleri arasındaki uyum, BT şirketleri için güçlü bir başarı faktörü olarak değerlendirilebilir. Ancak, farklı sektörlerdeki uygulamaları derinlemesine araştırarak, Endüstri 4.0'a geçişte CMMI'nin diğer sanayi dallarında ne kadar etkili olduğunu belirlemek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

3. Sonuç Değerlendirme ve Öneriler

Yazılım sektörü için geliştirilen ve süreç yönetiminde kullanılan CMMI endeksi giderek sadece yazılım sektöründe değil tüm üretim ve süreç yönetimi olan her alanda kullanılabilir bir standart haline geldi. CMMI'nin giderek genişlemesinin aksine Endüstri 4.0 ise daha en başından çerçevesini çok geniş tutmuştur. Öte yandan henüz Endüstri 4.0'a pek çok alanda geçilmemiş iken şimdilerde ise Endüstri 5.0 konsepti ortaya atılmıştır. Yine de bu durum Endüstri 4.0 için güvenilir bir hazırlık endeksi ihtiyacını ortadan kaldırmamıştır (Aslam, Amin, Li and Ur Rehman, 2020).

Bu makalede incelendiği gibi konuyu sadeleştirmek ve sektörel bazda uygulanabilirliğini anlamak adına iki konseptin birbirinden yararlanması oldukça doğal ve gerekli bir bakıştır. Nitekim yazılım üreten şirketler zaten üretimlerini BT araçlarıyla yaptığından bu araçları kullanma konusunda tereddüt olmayan firmalardır. Öte yandan süreç yönetimi bakımından ise CMMI çerçevesinin kullanıldığı kalite güvence yaklaşımları aynı zamanda BT araçlarının doğru ve verimli kullanımını da garanti etmektedir.

Yukarıdaki karşılaştırmalı tablolar CMMI çerçeve yaklaşımlarının Endüstri 4.0 hazırlık durumunun ölçümü açısından kullanılabileceğini yazılım sektörü açısın-

dan ortaya koymuştur. Ancak bu durum ayrıca diğer sektörler açısından da kullanılabilirliğini de ortaya koymuştur. Çünkü tek işi BT araçlarını kullanmak olan yazılım şirketlerinde Endüstri 4.0 hazırlık ölçümlerinin yapılması ile diğer şirketler arasında bazı farklar olacağı muhakkaktır (Endüstri 4.0 Platformu, 2021).

Öte yandan bir alanda süreç yönetimi varsa CMMI kalite güvencesi olarak o alanda kullanılabilirliğini geçen yıllar içinde ispatlamış bir standarttır. Aynı mantık ile bakıldığında yazılım sektörü BT araçlarının en iyi kullanıldığının kabul edilebileceği iyi bir laboratuvar olmuştur.

Aradaki fark sadece üretim araçlarının çeşitliliğidir. Ürünlerin farklı olduğunu söylemek ise tüm sektörler düşünüldüğünde doğru bir yaklaşım olamaz. Merkezdeki bakış filtresine üründeki farklılık konulursa ortaya ürün adedi kadar fazla endeks gerektiği çıkacaktır.

Sadece somut ve soyut ürünler bakımından bakıldığında ise yazılım ürünleri gibi başkaca pek çok ürün de soyuttur. O halde üretimi yapılan ürünlerden çok üretim araçlarına ve yöntemlerine odaklanmanın daha isabetli bir yaklaşım olduğu da böylece ortaya çıkmıştır.

Endüstri 5.0 ise daha çok toplum ile üretimi bir zincir olarak ele almaktadır. Burada bireyler sipariş-üretim-tedarik zincirinin mutlak bir parçasıdır. Bu ise Endüstri 4.0'ın tamamlanmasından ya da geniş kapsamlı olarak uygulanmasından önce mümkün değildir. Ancak tamamen geçilmesi bir sürece dayalı da olsa kısmi geçişlerin başlaması da kaçınılmazdır. Yani bu iki sürecin ardıl olduğu ve sebep sonuç ilişkisine dayandığı görülmektedir.

