

Araştırma Makalesi (Research Article)

İmalat Yürütme Sistemlerine Genel Bakış ve Bir İmalat Firmasında Toplam Ekipman Etkinliği Analizi

 Mustafa Denizli

Düzce Belediye Başkanlığı, Düzce, Türkiye.

Sorumlu Yazar (Corresponding Author): mustafadenizli@outlook.com

Makale Bilgileri (Article Info):

Geliş (Received): 14/04/2025, Revizyon (Revision): 26/04/2025, Kabul (Accepted): 16/05/2025

DOI: 10.70081/duted.1675495

ÖZET

MES (Manufacturing Execution System) imalat alanındaki makineler, çalışanlar ve süreçler arasında dijital bir köprü kurarak; imalat süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesini, düzenlenmesini ve kontrol edilmesini sağlayan bir yazılım sistemidir. Dijital dönüşüm ve teknolojik gelişmelerle birlikte işletmelerdeki birçok süreç bilgisayar tabanlı hâle gelmiştir. Bu durum, cihazların uzaktan kontrolünü, veri alışverişini ve süreçlerin optimizasyonunu mümkün kılmıştır. MES sistemleri; üretimde verimliliği artırmak, hataları azaltmak ve kaynak kullanımını iyileştirmek açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ancak buna rağmen Türkiye'deki MES kullanım oranı hâlen düşük seviyelerde olup küresel ortalamanın gerisindedir. Bu durum, yerli işletmelerin dijitalleşme sürecinde MES sistemlerine daha fazla ilgi göstermeleri ve yatırım yapmaları gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, MES ile ilgili temel bilgiler, sistemlere ilişkin standartlar ve iletişim protokolleri ele alınmakta; ayrıca örnek bir firmada gerçekleştirilen Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) analizi ile verimlilik artışına yönelik iyileştirme alanları, üretim kayıplarının nedenleri ve çözüm önerileri ortaya konulmaktadır. Elde edilen bulguların, gelecekteki akademik araştırmalara ve endüstriyel uygulamalara farkındalık sağlaması ve katkı sunması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: İmalat Yürütme Sistemleri, Dijital Dönüşüm, Üretim Verimliliği, İletişim Protokolleri, Toplam Ekipman Etkinliği

An Overview of Manufacturing Execution Systems and Overall Equipment Effectiveness Analysis in a Manufacturing Company

ABSTRACT

MES (Manufacturing Execution System) is a software system that provides real-time monitoring, regulation and control of manufacturing processes by establishing a digital bridge between machines, employees and processes in the manufacturing field. With digital transformation and technological developments, many processes in businesses have become computer-based. This has made it possible to remotely control devices, exchange data and optimize processes. MES systems play a critical role in increasing efficiency in production, reducing errors and improving resource utilization. However, despite this, the MES usage rate in Türkiye is still low and lags behind the global average. This situation reveals that domestic businesses need to show more interest and invest in MES systems in the digitalization process. This study covers basic information about MES, standards and communication protocols related

to the systems; and also, with the Total Equipment Effectiveness (OEE) analysis carried out in a sample company, improvement areas for efficiency increase, causes of production losses and solution suggestions are revealed. The findings are aimed to raise awareness and contribute to future academic research and industrial applications.

Keywords: Manufacturing Execution Systems, Digital Transformation, Production Efficiency, Communication Protocols, Overall Equipment Effectiveness.

I. Giriş

İmalat Yürütme Sistemi (MES), üretim süreçlerinde şeffaflık sağlayan, görev dağılımını optimize eden, malzeme yönetiminde tasarruf sunan, kalite yönetimine uyumlu ve performans analizine olanak tanıyan kapsamlı bir bilgi sistemidir. MES 1990'ların ortalarından beri geliştirilmiştir (Chen ve Voigt, 2020). Günümüzde rekabetçi piyasalarda öne çıkmanın en etkili yollarından biri, müşteri memnuniyetini artırmaktır. Bu doğrultuda, işletmelerden hızlı ve yüksek kalite standartlarına uygun üretim gerçekleştirmeleri beklenmektedir. Bu beklentileri karşılayabilmek için işletme bünyesindeki tüm kaynakların etkin ve verimli şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Tam da bu nedenle, üretim sürecinde makinelerin duruş sürelerini minimize etmek, sevkiyat süreçlerini iyileştirmek, makineler arası veri toplamak, imalatı verimli hale getirmek ve çalışan görevlerini etkin biçimde yönetmek için MES sistemlerine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır (Qiu ve ark, 2015; Qu ve ark, 2014). Bu optimize çalışmaları, uluslararası bir eğitim derneği olan MESA (Manufacturing Execution Solutions Association) tarafından 11 temel işlevi kapsayacak şekilde MES'in temelini oluşturmak amacıyla ortaya konmuştur. Bunlar ayrıntılı planlama, kaynak yönetimi, belge yönetimi, malzeme ve stok yönetimi, performans analizi, tedarik yönetimi, bakım yönetimi, süreç yönetimi, kalite yönetimi, veri toplama ve ürün takibi şeklindedir (Kletti, 2007). MES'in bu işlevlerle birlikte uygulanması popüler hâle gelmekte endüstriyel uygulama çeşitliliğinde artış olduğunu göstermektedir (Arica ve Powell, 2017). Kocabay, yapmış olduğu çalışmada üretime dâhil olmayan siparişlerin üretim hattına eklenmesi halinde, hangi proseslerde gecikmeler yaşanacağı, nerede dar boğazların ortaya çıkacağı ve hangi ürünlerin sevkiyatlarının gecikeceği gibi olumsuz durumları önceden tahmin edecek şekilde birleşik modelleme dili kullanarak bir sistem tasarlamış ve karar vericilerin işini kolaylaştıracak bir başarı elde etmiştir (Kocabay, 2019). Halıcı, imalat alanındaki bir işletmede ERP (Kurumsal Kaynak Planlaması) ve MES sisteminin entegre çalışmasını sağlayarak, üretim süreçlerini izlenebilir hâle getirmiş, maliyet hesaplamaları noktasında çözümler üretmiş, verimliliği düşürecek unsurları optimize etmiş, üretim verimliliğini arttırmış ve ileriye yönelik tavsiyelerde bulunmuştur (Halıcı, 2022). Literatürdeki farklı bir çalışmada MES sistemlerinin akıllı fabrikaların oluşmasında kilit rol oynadığı belirtilmiş, işletmelerin gelecekte rekabetçilik anlayışı için MES sistemlerine yatırımlar yapacağı savunulmuştur (Mantravadi ve Møller, 2019). İsveç'te faaliyet gösteren bir otomotiv firmasında yer alan 13 adet CNC makinesinden oluşan üretim hattında darboğazları tespit etmek amacıyla çalışma yürütülmüştür. Çalışma kapsamında geliştirilen yapay zeka çözümü, MES'ten elde edilen zaman serisi verileri üzerinde makine öğrenimi gibi teknikleri kullanarak, zamanla değişkenlik gösteren üretim sistemlerinde karşılaşılan darboğazların tespitine olanak sağlamıştır (Bokrantz ve ark, 2024). Bir talaşlı imalat firmasının üretim süreçlerini yeniden yapılandırmak için ISA-95 standardı ile MESA-MES modelini referans alarak bazı öneriler sunulmuştur. Bu öneriler ile üretim sürecinde karşılaşılan temel sorunların tespit edilmesini ve bu sorunlara yönelik yeniden yapılandırma faaliyetlerinin MES sistemi üzerinden planlanması hedeflenmiştir. Üretim sürecine ait kritik veriler toplanarak karar destek mekanizmaları güçlendirilmiştir. Çalışma, MES yazılımı entegrasyonundan önce süreçlerin yeniden yapılandırılmasının önemini vurgularken, üretim operasyonları yönetimine odaklanmakta; bakım, kalite ve envanter yönetimi gibi diğer ISA-95 alanlarının da gelecekteki çalışmalar için potansiyel araştırma konuları olduğunu ortaya koymaktadır (Liao, 2024). Bir başka çalışmada MES sistemlerinin üretim süreçlerinin performans ve operasyonel sağlamlığı değerlendirilmiştir. Üretim hatlarında nasıl uygulandığı açıklanmış, anahtar performans göstergeleri kullanımıyla sistem verimliliği ölçülmüştür. MES sistemlerinin yalnızca izleme yapmadığı aynı zamanda karar destek mekanizmaları sağladığı, sistem arızaları ve değişken koşullar altında esnekliği arttırdığı

