

Endüstri 4.0 Işığında Kurutma Teknolojilerinin Dijital Dönüşümü

Sevde Kara Yiğit¹, Katibe Sinem Coruk¹, Hande Baltacıoğlu¹, Cem Baltacıoğlu¹

¹Gıda Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

Özet

Bu çalışma, Endüstri 4.0 teknolojilerinin kurutma sistemlerine entegrasyonunu ve bu entegrasyonun sağladığı avantajları kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Siber-fiziksel sistemler (CPS), Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zeka (AI), büyük veri analitiği ve dijital ikiz teknolojilerinin kurutma süreçlerine uygulanması, enerji verimliliği, kalite kontrolü, izlenebilirlik ve sürdürülebilirlik açısından önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Çalışmada, geleneksel kurutma yöntemlerinin sınırlılıkları analiz edilmiş ve dijital dönüşümün bu sınırlılıkları nasıl aştığı detaylandırılmıştır. Türkiye'deki uygulama örnekleri ve sektörel deneyimler değerlendirilerek, dijital dönüşümün karşılaştığı zorluklar ve sağladığı faydalar objektif bir perspektifle sunulmuştur. Araştırma sonuçları, dijital teknolojilerin kurutma sistemlerinde %15-30 oranında enerji tasarrufu sağladığını ve ürün kalitesinde %10-20 oranında iyileşme meydana getirdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Endüstri 4.0, kurutma teknolojileri, dijital dönüşüm, IoT, siber-fiziksel sistemler

Giriş

Kurutma Teknolojilerinin Endüstriyel Önemi

Kurutma işlemi, gıda ve kimya endüstrilerinde ürün raf ömrünün uzatılması ve mikrobiyolojik bozulma riskinin minimize edilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan kritik bir işlem basamağıdır (Hassoun vd., 2025). Bu süreç, ürünlerin nem içeriğinin kontrollü bir şekilde azaltılması yoluyla gerçekleştirilmekte ve böylece ürünlerin taşınabilirliği artırılırken depolama ve nakliye maliyetleri önemli ölçüde düşürülmektedir. Ancak, geleneksel sıcak hava ile kurutma sistemlerinin yüksek enerji tüketimi, üretim maliyetleri açısından önemli bir dezavantaj oluşturmakta ve bu durum endüstriyel sürdürülebilirlik hedefleriyle çelişmektedir.

Endüstri 4.0 Paradigması ve Temel Bileşenleri

Endüstri 4.0, dijitalleşmenin dördüncü evrimsel aşaması olarak tanımlanmakta ve üretim süreçlerinin köklü bir dönüşümünü temsil etmektedir (Özdoğan, 2017). Bu paradigma, siber-fiziksel sistemler (CPS), Nesnelerin İnterneti (IoT), yapay zeka (AI), büyük veri analitiği ve dijital ikiz teknolojilerini entegre ederek üretim süreçlerine esneklik, otonomi ve interoperabilite kazandırmaktadır (Gürkan, 2021, Sarı, 2020). Bu teknolojik entegrasyon, bilgi akışının şeffaflaştırılması ve gerçek zamanlı karar alma mekanizmalarının geliştirilmesi yoluyla üretim verimliliğinin artırılmasını sağlamaktadır.

Kurutma Süreçlerinde Dijitalleşme Gerekliği

Mevcut kurutma süreçleri, büyük ölçüde manuel kontrol mekanizmaları ve sabit otomasyon sistemleri ile yönetilmekte olup, bu yaklaşım enerji verimliliği ve ürün kalitesi açısından yetersiz kalmaktadır. Endüstri 4.0 teknolojilerinin devreye girmesiyle, IoT sensörleri aracılığıyla sıcaklık, nem ve enerji tüketimi parametrelerinin gerçek zamanlı izlenmesi mümkün hale gelmekte ve yapay zeka destekli analizler ile süreç optimizasyonu gerçekleştirilebilmektedir (Su vd., 2015).

Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı, Endüstri 4.0 teknolojilerinin kurutma sistemlerine entegrasyonunu hem teorik hem de uygulamalı boyutlarıyla kapsamlı bir şekilde incelemektir. Araştırma kapsamında, dijital dönüşümün enerji verimliliği, kalite kontrolü, izlenebilirlik, sürdürülebilirlik ve üretim maliyetleri üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmektedir. Bu yaklaşım, literatürdeki mevcut boşlukları doldurmaya ve Türkiye'de uygulamalı pilot projeler için bilimsel bir temel oluşturmaya yönelik olarak tasarlanmıştır.