Ağır sanayi ve özellikle demir çelik sektörünün içinde olduğu alanlarda kullanılan otonom robot ve 3-boyutlu yazıcılar Türkiye'de de kullanılmaya başlamıştır. Ancak sağlık sektöründe ise Yapay Zekâ kullanımı daha net bir ölçüm aracıdır. Artırılmış Gerçeklik, Yatay ve Dikey Entegrasyon, Mobil Teknolojiler, RFID ve RTLS, Benzetim (Simülasyon) ise bu amaçla geliştirilecek bir ölçüm modeli için daha belirgin ve belirleyici ölçütler olarak araştırılması gereken konulardır.

CMMI süreç yönetiminin ayrılmaz bir parçası ise seviye 4-5 arasında süreçlerin otomatik olarak ve uzaktan yönetilebilen bir hal almasıdır. CMMI seviye 5 olduğunda ise büyüme küçülme gibi becerileri öğrenmesi ve eksikleri giderebilen bir hal almasıdır. Doğal olarak süreçlerin bu ölçüde yüksek bir güvenilirlik ve zekâ ile sevk ve idaresinin ise ancak siparişten üretime tüm alanlarda ya da bir diğer deyişle uçtan uca dijitalleşmiş bir sistemden bahsedildiğini ortaya koymaktadır (SEI, 2021).

BT firmalarının kullandıkları araçlara çeşitli ve BT destekli yeni nesil üretim araçlarının araştırılması ise diğer sektörlerde de bazı değişiklikler ve ilavelerle Endüstri 4.0 hazırlık ölçüm modeli hazırlanabileceğini göstermiştir.

Bu makalede, Endüstri 4.0 hazır olma ölçüm modeli oluşturulmasında CMMI

seviye 4-5 çerçeve yaklaşımının BT firmaları özelinde kullanımının sağlıklı bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir. Bu durumda tüm sektörleri için farklılaşan diğer teknoloji ve süreçler de genel başlıklar altında toplanabilirse bu durumda yeni bir Endüstri 4.0 hazır olma durumuna ilişkin bir hazır olma ölçüm modeli hazırlanabilecektir.

CMMI'nin Endüstri 4.0'a geçişteki kritik bir role sahiptir. CMMI seviyeleri, özellikle 4 ve 5, dijital dönüşüm ve Endüstri 4.0'a geçişte büyük bir önem taşımaktadır. Bu seviyeler, süreç iyileştirme ve kalite yönetimi gibi konularda ileri düzeyde bir olgunluk gerektirir. Bu olgunluk, Endüstri 4.0'ın gerektirdiği otomasyon, veri temelli karar alma ve ileri teknoloji entegrasyonunu başarıyla gerçekleştirmek için kritik öneme sahiptir. CMMI 4-5 seviyesindeki şirketler, süreçlerinde elde ettikleri olgunluğu dijitalleşme süreçlerine uyarlayarak Endüstri 4.0'ın gereksinimlerine hazır bir yapıya kavuşmaktadır.

Önerilen model ilerleyen zamanlarda ve uygulama pratikleri izlendikten sonra diğer sektörlerde de uygulanabilir. Bu çalışmada geliştirilen CMMI tabanlı değerlendirme çerçevesi, sadece BT sektörüyle sınırlı kalmamakta, diğer sektörlerde de adapte edilebilecek bir model sunmaktadır. Süreç yönetimi ve kalite güvenesi, günümüzde tüm üretim ve hizmet sektörlerinin merkezinde yer aldığından, CMMI kriterlerine dayalı bu yaklaşım, farklı sektörlerdeki Endüstri 4.0 dönüşüm süreçlerinde de uygulanabilir. Özellikle üretim, sağlık ve hizmet gibi dijitalleşmenin önemli olduğu alanlarda CMMI'nin sağladığı süreç olgunluğu ile Endüstri 4.0 hazırlık seviyesi ölçülebilir ve iyileştirilebilir.

Çalışma aynı zamanda Endüstri 5.0'a hazırlık sürecine de ışık tutmaktadır. Endüstri 4.0 henüz tam anlamıyla tüm sektörlerde uygulanmamışken, Endüstri 5.0 kavramı gündeme gelmiştir. CMMI seviyelerine dayalı süreç yönetimi modelleri, Endüstri 5.0'a hazırlıkta da etkili bir araç olabilir. Özellikle insan-merkezli üretim süreçlerine odaklanan Endüstri 5.0, CMMI'nin süreç iyileştirme yaklaşımını daha da ileri taşıyarak birey ve teknoloji arasındaki iş birliğini optimize etmeye yardımcı olabilir.