sonucuna ulaşılmıştır (Gendre, 2016). Dijital ikiz temelli bir mimarinin geliştirilmiş olduğu bir çalışmada MES sisteminden faydalanılmış fiziksel üretim hattının sekronize çalışması sağlanmıştır. Bunun sonucunda hata tespiti ve müdahale süresinde %14,2 oranında iyileşme görülmüştür. Mobil robotların engel aşma senaryolarında ise ortalama %21,1 oranında zaman tasarrufu elde edilmiştir (Caiza ve Sanz, 2024). Üretim sistemlerinde verimliliğin artırılması amacıyla geliştirilen performans ölçüm araçları arasında OEE analizi bulunmaktadır. Özellikle ekipman duruş sürelerinin azaltılması yoluyla endüstriyel performansın iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. OEE bileşenleri üzerinden yapılan değerlendirme, üretim hatlarında karşılaşılan kesintiler, hız düşüşleri ve kalite kayıpları gibi temel verimsizlik alanlarını görünür kılarak, sürekli iyileştirme faaliyetlerine katkı sağladığı savunulmuştur (Rathi, 2023). OEE, ekipmanların planlanan üretim süresi içindeki gerçek üretkenliğini ölçerek kayıpların sistematik biçimde analiz edilmesini sağlar. Böylece, operasyonel mükemmelliğe ulaşma yolundaki çabalarına somut katkılar sunar (Brodny ve Tutak 2019). Örneğin bir işletmede gerçekleştirilen mobil tabanlı MES sistemi sayesinde manuel toplanan verilerde oluşan hata payı ve gecikmeler minimize edilmiştir. Özellikle çalışma sonucunda OEE göstergesi açısından iyileşme görülmüştür. MES uygulaması öncesinde %79,9 olan OEE değeri, uygulama sonrasında %86,6'ya yükselmiştir (Mohamed ve Alraddadi, 2024). Farklı bir çalışmada, hassas metal işleme alanında faaliyet gösteren küçük ölçekli bir imalat firmasında iş emirleri ve üretim verileri dijital ortamda toplanarak gerçek zamanlı izleme sistemleriyle entegre edilmiştir. Gerçek zamanlı veri toplama, iş emri takibi ve üretim durumu görselleştirme sistemlerinin uygulanmasıyla birlikte, üretim süreci verimlilik, kalite, maliyet ve teslimat göstergeleri açısından analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, aylık üretim miktarında %7'lik bir artış gözlemlenmiş; ürün hata oranı %0,4'ten %0,3'e gerileyerek kalite iyileşmiştir. İşçilik ve zaman tasarruflarıyla üretim maliyeti %10 oranında azaltılmış, teslimat uyum oranı ise %92'den %93'e yükselmiştir (Shin ve ark, 2023). Bu bulgular, MES sistemlerinin küçük ve orta ölçekli işletmelerde dahi üretim verimliliğini anlamlı ölçüde artırabildiğini ve akıllı fabrika teknolojilerinin bu ölçekte uygulanabilirliğini açıkça ortaya koymaktadır. MES sistemlerinin kalite, verimlilik ve kaynakların etkin kullanımını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. Fakat ülkemizdeki işletmelerde MES kullanım düzeyi henüz istenilen seviyelere ulaşamamış olup, bu alanda yapılan araştırmalar da oldukça sınırlı kalmaktadır. Özellikle MES Komitesi tarafından gerçekleştirilen çalışmalara göre Türkiye'de MES sistemlerinin kullanım oranı yaklaşık %12 seviyelerindeyken, küresel ölçekte bu oranlar çok daha yüksektir (Sarp, 2022). Bu fark, Türkiye'deki işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde MES sistemlerine daha fazla odaklanmaları gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, (MES) ile ilgili literatürde yer alan genel tanımların incelenmesi, ardından örnek bir imalat firmasında Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) metriği üzerinden gerçekleştirilen detaylı performans analizi ve MES sistemlerinin üretim süreçlerine olan etkisinin nicel olarak değerlendirilmesidir. Böylelikle, MES sistemlerinin üretime sağladığı somut katkılar ortaya koyularak, Türkiye'deki imalat sanayisinde bu sistemlerin kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik farkındalık oluşturulması hedeflenmektedir.

II. MES SİSTEMLERİNE İLİŞKİN STANDARTLAR

MES sistemleri, çeşitli kuruluşlar tarafından ele alınmakta olup temel hedefleri MES sisteminin sahip olması gereken önemi kazandırmak, korumak ve düzenlemektir. Burada 5 temel standarttan bahsedilecektir.

A. MESA (Manufacturing Execution Solutions Association)

MES kavramını ilk defa belirleyen kuruluş olma özelliğini taşımaktadır. Bu konudaki en detaylı çalışmalar MESA'da bulunmaktadır.

- Detaylı planlama: Siparişlerin, makinelerin sınırlı kapasitesi ve diğer kaynaklarla uyumlu bir şekilde sırasıyla ve zaman açısından optimize edilmesi.
- Kaynak yönetimi: Cihazlar, makineler, araçlar gibi kaynakların yönetimini ve izlenmesini sağlama.
- Doküman yönetimi: Ürün, süreç, tasarım ya da sipariş bilgileri ile kaliteyi güvence altına almak için yardımcı olan iş talimatlarının yönetimi ve dağıtımını uygulama.