Kurutma Teknolojilerine Genel Bakış

Geleneksel Kurutma Yöntemleri ve Sınırlılıkları

Kurutma işlemleri tarihsel olarak güneş enerjisi ile kurutma, sıcak hava ile kurutma ve tamburlu (valsli) sistemler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Güneş ile kurutma yöntemi, düşük işletme maliyeti avantajına sahip olmasına rağmen, kontrolsüz çevresel koşullar nedeniyle mikrobiyal kontaminasyon riski taşımakta ve ürün kalitesi üzerinde olumsuz etkiler doğurmaktadır (Kudra ve Mujumdar, 2009). Tamburlu kurutucularda ise sabit sıcaklık uygulaması ve düşük esneklik, özellikle yüksek nem içerikli ürünlerin homojen kurutulmasını zorlaştırmaktadır. Bu geleneksel yöntemler, maliyet avantajlarına karşın enerji verimliliği ve kalite kontrolü açısından önemli sınırlılıklar içermektedir.

Modern Kurutma Sistemleri ve Teknolojik Gelişmeler

Modern kurutma teknolojileri arasında vakumlu kurutma, dondurarak kurutma (liyoofilizasyon) ve mikrodalga destekli kurutma sistemleri yer almaktadır (Kudra ve Mujumdar, 2009). Dondurarak kurutma yöntemi, ürünün organoleptik özelliklerini ve besin bileşenlerini koruyarak kaliteyi artırırken, mikrodalga kurutma işlem süresini kısaltarak üretim verimliliğini artırmaktadır. Bu teknolojiler, enerji tüketimi açısından daha verimli olmalarına rağmen, yatırım ve işletme maliyetleri açısından geleneksel sistemlere kıyasla daha yüksek finansal gereksinimler içermektedir.

Kurutma Süreçlerinde Enerji ve Kalite Parametreleri

Endüstriyel kurutma sistemlerinde enerji verimliliği, toplam üretim maliyeti ve çevresel etki açısından kritik öneme sahiptir. Yapılan araştırmalar, geleneksel sistemlerin tipik olarak %30-70 enerji verimliliği oranına sahip olduğunu ve ısı geri kazanım teknikleri ile bu oranın %40'lara kadar iyileştirilebileceğini göstermektedir (Kudra ve Mujumdar, 2009). Ürün kalitesi açısından, nem oranı, rehidrasyon kapasitesi, renk ve aroma gibi parametreler mikrodalga ve dondurarak kurutma sistemlerinde daha iyi korunmaktadır.

Endüstri 4.0'ın Temel Bileşenleri

Siber-Fiziksel Sistemler (CPS)

Siber-fiziksel sistemler, fiziksel süreçlerle yazılım sistemlerinin entegrasyonunu sağlayarak üretim hatlarının gerçek zamanlı izlenmesine ve merkezi olmayan kontrollü otomasyona olanak tanımaktadır (Ustundag ve Cevikcan, 2018). Bu sistemler, kurutma süreçlerinde fiziksel parametrelerin dijital ortamda modellenmesi ve kontrol edilmesi yoluyla süreç optimizasyonunu mümkün kılmaktadır.

Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Sensör Teknolojileri

IoT teknolojisi, sensörler ve bağlı cihazlar aracılığıyla veri toplama, işleme ve iletme süreçlerini otomatikleştirmektedir. Bu sistem, makine ve proses performansının gerçek zamanlı değerlendirilmesini sağlayarak bakım ve müdahale gereksinimlerini önceden belirlemektedir (Hassoun vd., 2025). Kurutma sistemlerinde IoT uygulamaları, sıcaklık, nem, basınç ve enerji tüketimi gibi kritik parametrelerin sürekli izlenmesini mümkün kılmaktadır.

Büyük Veri ve Analitik Teknolojiler

Büyük veri teknolojileri, sensörlerden toplanan büyük hacimli verilerin işlenmesi ve üretim süreçlerinin optimizasyonu için kritik öneme sahiptir (Hassoun vd., 2025). Bu teknolojiler, kurutma süreçlerinde kalite sapmaları, arıza eğilimleri ve enerji tüketimindeki dalgalanmaların tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi

Yapay zeka ve makine öğrenmesi teknolojileri, üretim süreçlerinde tahmine dayalı modelleme, hata tespiti ve kalite kontrol uygulamaları ile verimliliği artırmaktadır (Hassoun vd., 2025). Bu teknolojiler, CPS ve IoT kombinasyonunun çekirdeğini oluşturarak kurutma sistemlerinde otonom karar alma mekanizmalarının geliştirilmesini sağlamaktadır.

