

ÜRETİM SİSTEMLERİNDE YAZILIM ENTEGRASYONU, STANDARTLAR VE AKADEMİK YAKLAŞIMLAR ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI

Muhammed Arda Sarı

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

İmalat Yürütme Sistemleri Operatörlüğü

sarimuhammedarda52@gmail.com

ÜRETİM SİSTEMLERİNDE YAZILIM ENTEGRASYONU, STANDARTLAR VE AKADEMİK YAKLAŞIMLAR ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI

GİRİŞ

Endüstri 4.0 paradigması, üretim sistemlerinde dijital dönüşümü zorunlu kılmaktadır. Bu dönüşümün temelinde, fiziksel üretim sahası (Operasyonel Teknolojiler- OT) ile kurumsal iş yönetimi yazılımları (Bilgi Teknolojileri- IT) arasındaki entegrasyon yatmaktadır. Üretim sistemlerinin yazılım anlamındaki çalışmaları, temel olarak bu entegrasyonu sağlamayı, üretim sahasından toplanan veriyi anlamlandırmayı ve operasyonları optimize etmeyi amaçlayan İmalat Yürütme Sistemleri (MES- Manufacturing Execution Systems) üzerine yoğunlaşmıştır.

Bir TÜBİTAK projesi kapsamında geliştirilecek olan üretim yazılımının, mevcut endüstriyel sistemlerle "birlikte çalışabilirlik" (interoperability) ilkesine uyması, projenin özgün değeri ve uygulanabilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, literatür taraması, üretim yazılımlarının uyması gereken uluslararası standartları ve bu standartları temel alan mevcut akademik çalışmaları incelemek üzerine kurgulanmıştır. Bu çalışma, öncelikle ISA-95 ve OPC UA gibi temel endüstriyel standartları ve bu standartların yazılım mimarisine etkilerini ele almakta, ardından bu çerçevede gerçekleştirilmiş akademik tez ve makaleleri analiz etmektedir.

ÜRETİM YAZILIMLARININ UYMASI GEREKEN TEMEL STANDARTLAR

Üretim ortamındaki yazılımların izole bir yapıda çalışması mümkün değildir. Bir üretim yazılımı, hem alt seviyedeki otomasyon cihazlarından (PLC, sensörler) veri toplamalı hem de üst seviyedeki Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) sistemlerine anlamlı bilgi raporlamalıdır. Bu dikey entegrasyonu standart hale getirmek için geliştirilmiş referans modeller mevcuttur.

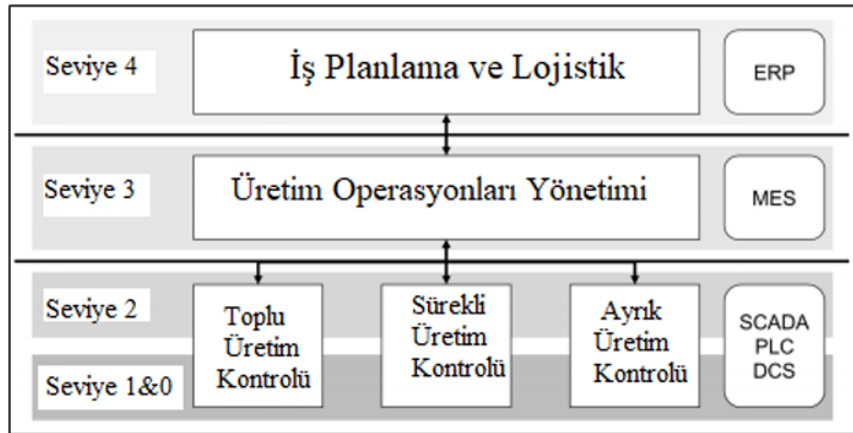
1. ISA-95 (IEC 62264) Standardı ve Purdue Modeli

Literatürde üretim yazılımları üzerine yapılan çalışmaların neredeyse tamamı, ISA-95 (Uluslararası Otomasyon Topluluğu) standardını veya eşdeğeri olan IEC 62264'ü referans almaktadır. Bu standart, "Kurumsal Sistemler ve Kontrol Sistemleri Entegrasyonu" başlığını taşır ve temel olarak Purdue Kurumsal Referans Mimarisi (PERA) modelini temel alır. Bu model, endüstriyel bir tesisteki fonksiyonları 5 hiyerarşik seviyeye ayırır:

- **Seviye 0 (Sıfır): Saha Cihazları Seviyesi** Bu seviye, üretimi gerçekleştiren fiziksel cihazları içerir. Sensörler (sıcaklık, basınç, pozisyon), aktüatörler (motorlar, vanalar) ve robotik kollar bu seviyenin bileşenleridir.
- **Seviye 1 (Bir): Temel Kontrol Seviyesi** Seviye 0'daki cihazları doğrudan kontrol eden, "Programlanabilir Mantıksal Denetleyiciler" (PLC) ve "Dağıtık Kontrol Sistemleri" (DCS) bu katmanda yer alır. Gerçek zamanlı (real-time) kontrol işlemleri burada yürütülür.