- Malzeme yönetimi: Üretimde kullanılan girdi malzemeleri ve ara ürünlerin yönetimi, stok takibi ve malzeme tasarrufu sağlama.
- Performans analizi: Ölçülen ve kaydedilen gerçek değerlerin, işletme hedefleri, müşteri hedefleri vb. ile karşılaştırılması ve değerlendirilmesi.
- Sipariş yönetimi: Operasyonların kontrolü ve tanımlanması, iş merkezlerine ve personele sevk edilmesi.
- Bakım yönetimi: Makinelerin ve tesislerin performans hedeflerine ulaşabilmesi için uygun önlemlerin planlanması ve uygulanması.
- Süreç yönetimi: Üretim tesisinde, planlanan ve mevcut yüklemelere ve spesifikasyonlara göre iş akışının kontrolü ve yönetimi.
- Kalite yönetimi: Ürün ve süreçlerin kaydedilmesi, izlenmesi, analiz edilmesi ve ideal değerlere karşı doğrulanması.
- Veri toplama: Süreç verilerinin, malzeme ve hammaddelerin, personel işlemlerinin, makine fonksiyonlarının ve kontrollerinin görselleştirilmesi, kaydedilmesi, toplanması ve organize edilmesi.
- Ürün takibi: Bir ürünün üretimiyle ilgili tüm olayların belgelenmesi. Girdi malzemelerinin ve çevresel koşulların ayrıntılarının kaydedilmesi (Kletti, 2007).

MESA, yukarıda görüldüğü gibi MES fonksiyonlarının operasyonel düzeyde nasıl tanımlanması gerektiğine ilişkin kapsamlı bir rehber sunmaktadır. Bu rehber, MES projelerinin planlanması ve değerlendirilmesinde önemli bir referans kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Örneğin, bir fabrikada makine duruş sürelerinin analizi için MESA'nın OEE metodolojisi kullanılabilir.

B. ISA-95

ISA-95, aynı zamanda ANSI/ISA-95 veya IEC 62264 olarak da bilinen, üretim kontrol sistemleriyle entegre çalışmayı hedefleyen uluslararası bir standartlar setidir. Üretim ortamındaki farklı kontrol seviyelerini ve bunların birbirleriyle olan bağlantılarını içerir.



Şekil 1. ISA-95 Modeli seviyeleri

- Seviye 0 - Fiziksel üretim süreçleri: Seviye 0, bir tesisin çalıştırılmasının fiziksel süreçlerini açıklar. Sahadaki veya zemindeki makineler ve diğer varlıklara atıfta bulunur.
- Seviye 1 - Üretim sürecini algılama ve yönlendirme: Seviye 1, verilerin toplanmasını ve fiziksel süreçlerin manipülasyonunu açıklar. Üretimi algılayan veya etkileyen sensörler, akıllı cihazlar, vanalar ve diğer cihazları ifade eder.
- Seviye 2 - Kontrolün izlenmesi ve denetlenmesi: Seviye 2, üretim ortamındaki fiziksel süreçlerin izlenmesini ve denetlenmesini açıklar. PLC tabanlı kontrol sistemleri, Dağıtık Kontrol Sistemleri (DCS) ve diğer kontrol aygıtlarını ifade eder.

- Seviye 3 - Üretim operasyonları yönetimi: Seviye 3, üretim yürütme sistemlerini (MES) ve üretim operasyonlarını yöneten denetleyici kontrol ve veri toplama (SCADA) gibi diğer sistemleri açıklar. ISA-95 standardı öncelikle seviye 3 ve 4 arasındaki arayüz ile ilgilenir.

- Seviye 4 - İş planlama ve lojistik: Seviye 4, bir işletmeyi yönetmeyle ilgili tüm faaliyetleri açıklar. Kurumsal kaynak planlama (ERP) sistemlerini içerir (ISA, 2025).

ISA-95 standardı MES sistemlerinin kurumsal (ERP) sistemlerle nasıl entegre edilmesi gerektiğini katmanlı bir model ile açıklamakta; bilgi akışının nereden nereye ve hangi tür verilerle gerçekleşeceğini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, MES sistemlerinin yalnızca operasyonel bir araç olmaktan çıkıp, kurumsal karar destek sistemlerinin etkin bir parçası haline gelmesini sağlamaktadır. Örneğin, bir üretim emrinin ERP sisteminden MES'e iletilmesi ya da ekipman verimliliğine ilişkin verilerin SCADA sisteminden analitik platformlara aktarılması gibi süreçlerde, ilgili standartlar referans alınmaktadır. Bu sayede, MES sistemleri yalnızca operasyonel bir araç olmanın ötesine geçerek, stratejik karar destek mekanizmalarının da önemli bir bileşeni hâline gelmektedir.

C. NAMUR

NAMUR, proses endüstrisinde üretim süreçlerini yönetmek için gereken ölçüm, kontrol ve otomasyon sistemlerinin standartlarını belirleyen uluslararası bir kullanıcı derneğidir. MES'in bu standartları kullanması, NAMUR'un önerdiği kalite ve güvenlik standartlarını karşılamaya yardımcı olur ve üretim süreçlerinin daha verimli hale gelmesini sağlar. NAMUR kılavuzları şu üç konuya özellikle vurgu yapmaktadır:

- Çalışılabilirlik: Farklı sağlayıcılardan gelen sistemlerin bir arada sorunsuzca çalışmasını temin etmek.

- Dijital dönüşüm: Modüler otomasyon ve dijital ikizler gibi yenilikçi dijital teknolojilerin kullanımını teşvik etmek.

- Operasyonel güvenlik: Tehlikeli çalışma ortamlarında güvenlik önlemleri ve güvenilirliği artıracak yapılar oluşturmak (Promanagecloud, 2025).

NAMUR'un, proses endüstrisine özgü yaklaşımı özellikle MES sistemlerinin kontrol sistemleriyle entegrasyonu açısından önem arz etmektedir. Sürekli üretim yapan tesislerde güvenlik, izlenebilirlik ve otomasyon sistemleriyle bütünleşik yapıların kurulması yönünde NAMUR'un sunduğu öneriler yol gösterici niteliktedir. Örneğin, NAMUR NE 107 standardı, bir basınç sensöründe meydana gelebilecek arıza durumlarının nasıl sınıflandırılacağını ve bu durumların operatörlere nasıl bildirileceğini tanımlamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle sürekli üretim yapan tesislerde hem güvenliği hem de verimliliği birlikte sağlamaktadır.