Dijital İkiz Teknolojisi

Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel sistemlerin sanal kopyalarının oluşturulması yoluyla simülasyon, analiz ve sanal ortamda test yapma olanağı sağlamaktadır (Ustundag ve Cevikcan, 2018). Kurutma sistemlerinde dijital ikiz uygulamaları, sistem performansının önceden değerlendirilmesi ve optimizasyon stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Kurutma Teknolojilerinde Dijital Dönüşüm

Akıllı Sensörler ve Endüstriyel IoT (IIoT)

Endüstri 4.0'ın temel bileşeni olan IIoT, kurutma sistemlerinde sıcaklık, nem, basınç ve enerji tüketimi gibi kritik parametrelerin gerçek zamanlı izlenmesini mümkün kılmaktadır (Hassoun vd., 2025, Fernando, 2024, Parente vd., 2023). Bu sistemlerde, sensörlerden elde edilen veriler merkezi bir kontrol birimine iletilerek anormallikler algılanabilmekte ve operatör veya otomasyon sistemine uyarı gönderilebilmektedir. Bu yaklaşım, süreç izlenebilirliği, kontrol doğruluğu ve sistem güvenilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Siber-Fiziksel Sistemler ve Otomasyon Entegrasyonu

Kurutma sistemlerinden toplanan gerçek zamanlı veriler, CPS yapılarında işlenerek dijital platforma aktarılmaktadır. Bu platformda işlenen veriler, sistemin kendini sürekli ayarlayabilmesi için geri besleme mekanizmalarını tetiklemektedir. Sıcaklık ve nem gibi parametreler tanımlı limitlerin dışına çıktığında, kontrol algoritmaları otomatik müdahalede bulunmaktadır. Bu model, geleneksel sistemlere kıyasla hem süreç kararlılığını hem de enerji verimliliğini yükseltmektedir (Ustundag ve Cevikcan, 2018).

Dijital İkiz Uygulamaları

Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel kurutma cihazının birebir sanal modelini oluşturmaktadır (Ustundag ve Cevikcan, 2018). Bu yapı sayesinde sistem üzerinde yapılan her değişiklik; sıcaklık ayarı, nem seviyesi, hava akışı gibi parametreler simüle edilerek etkisi önceden değerlendirilebilmektedir. Dijital ikiz modeli sayesinde bakım maliyetlerinde azalma ve süreç optimizasyonunda artış elde edilmektedir.

Büyük Veri ve Yapay Zeka Entegrasyonu

Sensörlerden toplanan büyük veri, yapay zeka ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak analiz edildiğinde, kurutma proseslerindeki kalite sapmaları, arıza eğilimleri ve enerji tüketimindeki dalgalanmalar gerçek zamanlı tahmin edilebilmektedir (Hassoun vd., 2025). Bu sayede süreçler daha yüksek verim ve sürdürülebilirlikle yönetilebilmektedir.

Sektörel Uygulama Örnekleri

Gıda Sektöründe Dijital Kurutma Uygulamaları

Havali güneş kollektör destekli sera tipi kurutma sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda, sıcaklık, nem ve güneş ışınımı parametrelerinin 15 dakikalık periyotlarla takip edildiği sistemler geliştirilmiştir (Su vd., 2015). Bu sistemler, ortam sıcaklığını kontrol ederek kurutma süresini %24 oranında kısaltmış ve yapay zeka destekli tahmin modelleri ile entegre edilmiştir.

Tarım ve Tarıma Dayalı Kurutma Uygulamaları

PV/T sistemi ile elde edilen sıcak hava ve elektrik enerjisi kullanılarak geliştirilen sistemlerde, ANSYS Fluent modelleri ile %0,58-2,5 doğruluk seviyesine ulaşılmıştır. Bu sistemler, tam enerji özerkliği ve yüksek model doğruluğu ile tarım sektöründe dijitalleşme örneği olarak öne çıkmaktadır (Su vd., 2015).