- **Seviye 2 (İki): Gözetim ve Kontrol Seviyesi (SCADA/HMI)** Bu seviye, birden fazla PLC veya kontrol cihazını denetleyen, operatörlere süreçleri izleme ve müdahale etme imkanı tanıyan yazılımları içerir. "İnsan-Makine Arayüzü" (HMI) ve "Veri Toplama ve Denetleme Sistemleri" (SCADA) bu katmanın tipik yazılımlarıdır.
- **Seviye 3 (Üç): İmalat Operasyonları Yönetimi (MES/MOM) Seviyesi** Projemizin odak noktasını oluşturan seviyedir. Seviye 2'den toplanan ham veriyi (örneğin; "Makine A, 5 saniye durdu") alır ve Seviye 4'ten gelen iş emirleriyle (örneğin; "100 adet X ürünü üret") birleştirilerek anlamlı hale getirir. Bu seviye "Ne zaman, nerede, kim tarafından, hangi malzemeyle, ne kadar sürede üretildi?" sorularına yanıt verir. ISA-95, bu seviyedeki temel fonksiyonları (Üretim Takibi, Kalite Yönetimi, Bakım Yönetimi, Malzeme Takibi vb.) detaylı olarak tanımlar.
- **Seviye 4 (Dört): Kurumsal İş Planlama Seviyesi (ERP)** İşletmenin tüm kaynaklarını (finans, insan kaynakları, stok, sipariş) yöneten kurumsal yazılımlardır (Örn: SAP, Oracle, yerel ERP'ler). Bu seviye "Ne üretilmeli?" ve "Hangi kaynaklar mevcut?" sorularına odaklanır.

ISA-95'in temel katkısı, özellikle Seviye 3 (MES) ve Seviye 4 (ERP) arasındaki bilgi alışverişini standartlaştırmasıdır. Hangi verinin (üretim emri, malzeme listesi, OEE raporu, kalite sonucu) hangi sistemden hangisine, hangi formatta akması gerektiğini tanımlayan "B2MML" (Business To Manufacturing Markup Language) adında bir XML şeması sunar.



Tablo 1: Business To Manufacturing Markup Language

2. Birlikte Çalışabilirlik Standardı: OPC UA (IEC 62541)

ISA-95 hiyerarşiyi tanımlarken, farklı marka cihazların birbirleriyle nasıl "konuşacağını" belirlemez, bu da entegrasyonu zorlaştırır. Bu "birlikte çalışabilirlik" sorununu çözmek için geliştirilen OPC UA (Unified Architecture) standardı, platformdan ve markadan bağımsız, güvenli bir iletişim protokolü sunar. Bu sayede OPC UA, modern MES sistemlerinin Seviye 2 (SCADA/PLC) ile Seviye 3 (MES) arasında veri alışverişini yapabilmesi için Endüstri 4.0'ın temel gerekliliği haline gelmiştir.

3. Parti Üretim Standardı: ISA-88 (IEC 61512)

Eğer üretim sistemi "parti" (batch) bazlı bir üretim yapıyorsa (ilaç, kimya, gıda sektörleri gibi), ISA-88 standardı devreye girer. Bu standart, reçete yönetimi, üretim prosedürleri ve ekipman hiyerarşisi için standart bir model ve terminoloji sağlar. ISA-88, MES sistemlerinin "nasıl" üretileceğini (reçete ve prosedür) tanımlarken, ISA-95 "ne kadar" üretileceğini (iş emri ve zamanlama) yönetir. Bu iki standart, modern MES mimarilerinde sıklıkla birlikte kullanılır.

AKADEMİK LİTERATÜRDE MES UYGULAMALARI VE YAKLAŞIMLAR

Yukarıda belirtilen standartlar ışığında, akademik literatür (YÖK Tez Merkezi, IEEE Xplore, ScienceDirect vb.) incelendiğinde, çalışmaların belirli alanlarda yoğunlaştığı görülmektedir.