D. VDI

2004 yılında kurulmuş olan VDI (Alman Mühendisler Birliği) mevcut bulgular, standartlar ve piyasadaki gelişmeleri dikkate alarak kaliteyi sağlamak için uluslararası düzeyde standartlar belirler. MES sistemleri de VDI'nın katkı sağladığı konular arasındadır. VDI birliğine göre MES sistemlerinin aşağıdaki konularda optimize çalışmaları yapmaları gerekmektedir. Bunlar; ayrıntılı planlama ve ayrıntılı zamanlama kontrolü, işletme kaynakları yönetimi, malzeme yönetimi, personel yönetimi, veri toplama ve işleme, arayüz yönetimi, performans analizi, kalite yönetimi ve bilgi yönetimi şeklindedir (Kletti, 2007).

VDI standartları, MES sistemlerinin yazılım ve donanım bileşenlerinin mühendislik tasarımıyla uyumlu bir biçimde yapılandırılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle VDI 5600, üretim yönetimi yazılımlarının sistematik olarak sınıflandırılması ve değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Örneğin, VDI 5600 standardı, bir MES yazılımının üretim planlama, bakım yönetimi veya enerji izleme gibi modüllerinin nasıl yapılandırılacağını detaylandırmaktadır. Ayrıca, enerji verimliliği (VDI 4602) ve sürdürülebilir üretim gibi konularda da yol gösterici bir nitelik taşımaktadır.

E. NIST

Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST), Amerika Birleşik Devletleri Ticaret Bakanlığı'na bağlı bir federal kuruluştur. NIST'in temel görevlerinden biri, imalat süreçlerinde kullanılan ölçüm sistemlerini ve standartları geliştirmeyi sağlamaktır. 2000 yılında, Object Management Group (OMG) tarafından MES İmalat Yürütme Sistemleri alanına ilişkin bilgi talebine yanıt olarak bir rapor yayımlanmıştır. Bu raporda MES sistemlerinin standartlaştırılmasına yönelik yaklaşımlar ele alınmış ve referans çerçeveler sunulmuştur. Tıpkı VDI tarafından geliştirilen standartlarda olduğu gibi, NIST'in geliştirdiği yaklaşım MESA standartlarını temel alır. Bu standartlara dayanarak, birden fazla yazılım bileşeninin entegrasyonu yoluyla oluşturulan Dağıtık MES (Distributed MES) sistemleri için bir yapı tanımlamaktadır. Bu bağlamda NIST, MES sistemlerinin bir bütün olarak çalışmasını sağlayan yazılım bileşenleri arasında birlikte çalışabilirliği artırmak, veri bütünlüğünü sağlamak ve üretim operasyonlarının dijital yönetimini standartlaştırmak amacıyla önemli katkılar sunmaktadır (Barkmeyer, 1999). NIST, MES sistemlerinin entegrasyonunda karşılaşılan siber tehditlere karşı koruma sağlarken, akıllı üretim modelleri (dijital ikiz, IoT) için birlikte çalışabilirliğini de sağlamaktadır. Örneğin, bir enerji şirketi, NIST'in kılavuzlarını kullanarak bulut tabanlı üretim verilerinin şifrelenmesini ve anomali tespit sistemlerini yapılandırabilmektedir.

Günümüz üretim ortamlarında MES sistemleri, yalnızca üretim süreçlerini yönetmekle kalmayıp; aynı zamanda kalite kontrol, bakım yönetimi, iş gücü planlaması ve üretim izlenebilirliği gibi çok çeşitli işlevleri de bünyesinde barındırmaktadır. Ancak bu işlevlerin nasıl yapılandırılacağı ve hangi sistemlerle ne düzeyde entegrasyon sağlanacağı konularında bir standartlaşma eksikliği dikkat çekmektedir. Bu noktada, yukarıda bahsedilen standartlar, MES sistemlerinin kurumsal ve teknik altyapısının şekillendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Tablo 1. Farklı Standartlar Tarafından Belirtilen MES İşlevleri (Schmidt ve ark, 2011).

	MESA	NAMUR	VDI	NIST
İşgücü Yönetimi	X		X	
Gereksinim Planlaması		X		
Brüt Planlama		X		
Detaylı Planlama	X	X	X	X
Kalite Yönetimi	X	X	X	X
Ürün Stok Yönetimi	X	X		X
Kaynak Yönetimi	X		X	X
Ekipman Yönetimi	X		X	X
Üretim Kontrolü	X	X		
İzlenebilirlik / Ürün Geçmişi	X			X
Üretim Raporlama	X		X	X
Makine Kontrolü	X			
Üretim Verisi Toplama	X		X	X
Ana Veri Yönetimi	X	X	X	X

Tablo 1'de görüldüğü gibi farklı standartlara göre tanımlanan MES işlevleri karşılaştırıldığında, bu sistemlerin sahip olması gereken fonksiyonlar konusunda evrensel düzeyde üzerinde uzlaşılmış, kapsamlı ve tekil bir standardın bulunmadığı görülmektedir. Her bir standardın farklı önceliklere, sektörel ihtiyaçlara veya uygulama senaryolarına göre çeşitli MES bileşenlerine vurgu yapması, bu sistemlerin yapısal çeşitliliğini ve uygulama esnekliğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, MES sistemlerinin kapsamı ve işlevsel yetkinlikleri, benimsenen standartlara ve işletmenin üretim stratejisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu durum, MES sistemlerinin geliştirilmesinde ve uygulanmasında esnek ve çözümlerin önemini vurgulamaktadır.

III. MES SİSTEMLERİNE İLİŞKİN İLETİŞİM PROTOKOLLERİ

İmalat süreçlerini verimli ve doğru bir şekilde izleyebilmek ve farklı cihazlardan verilerin alınabilmesi için bazı iletişim protokollerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu protokoller aracılığı ile veriler merkezi bir MES sistemine iletilebilmektedir. İletişim protokolleri, cihazların ve sistemlerin farklı standartlarda ve farklı

üreticilerden olmasına rağmen uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. MES sistemleri makinelerden, sensörlerden ve diğer cihazlardan veriler toplayabilmektedir. Örneğin, üretim hızı, sıcaklık, basınç, çevrim süresi, makine bazında harcanan enerji miktarı, makinenin çalışıyor duruyor bilgisi, elektriksel arızalar vb. gibi verileri alabilmektedir. Bu veriler, üretim sürecinin izlenmesi ve yönetilmesi için kullanılmaktadır.

A. MODBUS PROTOKOLÜ

Modbus, endüstriyel sistemlerde en yaygın kullanılan protokollerden biri olarak öne çıkmaktadır. Kolay entegrasyonu, açık kaynak yapısı ve geniş donanım uyumluluğu, bu protokolü birçok endüstride standart hale getirmiştir. Modbus, 1979 yılında Modicon adlı firma tarafından geliştirilmiştir (Vadi ve ark, 2014). Açık bir protokol olması sebebiyle bu protokolü kullanmak isteyen cihazlar rahatlıkla veri alışverişi sağlayıp kullanabilmektedir. Modbus protokolü, master-slave (efendi-köle) mimarisine dayalı bir haberleşme yöntemidir. Modbus haberleşmesinde tüm iletişim master tarafından başlatılmaktadır. Slave cihazlar, gelen isteklere göre veri sağlar veya belirlenen işlemleri gerçekleştirir, ancak master'ın komut vermediği durumlarda pasif kalmaktadır.