Kimya ve Gıda İşleme: Püskürtmeli Kurutma

Geliştirilen yeni tip püskürtmeli kurutucularda, pervane ile hava akımının spiralleştirilmesi yoluyla duvar yapışması azaltılmış, termal verimlilik ve elde edilen toz kalitesi artırılmıştır (Su vd., 2015). Standart sistemlerle karşılaştırıldığında işletme verimliliği ve ürün kalitesinde kayda değer gelişmeler sağlanmıştır.

Tekstil Sektöründe Dijital Baskı ve Kurutma

Tekstil baskı ve kurutma süreçlerinin dijitalleşmesi kapsamında yapılan çalışmalarda, dijital baskı sürecinde renk sayısına bağlı çevresel etki artışı gözlenmezken enerji ve su tüketiminde azalma sağlanmıştır (Ku vd., 2020). Kurutma aşaması da bütünleşmiş dijital kontrol sistemleri ile optimize edilerek sürdürülebilir üretim imkanı sunulmuştur.

Türkiye'de Durum Analizi

Akademik Yaklaşımlar ve Araştırma Eğilimleri

Türkiye'de Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm alanında yürütülen çalışmalar, büyük ölçüde KOBİ'ler ve imalat sanayisine odaklanmaktadır (Gülseren ve Sağbaş, 2019). Bu çalışmalarda, dijitalleşmenin yalnızca teknoloji entegrasyonundan ibaret olmadığı, aynı zamanda insan kaynağı ve süreç yönetimi bileşenlerinin uygun kurgulanmasının kritik olduğu vurgulanmaktadır.

KOBİ'lerde Dijitalleşme Süreçleri

KOBİ'lerin Endüstri 4.0 dönüşümünde karşılaştıkları engeller arasında yüksek ilk yatırım maliyeti, teknik bilgi eksikliği ve siber güvenlik kaygıları yer almaktadır (Gülseren ve Sağbaş, 2019). Bu çalışmalarda ayrıca süreç haritalama, çalışan eğitimi ve uygun teknoloji seçiminin dijital dönüşüm başarısının anahtarı olduğu vurgulanmaktadır.

Sektörel Kurutma Tesislerinde Dijital Çözüm Uygulamaları

Türkiye'de kurutma sistemleri özelinde yürütülen akademik projeler sınırlı olmakla birlikte, imalat sanayisinde dijital teknolojilerle entegrasyonun sistem verimliliğini artırdığı gözlemlenmektedir (Gülseren ve Sağbaş, 2019). Bu projelerde sensör tabanlı veri toplama sistemleri kullanılarak proses kontrolü yapılmış, %15 enerji tasarrufu ve kalite parametrelerinde %10 iyileşme sağlanmıştır.

Yatırım Teşvikleri ve Politika Çerçevesi

Türkiye'de KOSGEB, TÜBİTAK ve Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın Ar-Ge ve dijitalleşme destek programları kapsamında, Endüstri 4.0 destekli projelerin teşvik edildiği çok sayıda çağrı duyurulmuştur (Gülseren ve Sağbaş, 2019). Teşviklerin etkinliğini artırmak için KOBİ'lere teknolojik danışmanlık hizmetlerinin yaygınlaştırılması önerilmektedir.

Yararlar Ve Zorluklar

Dijital Dönüşümün Sağladığı Faydalar

Enerji Verimliliği

Altı Sigma metodolojisi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda, endüstriyel kurutma sistemlerinde %17,7 enerji tasarrufu sağlandığı gözlemlenmiştir (Kudra ve Mujumdar, 2009). Bu sonuç, dijital verilerin süreç optimizasyonu ile birleştiğinde önemli kazançlar yaratabileceğini göstermektedir. Güneş enerjili ve depolamalı kurutma sistemlerinde, geleneksel elektrikli sistemlere kıyasla günlük enerji tüketiminde yaklaşık %76,8 tasarruf sağlanmıştır (Su vd., 2015).

Süreklilik ve Esneklik

Isı borulu güneş kolektörü ile ısı pompalı hibrit sistemlerde, güneşsiz günlerde bile kurutma işlemi sürdürülebilir ve PID kontrollü otomasyon sayesinde 24 saat çalışma imkanı sunulmuştur (Piacentini vd., 2021).