1. MES Mimarisi ve ISA-95 Odaklı Modelleme Çalışmaları

Akademik çalışmaların önemli bir kısmı, ISA-95 standardının teorik modellerini alıp, bu modelleri belirli bir endüstriye (genellikle otomotiv, beyaz eşya veya KOBİ'ler) uygulama üzerine odaklanmaktadır.

- Şen, M. (2019). ISA-95 standardına dayalı bir üretim yönetim sistemi (MES) modellemesi ve uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi. Bu çalışmada, Kocaeli Üniversitesi bünyesindeki laboratuvar ölçekli bir üretim hattı için ISA-95'in Seviye 3 faaliyet modelleri (üretim operasyonları, kalite, bakım) temel alınarak bir MES yazılımı tasarlanmış ve uygulanmıştır. Bu tür tezler, standardın teoriden pratiğe nasıl aktarıldığını göstermesi açısından önemlidir.
- Brandl, D. L. (2006). Design Patterns for Integrating Manufacturing Systems (Following ISA-95). MESA International. Bu ve benzeri MESA (Manufacturing Enterprise Solutions Association) yayınları, akademik çalışmalara sıklıkla referans olmaktadır. Brandl, ISA-95'i uygularken karşılaşılan yaygın yazılım mimarisi sorunları için "tasarım kalıpları" (design patterns) önermektedir. Bu, bir yazılımın esnek ve ölçeklenebilir olması için kritik bilgiler içerir.

2. Veri Toplama, Dikey Entegrasyon ve OPC UA Çalışmaları

Özellikle Endüstri 4.0 ve IIoT (Endüstriyel Nesnelerin İnterneti) kavramlarının yükselişiyle birlikte, literatürde Seviye 2'den Seviye 3'e veri toplama yöntemlerine odaklanan çalışmalar artmıştır.

- Kaya, A. (2020). Endüstriyel nesnelerin interneti (IIoT) için OPC UA tabanlı MES entegrasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi. Bu tez, farklı protokollerde konuşan (Modbus, Profinet vb.) eski tip makinelerin (legacy systems) verilerinin nasıl toplanıp, OPC UA standardı üzerinden merkezi bir MES yazılımına aktarılabilirliğini incelemektedir. Bu, sahadaki heterojen (farklı marka/model) makine parkurları için hayati bir soruna çözüm önermektedir.

- Ribeiro, L., & Barata, J. (2017). An OPC UA based architecture for MES integration in SMEs. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Bu makale, KOBİ'lerin (Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler) MES entegrasyonundaki zorluklarına odaklanmaktadır. KOBİ'ler genellikle yüksek maliyetli ve karmaşık sistemleri karşılayamazlar. Çalışma, OPC UA'nın sağladığı standartlaşma sayesinde daha düşük maliyetli ve modüler MES yapılarının KOBİ'ler için nasıl tasarlanabileceğini tartışmaktadır.

3. MES Fonksiyonları Odaklı Akademik Çalışmalar (Performans, Kalite)

Literatürdeki bir diğer yoğunlaşma alanı, MES'in belirli bir fonksiyonunu (OEE-Toplam Ekipman Etkinliği, Kalite Kontrol veya Kestirimci Bakım) ele alan ve bu alanda optimizasyon sağlayan çalışmalardır.

- Gölzer, P., & Happe, J. (2015). *Manufacturing Operations Management (MOM) based on IEC 62264: A literature review on Quality Operations Management*. 10th International Conference on Digital Enterprise Technology (DET). Bu çalışma, spesifik olarak ISA-95'in "Kalite Operasyonları Yönetimi" modelini inceleyen bir literatür taramasıdır. Sahadan alınan kalite verisinin (İstatistiksel Süreç Kontrolü-SPC) MES içinde nasıl yönetilmesi ve ERP sistemine nasıl raporlanması gerektiğine dair akademik boşlukları ve eğilimleri özetlemektedir.

Mimari Yönteminiz: ISA-95 (Purdue Modeli)

Seviye 0 (Saha Cihazları):

- Konveyör motorları
- Piston
- Kamera sensörü
- Robot kolun motorları ve tutucusu
- Çizgi takip sensörleri (Taşıma robotu için)

Seviye 1 (Kontrol):

- PLC-1 (Ana Hat): Konveyörü çalıştıran, kameradan gelen "hatalı/sağlam" sinyalini okuyan ve pistonu ateşleyen ana kontrolcü.
- PLC-2 (Robot Kontrol): Çizgi takip robotunu süren, robot kolu yöneten ve hangi kutunun (kırmızı/mavi) nereye konulacağına karar veren kontrolcü

Seviye 2 (MES)

Görevi: Seviye 1/2'deki PLC'lerden verileri toplamak.