B. PROFIBUS PROTOKOLÜ

1987 yılında EN50170 ve EN50224 standartlarına uygun olarak tasarlanan Profibus (Process Field Bus) bir iletişim protokolüdür. Bu protokol, FMS, PA ve DP gibi farklı iletişim modları sunarak, veri iletiminde RS-485 ve IEC 61158-2 gibi endüstriyel protokoller ile fiber optik iletişim teknolojileri ile esnek çözümler sağlamaktadır (Yılmaz, 2006). Profibus, otomasyon sistemlerinde, saha cihazları yönetimi ve dağıtık kontrol sistemleri gibi alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir.

C. PROFINET PROTOKOLÜ

Profinet (Process Field Network) PROFIBUS International (PI) organizasyonu tarafından standart hale getirilmiş bir endüstriyel haberleşme protokolüdür (Feld, 2004). Profinet, Ethernet tabanlı yapısı ile düşük gecikme süresi ve yüksek veri iletim hızı sağlayabilmektedir. Profinet OSI modeline dayanır ve bunun üzerinde çalışan bir TCP/IP yapısına sahiptir. Profinet IO, Profinet CBA, Profinet IRT adıyla farklı haberleşme modelleri bulunmaktadır (Krutz, 2005).

D. ETHERCAT PROTOKOLÜ

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology), yüksek hızda veri aktarımı ve düşük gecikme süreleri sağlayan bir endüstriyel Ethernet tabanlı iletişim protokolüdür. 2003 yılında Alman mühendislik firması Beckhoff Automation tarafından geliştirilmiştir. Bu teknoloji, özellikle otomasyon ve endüstriyel kontrol sistemlerinde saha cihazları arasındaki veri iletimini iyileştirmek için tasarlanmıştır (Ethercat, 2025). EtherCat'in temel özelliklerinden biri, dağıtılmış zamanlama sistemidir. Her bir cihaz, veri aldığı ve bir sonraki cihaza ilettiğinde, iletilen verilere bir zaman etiketi ekler. Master cihaz gelen verileri toplarken, her cihazın gecikmesini kolayca analiz edebilmektedir. Ağdaki tüm slave cihazları yönetilebilmektedir.

E. RS-232 PROTOKOLÜ

1960'larda Electronic Industries Association (EIA) tarafından standartlaştırılmış olup, özellikle düşük maliyetinden kaynaklı endüstride tercih edilmektedir. Tek uçlu (single-ended) bir yapıdadır ve $\pm 3V$ ile $\pm 15V$ arasında değişen gerilim seviyeleriyle çalışmaktadır. Maksimum önerilen mesafesi 15 metre olup, 9600 bps, 115200 bps gibi baud hızlarını desteklemektedir. Elektromanyetik girişime karşı hassas olup, uzun mesafeler için kullanılmamaktadır. Eski üretim sistemleriyle entegrasyon gerektiğinde RS-232 hâlâ önemli bir haberleşme seçeneği olarak kullanılmaktadır (Yetişken, 2010).

F. RS-485 PROTOKOLÜ

RS-485, geniş mesafelerde güvenilir veri iletişimi sağlayan bir seri haberleşme protokolüdür. Maksimum 1.2 km mesafeye kadar veri aktarımına imkân tanımaktadır. Tek bir iletişim hattı üzerinde 32

verici eş zamanlı olarak çalışabilmektedir. Elektromanyetik girişime karşı daha dayanıklı bir haberleşme sunmak için veri iletiminde bir pozitif (+) ve bir negatif (-) sinyal kullanarak dengeli bir sinyal iletimi gerçekleştirmektedir. Aynı ağda birden fazla verici cihazın haberleşmesine olanak tanımaktadır (Erkan, 2007).

G. MQTT PROTOKOLÜ

MQTT TCP/IP üzerine inşa edilmiş bir iletişim protokolüdür (Kraijak ve Tuwanut, 2015). Ağ üzerindeki veri trafiğini minimize etmesi ve mesaj başlığının yalnızca 2 bayt gibi düşük bir boyuta sahip olması, düşük güç tüketimi, güvenilirliği, açık kaynak yapısı ve ekonomik olması sebebiyle sınırlı kaynaklara sahip kablosuz sensör ağlarında geniş çapta tercih edilmektedir. MQTT, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve M2M (Makineden Makineye) iletişim uygulamaları için uygun özellikler sunmaktadır.

IV. TOPLAM EKİPMAN ETKİNLİĞİ (OEE)

Toplam Ekipman Etkinliği (OEE), bir ekipmanın gerçek üretim miktarının, o ekipmanın en verimli koşullarda ulaşabileceği maksimum üretim kapasitesine oranı olarak tanımlanabilir. Toplam Verimli Bakım (TPM) yaklaşımından türeyen OEE, Japonya'daki Tesis Bakım Enstitüsü'nde Seiichi Nakajima tarafından geliştirilmiştir. Burada temel amaç, sağlanabilecek en faydalı verimliliği sağlamak ve kayıpları tamamen ortadan kaldırmaktır (Nakajima, 1988). OEE hesaplamasında kullanılan üç adet ölçüt vardır. Bu ölçütler kullanılabilirlik, performans ve kalite şeklindedir. Üç ölçütün çarpılması ile bulunmaktadır.

$$OEE = Kullanılabilirlik \times Performans \times Kalite \times 100 \quad (1)$$

OEE değeri sonuçları yüzde olarak gösterilmektedir. Hepsinin veriminin ayrı ayrı hesaplanmaları ise aşağıdaki şekilde bulacağız.

$$Kullanılabilirlik = \frac{\text{Toplam Çalışma Süresi} - \text{Toplam Duruş Kayıpları Süresi}}{\text{Toplam Çalışma Süresi}} \times 100 \quad (2)$$

$$Performans = \frac{\text{Üretimde Gerçekleşen Miktar}}{\text{Teoride Gerçekleşmesi Beklenen Miktar}} \times 100 \quad (3)$$

$$Kalite = \frac{\text{Üretimde Gerçekleşen Miktar} - \text{Hatalı Üretim Miktarı}}{\text{Üretimde Gerçekleşen Miktar}} \times 100 \quad (4)$$

Çıkan sonuçlar uluslararası düzeyde farklı sektörlerde kabul edilen ortalama değerlerle karşılaştırılabilir.

V. BULGULAR VE TARTIŞMA

Toplam Ekipman Literatürde, OEE ölçümünün ideal kabul edilen değerleri belirlenmiş olup Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. OEE Dünya Standartları (Igbokwe ve Godwin, 2021).