Önerilen model süreç iyileştirme ve sürekli gelişim amaçlayan her işletme ve üretim sürecinde kullanılabilir bir öneri sunmaktadır. CMMI'nin en üst seviyeleri, sürekli iyileştirme ve esneklik üzerine kuruludur. Bu, Endüstri 4.0'ın temel prensipleri olan modülerlik, gerçek zamanlı işlem ve otomasyon gibi süreçlerle doğrudan uyumludur. Sürekli gelişime odaklanan bir yaklaşım, Endüstri 4.0'a geçişte kısa vadeli başarılar kadar uzun vadeli sürdürülebilirliği de sağlamaktadır. CMMI-5 seviyesine ulaşan şirketler, sadece Endüstri 4.0'a hazır olmaz aynı zamanda değişen teknoloji trendlerine daha hızlı uyum sağlayacak esneklikte süreçlere sahip olurlar.

BT dışındaki sektörlerde uygulanabilirliği üzerine daha somut öneriler vermek gerekirse bazı örnekler şunlardır:

Üretim Sektörü: CMMI'nin süreç iyileştirme ve kalite güvence mekanizmaları, özellikle Endüstri 4.0'ın gerektirdiği otomasyon ve veri tabanlı karar verme süreçleri için üretim sektörüne uyarlanabilir. Öneri olarak, üretim şirketlerinin, CMMI'nin süreç yönetim sistemlerini kullanarak makine öğrenimi ve IoT (Nesnelerin İnterneti) sistemlerinin entegrasyonunu optimize etmeleri sağlanabilir. Üretim hattındaki performans verileri, CMMI'nin 4-5 seviyelerindeki veri analiz süreçleriyle izlenebilir ve sürekli iyileştirme sağlayan döngüsel süreçler kurulabilir.

Sağlık Sektörü: Sağlık sektöründe CMMI, dijitalleşme ve otomasyon süreçlerine uyarlanarak kullanılabilir. Sağlık kuruluşları, hastane yönetimi, tıbbi cihazlar ve veri yönetimi süreçlerini optimize etmek için CMMI'nin süreç iyileştirme ilkelerini benimseyebilir. Örneğin, IoT cihazları ile toplanan hasta verilerinin analizi ve hastane süreçlerinin otomasyonu CMMI'nin süreç odaklı modeliyle desteklenebilir. Sürekli iyileştirme yaklaşımı, özellikle hasta güvenliği ve hizmet kalitesinde önemli ilerlemeler sağlayabilir.

Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi: CMMI'nin süreç optimizasyonu, lojistik ve tedarik zinciri yönetiminde de uygulanabilir. Lojistik süreçlerinin otomasyonu, stok yönetimi, dağıtım ağları ve gerçek zamanlı veri analizi gibi alanlarda CMMI'nin 4-5 seviyelerindeki veri yönetimi ve süreç takibi modelleri devreye alınabilir. Öneri olarak, tedarik zinciri boyunca izlenebilirlik ve performans iyileştirmesi için CMMI'nin süreç iyileştirme modelleri, Endüstri 4.0 teknolojileriyle birleştirilebilir.

Örnekler çoğaltılabilir. Ancak bu modelin sadece BT sektörü ile sınırlı olmadığı açıkça görülmektedir. Gelecekte bu iki modelin de kendi içlerinde daha da gelişmeye açık olduğu görülmektedir. Ancak birlikte çalışma bakımından da gelişmesi ve çalışmamızın bu yöndeki çalışmalara destek sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

- Alharthi, A. M., Alghamdi, A. A., Al-Ghaith, W., & McAllen, D. (2022). Metaverse as a digital business ecosystem: The economics and business models of hyperconnectivity. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 28(9), 52-73. Doi: <https://doi.org/10.1108/IJEER-12-2021-0984>
- Ariffin, K. A. Z., & Ahmad, F. H. (2021). Indicators for maturity and readiness for digital forensics investigation in era of industrial revolution 4.0. *Computers & Security*, 105, 102237. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102237>
- Aslam, F., Aimin, W., Li, M., & Ur Rehman, K. (2020). Innovation in the Era of IoT and Industry 5.0: Absolute Innovation Management (AIM) Framework. *Information*, 11(2), 124. Doi: <https://doi.org/10.3390/info11020124>
- Basl J. (2018) Analysis of Industry 4.0 Readiness Indexes and Maturity Models and Proposal of the Dimension for Enterprise Information Systems. In: Tjoa A., Raffai M., Doucek P., Novak N. (eds) *Research and Practical Issues*

of Enterprise Information Systems. CONFENIS 2018. Lecture Notes in Business Information Processing, vol 327. Springer, Cham. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99040-8_5