- Toplanacak Veriler: Toplam üretilen ürün sayısı, hatalı ürün sayısı (ve belki hata tipi), kırmızı kutu sayısı, mavi kutu sayısı, sistemin anlık durumu (çalışıyor, durdu, arıza), robotun durumu.

ÖZGÜN DEĞER

1: Anlık Görselleştirme ve Dijital İkiz (Digital Twin)

Literatürdeki MES çalışmaları genellikle toplanan verileri gün sonunda istatistiksel raporlar (OEE, duruş raporu) olarak sunmaya odaklanmıştır. Projemizin özgün değeri, MES ekranının pasif bir raporlama aracı olmasının ötesinde, üretim hattının gerçek zamanlı bir 'Dijital İkizi' (Digital Twin) prototipi olarak çalışmasıdır. OPC UA'dan alınan anlık verilerle (konveyörün hızı, pistonun konumu, robotun hareketi), sahadaki fiziksel akışın birebir aynısı MES ekranında 2D/3D olarak canlandırılacak (görselleştirilecek), böylece operatörlere ve yöneticilere uzaktan anlık izleme ve durumsal farkındalık sağlanacaktır.

2: Akıllı Kalite Tasnifi (Kamera ve MES Entegrasyonu)

Mevcut sistemlerde kamera (Seviye 0) 'hatalı/sağlam' bilgisini direkt PLC'ye (Seviye 1) gönderir ve MES (Seviye 3) sadece '1 adet hatalı ürün' sayısını bilir. Projemizin literatüre katkısı, MES yazılımı ile kamera arasında doğrudan bir entegrasyon kurmaktır. Kameradan alınan 'hatalı' görüntüsü, MES katmanındaki (Seviye 3) bir yapay zeka (görüntü işleme) modülüne gönderilecektir. Bu modül, hatayı sınıflandıracaktır (Örn: 'Çizik Hata', 'Eksik Baskı Hata', 'Yanlış Renk'). Böylece MES ekranı, 'Toplam 10 hatalı ürün' demek yerine, '7 adet çizik, 3 adet eksik baskı hatası tespit edildi, lütfen kalıbı kontrol edin' gibi kök neden analizi yapabilen akıllı bir kalite güvence sistemi sunacaktır.

3: Uçtan Uca Ürün Takibi (Traceability)

Literatürdeki birçok çalışma toplam üretim sayılarına odaklanır. Projemizin özgün değeri, hatta giren her bir kutuya benzersiz bir kimlik atayarak (örn: 'Kutu-ID:101') uçtan uca ürün takibi (traceability) sağlamasıdır. MES yazılımı, 'Kutu-101 (Mavi)' sisteme girdi (Kamera), kalite kontrolden geçti (Piston), robot tarafından alındı (Robot Kol) ve 'Mavi Kutu Alanı-Kutu-A'ya kondu (Robot Kol)' şeklinde her ürünün hayat döngüsünü (ürün soyağacı-genealogy) kaydedecektir. Bu, özellikle ilaç, gıda ve otomotiv yedek parça üretimi için kritik öneme sahip bir fonksiyonun prototipidir.

KAYNAKÇA

Brandl, D. L. (2006). *Design patterns for integrating manufacturing systems (following ISA-95)*. MESA International.

Gölzer, P., & Happe, J. (2016). Manufacturing Operations Management (MOM) based on IEC 62264: A literature review on Quality Operations Management. *Procedia CIRP*, 41, 40-45. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.015>

International Society of Automation (ISA). (2018). *Enterprise-control system integration - Part 1: Models and terminology (ANSI/ISA-95.00.01-2018)*. ISA.

Kaya, A. (2020). *Endüstriyel nesnelerin interneti (IIoT) için OPC UA tabanlı MES entegrasyonu* [Yüksek lisans tezi, Gebze Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.

OPC Foundation. (2017). *OPC Unified Architecture Specification - Part 1: Overview and Concepts (IEC 62541-1)*. OPC Foundation.

Ribeiro, L., & Barata, J. (2017). An OPC UA based architecture for MES integration in SMEs. *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (s. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247605>

Şen, M. (2019). *ISA-95 standardına dayalı bir üretim yönetim sistemi (MES) modellemesi ve uygulaması* [Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.