OEE Bileşenleri	Standart Değerler
Kullanılabilirlik	%90 ve üzerinde olmalı
Performans	%95 ve üzerinde olmalı
Kalite	%99 ve üzerinde olmalı
Genel OEE	%85 ve üzerinde olmalı

Bu çalışmada dünya standartlarının referans değerleri esas alınarak OEE (Toplam Ekipman Etkinliği) analizi, küçük ölçekli bir makine imalat firmasında gerçekleştirilmiştir. Söz konusu işletme, metal işleme sektöründe faaliyet göstermekte olup toplamda 4 personeliyle çalışmaktadır. Firma, özel parça üretimi ve makine imalatı gibi işler yapmaktadır. Veri toplama süreci manuel olarak operatörler desteği ile

gerçekleşmiş ve 30 gün olarak kayıt altına alınmıştır. Toplanan veriler duruş süreleri, üretim adetleri, arıza, takım kırılması ve hatalı parça üretimi gibi parametreleri içermektedir. Firma, haftanın yedi günü faaliyet göstermekte olup, 08:00 – 24:00 saatleri arasında iki vardiya halinde üretim yapmaktadır. Günlük toplam çalışma süresi, yemek molaları hariç tutulduğunda 14 saat olarak uygulanmaktadır. Bu çalışma modeli dikkate alınarak, OEE hesaplamalarında kullanılacak olan teorik toplam çalışma süresi ve olası üretim kayıpları detaylı biçimde analiz edilmiştir. İmalat firmasında işlenen parçalar, alüminyum alaşımlı malzemeden imal edilen motor gövdeleridir. Bu parçalar üzerinde CNC dik işleme merkezi kullanılarak frezeleme, delik delme ve kılavuz çekme işlemleri uygulanmaktadır. İşlem sırasında parçaların eş merkezliliğini ve ölçü bütünlüğünü korumak büyük önem arz etmektedir. Özellikle deliklerin eksenel doğruluğunun sağlanabilmesi amacıyla, iki farklı operasyonun gerektirdiği bağlama işlemleri arasında oluşabilecek zaman kayıplarını önlemek için divizör kullanılmıştır. Bu sayede, bağlama süreleri optimize edilmiş ve işlem tekrarı sırasında zaman tasarrufu sağlanmıştır. Delik delme operasyonunun ardından, delik iç yüzeylerinde yüzey kalitesini artırmak ve pürüzlülüğü azaltmak amacıyla ezerek parlatma işlemi uygulanmıştır. Talaşsız bir işlem olan ezerek parlatma, malzeme yüzeyinde plastik deformasyon oluşturarak daha düzgün, parlak ve aşınmaya dirençli bir yüzey elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 2. CNC Tezgâhında işlem gören alüminyum motor gövdesi.

İşleme süreci, bir adet motor gövdesi için ortalama 5 dakika sürmektedir. Üretim süresinin analizinde arıza, bakım ve takım değişimi gibi plan dışı kesintiler plansız duruşlar kapsamında değerlendirilmiştir. Öte yandan, operatör molaları ve planlanmış vardiya dışı süreler ise planlı duruşlar altında toplanmıştır. İlgili üretim sürecine ait dakika ve adet bazlı veriler Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. İmalat Firmasındaki Üretim Süreleri ve Kalite Göstergeleri.

Gruplar	Süre - Adet
Çalışma süresi	25200 dak
Plansız duruş kayıpları	355 dak
Planlı duruşlar	3600 dak
İdeal çevrim süresi	5 dak
Sağlam üretilen parça	3826 adet
Hatalı üretilen parça	297 adet
Gerçekleşen üretim	4123 adet
Teorik üretim	4249 adet

Yukarıda yer alan verilere göre OEE'nin temel bileşenleri olan kullanılabilirlik, performans ve kalite ölçütleri ayrı ayrı hesaplandığında aşağıdaki şekilde çıkmaktadır. Tablo 4'te toplam ekipman etkinliği sonuçları yer almaktadır.

$$Kullanılabilirlik Etkinliği = \frac{25200 - (355 + 3600)}{25200} \times 100 = \%84,30 \quad (5)$$

$$Performans Etkinliği = \frac{4123}{4249} \times 100 = \%97,03 \quad (6)$$

$$Kalite Etkinliği = \frac{4123 - 297}{4123} \times 100 = \%92,79 \quad (7)$$

$$Genel OEE = 0,8430 \times 0,9703 \times 0,9279 \times 100 = \%75,91 \quad (8)$$

Tablo 4. Toplam Ekipman Etkinliği Sonuçları.

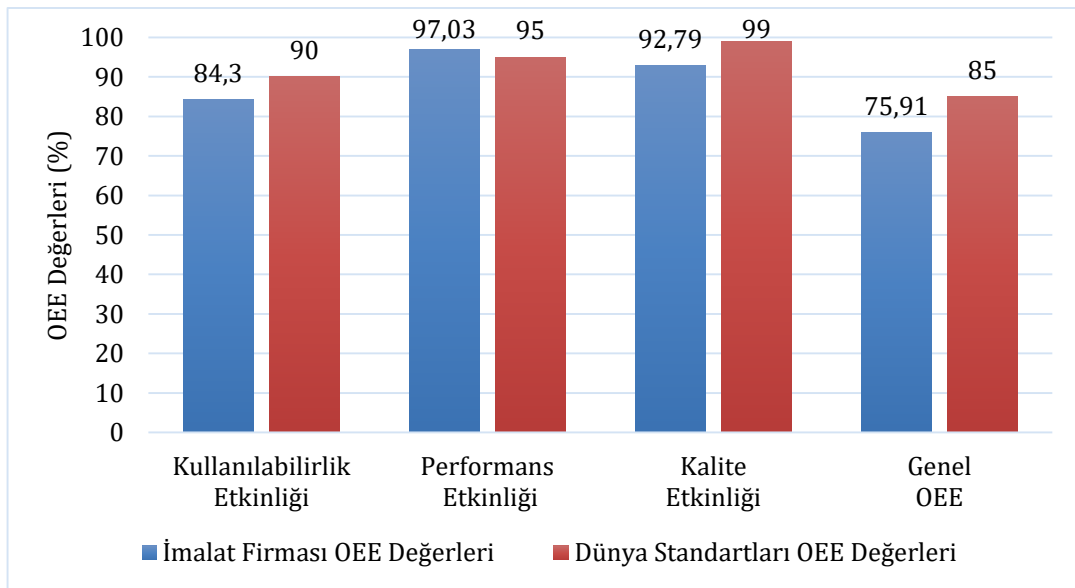
OEE Bileşenleri	Değerler (%)
Kullanılabilirlik etkinliği	84,30
Performans etkinliği	97,03
Kalite etkinliği	92,79
Genel OEE	75,91

İmalat firmasında yürütülen üretim süreçlerine ilişkin Toplam Ekipman Etkinliği (Overall Equipment Effectiveness - OEE) analizi kapsamında üç temel bileşen ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu analiz neticesinde, kullanılabilirlik etkinliği %84,30, performans etkinliği %97,03 ve kalite etkinliği %92,79 olarak hesaplanmıştır. Bu üç bileşenin çarpımı ile elde edilen genel OEE değeri ise %75,91 olarak bulunmuştur. Elde edilen OEE sonuçlarının, sektör genelinde kabul gören dünya standartları ile karşılaştırılması Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Firmadaki OEE Sonuçlarının Dünya Standartları İle Karşılaştırılması.