- Brettel, M, Friederichsen, N, Keller, M, Rosenberg, M, (2014). World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, *Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* Vol:8, No:1, 2014
- Bottani, E., & Vignali, G. (2019). Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *IJSE Transactions*, 51(3), 284-310. Doi: <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>
- CMMI Principles and Values, May 2018, [online] Available: [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh765978\(v=vs.120\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh765978(v=vs.120).aspx) .
- Endüstri 4.0 Platformu (Bağlantı Tarihi: 05.02.2021) www.endustri40.com/teknik
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep learning. MIT Press.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Jiang, P., Liu, Z., Niu, X., & Zhang, L. (2021). A combined forecasting system based on statistical method, artificial neural networks, and deep learning methods for short-term wind speed forecasting. *Energy*, 217, 119361. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119361>
- Leyh C., Schäffer T., Bley K., Forstenhäusler S. (2017) Assessing the IT and Software Landscapes of Industry 4.0-Enterprises: The Maturity Model SIMMI 4.0. In: Ziemba E. (eds) *Information Technology for Management: New Ideas and Real Solutions. ISM 2016, AITM 2016. Lecture Notes in Business Information Processing*, vol 277. Springer, Cham. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-53076-5_6
- Machado, C. G., Winroth, M., Carlsson, D., Almström, P., Centerholt, V., & Hallin, M. (2019). Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enabler towards increased digitalization. *Procedia CIRP*, 81, 1113-1118. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.262>
- Muelaner, J. (2020). *Unsettled Technology Domains for Rapid and Automated Verification of Industry 4.0 Machine Tools*. SAE International. Doi: <https://doi.org/10.4271/epr2020019>
- Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855-873. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>

- Rauschnabel, P. A., Rossmann, A., & tom Dieck, M. C. (2017). An adoption framework for mobile augmented reality games: The case of Pokémon Go. *Computers in Human Behavior*, 76, 276-286. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.07.030>
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihni, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161-166. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Schwab, K. (2016). *The fourth industrial revolution*. World Economic Forum.
- SEI, (Software Engineering Industry) Bağlantı Tarihi, 02.03.2021) www.sei.cmu.edu Capability Maturity Model Integration - CMMI® version 1.3. Software Engineering Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- Stentoft, J., Jensen, K. W., Philipsen, K., & Haug, A. (2019). Drivers and Barriers for Industry 4.0 Readiness and Practice: A SME Perspective with Empirical Evidence. Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii International Conference on System Sciences. Doi: <https://doi.org/10.24251/hicss.2019.619>
- Sony, M., & Naik, S. (2019, January 29). Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: A literature review. Retrieved February 11, 2021, from <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/BIJ-09-2018-0284/full/html>
- Tang, J., Sun, D., Liu, S., & Gaudiot, J.-L. (2017). Enabling Deep Learning on IoT Devices. *Computer*, 50(10), 92-96. Doi: <https://doi.org/10.1109/mc.2017.3641648>
- Ünal, C., Sungur, C., & Yildirim, H. (2022). Application of the maturity model in industrial corporations. *Sustainability*, 14(15), 9478.
- Ünal, C., (2022) *Sanayi 4.0 için hazırlık ve uygunluk endeksi modeli geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi
- Yıldırım, H. Doktora tezi, THE APPLICATION OF SHIPBUILDING MANAGERIAL AND OPERATIONAL CAPABILITY ASSESSMENT MODEL (S-MCM) TO TURKISH SHIPYARDS, Piri Reis Üniversitesi, İstanbul, 2018.
- Wood, P. B., & Vickers, D. (2018, March). Anticipated impact of the capability maturity model integration (CMMI®) V2. 0 on aerospace systems safety and security. In *2018 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1-11). IEEE.
- Zubrow, D., High Maturity Software Engineering Measurement and Analysis, May 2018, [online] Available: https://insights.sei.cmu.edu/sei_blog/2012/02/high-maturity-software-engineering-measurement-and-analysis.html.