OEE Bileşenleri	İmalat Firmasına Göre OEE değerleri (%)	Dünya Standartlarına Göre OEE değerleri (%)
Kullanılabilirlik etkinliği	84,30	90
Performans etkinliği	97,03	95
Kalite etkinliği	92,79	99
Genel OEE	75,91	85

Bu karşılaştırma, mevcut durumun değerlendirilmesi ve iyileştirme alanlarının tespit edilmesi açısından önemli bir referans oluşturmaktadır. Firmadaki OEE sonuçlarının dünya standartları ile karşılaştırılmasının sütun grafiği Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. OEE Sonuçlarının Karşılaştırıldığı Sütun Grafiği.

Yukarıdaki hesaplamalar doğrultusunda, imalat firmasının OEE bileşenlerinde dünya standartlarına ulaşabilmesi için bazı stratejik iyileştirmeler yapılmalıdır. Özellikle, kullanılabilirlik etkinliği bileşeninde yaklaşık %6,75 oranında bir artış sağlanması gerekmektedir. Bu artış, üretim ekipmanlarında duruş sürelerinin azaltılması ve bakım süreçlerinin optimize edilmesiyle mümkün olabilir. Kalite etkinliği açısından ise, firmanın mevcut değeri %92,79 iken, %99 seviyesine ulaşabilmesi için %6,70'lik bir artışa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, üretim süreçlerinde hata oranlarının düşürülmesi ve kalite kontrol mekanizmalarının güçlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Genel OEE değeri, %75,91 seviyesinde olup, dünya standardı olan %85'e ulaşması için yaklaşık %11,97 oranında bir artış gerektirmektedir. Bu artışların sağlanabilmesi için bu aşamada gördüğümüz kadarıyla kesme sıvısı seçimi, parça işlenirken zamandan tasarruf edilebilmesi için kılavuz çekme işlemlerinin kılavuz çekme makinesinde yapılması, uygunsuz kesme parametreleri, uygun takım seçimi ve işleme sırasında motor gövdesinin titreşmesini engellemek için daha stabil bağlama yöntemleri uygulanması gerektiği firmaya bildirilmiştir.

VI. SONUÇLAR

MES sistemlerinin entegrasyonu, endüstri 4.0 hedefleri doğrultusunda dijitalleşen üretim ortamlarında verimliliğin artırılması için kritik bir öneme sahiptir. Cihazların uzaktan kontrol edilebilmesi, veri alışverişi içerisinde girmesi ve alınan bu veriler sonucunda optimizasyon ve analiz yapabilme beklentilerini karşılayacak çözüm MES sistemleridir. Endüstride MES'in sağlayabileceği gerçek zamanlı veri toplama ve izleme kabiliyeti, karar destek sistemlerinin etkinliğini artırarak işletmeye rekabet, tasarruf ve iş gücünde performans katkısı sağlayacaktır. MES sistemleri uygulanan işletmelerde üretim döngüsü kısalmakta, ürünlerin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır. Bu sayede teslimat süreleri azalır, üretim hızı ve kapasitesi artmaktadır. Bu çalışmada, İmalat Yürütme Sistemleri (MES) üzerine genel bir çerçeve sunulmuş ve MES'in üretim süreçlerindeki yeri, MES sistemlerine ilişkin standartlar ve iletişim protokollerinden bahsedilmiştir. Ardından, bir imalat firmasında MES kapsamında uygulanan Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) analizi çalışması yapılmıştır. Analiz sonucunda, kullanılabilirlik, performans ve kalite oranları detaylı şekilde hesaplanarak mevcut üretim sisteminin verimliliği ölçülmüştür. Elde edilen bulgulara göre %84,30 olarak ölçülen kullanılabilirlik oranı, dünya standardı olarak kabul edilen %90 seviyesinin bir miktar altında kalmaktadır. Bu durum, üretim sırasında planlanmamış duruşların ve geç başlama gibi zaman kayıplarının mevcut olduğunu göstermektedir. Bakım süreçlerinin gözden geçirilmesi ve duruş nedenlerinin detaylı analizi, kullanılabilirliğin artırılması açısından önem taşımaktadır. Firmanın performans etkinliği değeri %97,03 olup, dünya standardı olan %95'in üstünde kalmaktadır. Kalite etkinliği ise %92,79 olup, dünya standardı olan %99'un altında kalmaktadır. Kalite iyileştirme faaliyetleriyle, hatalı üretim oranının daha da düşürülmesi mümkündür. Firmanın toplam OEE değeri %75,91 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, dünya standardı olan %85'in altındadır. Bu farkın temel nedeni, kullanılabilirlik ve kalite etkinliklerinde gözlemlenen düşüklüklere aittir. Yapılan çalışmada OEE analizinin üretim süreçlerinin darboğazlarını belirlemede ve sürekli iyileştirme faaliyetlerine yön vermede etkin bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Alüminyum işleme sürecinde kesici takım seçimi, kesme sıvısı özellikleri ve uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi, işlem verimliliği ve yüzey kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Yapışmayı önlemek ve talaş tahliyesini kolaylaştırmak için genellikle sülfür içeren kesme yağları kullanılmalıdır. Ayrıca, sürtünmeyi ve malzeme yapışmasını azaltmak amacıyla TiN kaplamalı kesici takımlar tercih edilmeli, bunun yanında alüminyuma özel keskin kenar geometrisine sahip takımlar kullanılmalıdır. Kesme parametreleri olarak, yüksek kesme hızı, uygun ilerleme oranı ve derinlik kontrolü, alüminyumun yumuşak yapısı nedeniyle talaş kırma ve ısı birikimini önlemede kritik rol oynayacaktır. Özellikle içten soğutmalı kesici takımlar, kesme sıvısının takım-talaş temas bölgesine etkin bir şekilde ulaşmasını sağlayarak hem sürtünmeyi azaltır hem de talaşın kırılarak kolayca uzaklaştırılmasına yardımcı olacaktır. Bu sayede, takım ömrü uzatılırken yüzey kalitesi de artırılabilir. Bu şekilde, doğru kesme parametreleri, uygun takım seçimi ve kesme sıvısı kombinasyonu, alüminyum işlemede verimliliği ve iş parçası kalitesini önemli ölçüde iyileştireceğinden firmanın OEE değerlerinin dünya standartları değerlerine yükseltilebilmesi mümkün olacaktır.

BEYANLAR

Teşekkürler: Bu çalışmada sağladıkları saha uygulama imkânları dolayısıyla SCDEMAK firmasına teşekkür ederim.

Yazarın Katkıları: Çalışmanın tüm aşamaları Yazar tarafından yürütülmüştür.

Çıkar Çatışması Açıklaması: Yazar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Telif Hakkı Beyanı: Yazar, dergide yayınlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptir ve çalışmalarını CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayınlanmaktadır.

Destekleyen/Destekleyen Kuruluşlar: Bu araştırma herhangi bir dış fon almamıştır.

Etik Onay ve Katılımcı Onayı: Bu makale insan veya hayvan denekleriyle ilgili herhangi bir çalışma içermemektedir. Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulmuş ve yararlanılan tüm çalışmalar kaynakçada verilmiştir.

İntihal Beyanı: Bu makale intihal programıyla taranmıştır. İntihal tespit edilmemiştir.

Veri ve Materyallerin Kullanılabilirliği: Veri paylaşımı geçerli değildir.

YZ Araçlarının Kullanımı: Yazar, bu makalenin oluşturulmasında Yapay Zeka (YZ) araçlarını kullanmadığını beyan etmektedir.

KAYNAKLAR

- A. Schmidt, B. Otto, and H. Österle, "A Functional Reference Model for Manufacturing Execution Systems in the Automotive Industry," in *Wirtschaftsinformatik*, 2011, p. Paper 89.
- Arica, E., & Powell, D. J. (2017, December). Status and future of manufacturing execution systems. In 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 2000-2004). IEEE.
- Barkmeyer, E., Denno, P., Feng, S., Jones, A., and Wallace, E. (1999). NIST response to MES request for information. NIST Response to RFI-3 MES Models, pages 2–4.
- Bokrantz, J., Subramaniyan, M., & Skoogh, A. (2024). Realising the promises of artificial intelligence in manufacturing by enhancing CRISP-DM. *Production Planning & Control*, 35(16), 2234-2254.
- Brodny, J. and M. Tutak. 2019. Analysing the utilisation effectiveness of mining machines using independent data acquisition systems: A case study. *Energies* 12(13).
- Caiza, G.; Sanz, R. An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes. *Appl. Sci.* 2024, 14, 4125.
- Chen, X., & Voigt, T. (2020). Implementation of the Manufacturing Execution System in the food and beverage industry. *Journal of Food Engineering*, 278, 109932.
- Erkan M. (2007). Bilgisayar destekli veri toplama sisteminin doküman makinelerinde uygulanması. Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi.
- EtherCAT Technology Group. (2025). Technology. [Online]. Erişim: <https://www.ethercat.org/en/technology.html>.
- Feld, J. PROFINET-scalable factory communication for all applications. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, Vienna, Austria, 22–24 September 2004.
- Gendre, Y., Waridel, G., Guyon, M., Demuth, J. F., Guelpa, H., & Humbert, T. (2016). Manufacturing execution systems: Examples of performance indicator and operational robustness tools. *Chimia*, 70, 616–620.
- Halıcı, C. M. (2022). Kurumsal kaynak planlama sistemleri ile üretim yürütme sistemlerinin entegrasyonu: Makine imalat sektöründe bir uygulama. Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi.
- Igbokwe, N. C., & Godwin, H. C. (2021). Maintenance performance evaluation and downtime analysis of manufacturing equipment in a food manufacturing company. *Journal of Engineering Research and Reports*, 100-107.
- International Society of Automation (ISA). (2025). ISA-95 Standard. [Online]. Erişim: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>.
- Kletti, J. (2007). Manufacturing Execution System – MES. Germany: Springer, 28-29 33-34 pp.
- Kocabay, İ. V. (2019). Dijital ikizler gömülü gerçek zamanlı üretim yürütme sistemi tasarımı: kitleleşme özelleştirme ile üretim yapan bir firmada uygulama. Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi.

- Kraijak, S., & Tuwanut, P. (2015, October). A survey on internet of things architecture, protocols, possible applications, security, privacy, real-world implementation and future trends. In *Communication Technology (ICCT), 2015 IEEE 16th International Conference on* (pp. 26-31). IEEE.
- Krutz, R. L. (2005). *Securing SCADA Systems*. Indianapolis: Wiley.
- Liao, P. Y., Gong, D. C., & Zeng, Z. (2024). Enhancing Order Fulfillment Through Production Process Reengineering Using Manufacturing Execution System as a Reference Model. *IEEE Access*.
- Mantravadi S, Moller C. An overview of next-generation manufacturing execution systems: how important is MES for industry 4.0. *14th Glob Congr Manuf Manag (GCMM) 2019*:588-95.
- Mohamed, M.M. and Alraddadi, A.S. (2024) Agile Factor Flexible Industry 4.0 with MES Manufacturing Execution System Along with ERP BackEnd Integration: Ready-Made Garments as a Case Study. *American Journal of Operations Research*, 14, 137-150.
- Nakajima S., *Introduction to TPM*, productivity press, Portland , 1988.
- ProManage. (2025). MES, MES 1.1, CMES, ISA-95, NAMUR – Why are there so many standards?. [Online]. Erişim: <https://promanagecloud.com/mes-mes-11-cmes-isa-95-namur-why-are-there-so-many-standards/>.
- Rathi, S. S., Sahu, M. K., & Kumar, S. (2023). Implementation of total productive maintenance to improve productivity of rolling mill. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 30(6): 882-890.
- Sarp, G. M. (2022). MES & MOM Satın Alma Rehberi. [Online]. Erişim: [http://theprowess.net/documents/mes_satin_alma_rehberi\(buyuk\).pdf](http://theprowess.net/documents/mes_satin_alma_rehberi(buyuk).pdf).
- Shin, S. U., Lee, H. M., & Park, S. H. (2023). Research on Precision Processing Production System based on Manufacturing Execution System. *Journal of Digital Policy*, 2(4), 17-23.
- Vadi, S., Guler, N., & Bayındır, R. (2014). Endüstriyel Alanlarda Kullanılan Veri İletim Tekniklerinin Karşılaştırılması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 2(1), 181-188.
- Yetişken, F. M. (2010). Elektrik sayaçlarının uzaktan okuma teknikleri ve prototip geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Yılmaz C, Üncü İS. (2006). Profibus-Dp ağ tabanlı bina otomasyonu tasarımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 161-166.
- Qiu, X., H. Luo, G. Xu, R. Zhong and G. Q. Huang (2015). Physical assets and service sharing for IoT-enabled Supply Hub in Industrial Park (SHIP). *International Journal of Production Economics*, 159, 4-15.
- Qu T, Lei SP, Chen YD, Wang ZZ, Luo H, Huang GQ (2014) Internet-of-Things-enabled Smart Production Logistics Execution System Based on Cloud Manufacturing. In: *Proceedings of ASME 2014 Conference on Manufacturing Science and Engineering Conference*.