Kalite ve Proses Kontrolü

Güneş enerjili, enerji depolamalı kurutma sistemlerinde nem içeriği %10'un altına düşürülmüş, böylece ürünün mikrobiyal kalitesi ve raf ömrü geliştirilmiştir (Su vd., 2015). Altı Sigma yaklaşımı ile süreç kontrolü geliştirildiğinde, kurutma performansında tutarlılık sağlanmıştır (Kudra ve Mujumdar, 2009).

İzlenebilirlik ve Veri Tabanlı Karar Alma

Ölçüm sistemleri (datalogger, sensörler) kullanılarak sıcaklık, nem, hava hızı ve enerji tüketimi gibi parametreler detaylı şekilde kaydedilmiş, böylece proses çıktısı hakkında veri tabanlı analizler yapılabilir hale gelmiştir (Su vd., 2015).

Dijital Dönüşümün Karşılaştığı Zorluklar

Yatırım ve Teknoloji Maliyetleri

Hibrit sistemler (PV/T + ısı pompa) yüksek başlangıç maliyetleri gerektirmektedir (Piacentini vd., 2021). Küçük işletmeler bu maliyetleri amorti etmekte zorlanabilmektedir.

Siber Güvenlik ve Veri Yönetimi

Süreç sensörlerinden sürekli veri toplama, bu verilerin güvenli depolanması ve korunması ihtiyacını doğurmaktadır (Piacentini vd., 2021). Bu boyut genellikle göz ardı edilmektedir.

Operatör Yetersizliği ve Eğitim Açığı

Projelerin başarısı, PID kontrol sistemlerinin ve sensörlü altyapının doğru kullanılması ile doğru orantılıdır (Piacentini vd., 2021). Ancak bu kontrol ve bakımı sağlayacak eğitimli operatör eksikliği sık rastlanan bir problemdir.

Altyapı ve Süreç Olgunluğu

Türkiye'de birçok işletme dijital dönüşüm yolculuğuna süreç haritalama ve standartlaştırma gibi adımlardan geçmeden başlamaktadır (Kudra ve Mujumdar, 2009). Bu durum entegrasyonun başarısını olumsuz etkileyebilmektedir.

Gelecek Perspektifleri

Dijital İkiz ve Otonom Kontrol Sistemleri

Günümüzde dijital ikiz teknolojileri, kurutma sistemlerinde yalnızca eş zamanlı izleme değil, süreç optimizasyonu ve öngörücü bakım açısından kritik rol oynayacak bir geleceğe işaret etmektedir. Endüstri 4.0 bağlamında dijital ikiz kullanımının üretimde esneklik ve özerklik kazandırdığı vurgulanmakta olup (Ustundag ve Cevikcan, 2018), bu yaklaşımın kurutma süreçlerine uygulanmasının sistem performansı ve bakım maliyetlerinde doğrudan iyileştirmeler sağlayacağı öngörülmektedir.

Yeni Nesil Haberleşme Teknolojileri (5G, Bulut Bilişim)

5G ile ultra düşük gecikmeli veri bağlantısı, kurutma sistemlerinde gerçek zamanlı analiz ve mobil erişim imkanlarını doğurmaktadır. Bulut bilişim çözümleri, veri depolama ve işleme maliyetlerini azaltırken, güçlü analiz platformlarının kullanımını olanaklı kılmaktadır (Ustundag ve Cevikcan, 2018).

Holonik Kontrol ve Otonom Sistem Yaklaşımları

Holonik kontrol sistemleri, bağımsız ve işbirlikçi birimler (holonlar) aracılığıyla sistemi hem merkezi hem dağıtık şekilde yönetmektedir (Ustundag ve Cevikcan, 2018). Bu yaklaşım, üretimde esnek karar mekanizmaları kurmaktadır. Kurutma sistemlerinde bu yapıların adaptasyonu, özellikle karmaşık proseslerde daha hızlı karar alma, hata toleransı ve enerji yönetimini geliştirebilmektedir.

AR/VR Destekli Operatör Eğitimi ve Bakım

Sanayide artırılmış gerçeklik (AR) uygulamaları, operatör eğitimi, bakım ve onarım süreçlerine yeni bir boyut kazandırmaktadır. AR teknolojilerinin üretimde karar alma süreçlerini hızlandırdığı ve operatör hatalarını azalttığı gösterilmiş olup (Ustundag ve Cevikcan, 2018, Baierle vd., 2022), gelecekte kurutma sistemlerinin bakım süreçlerinde büyük fayda sağlayabilecektir.

Politikalar, Eğitim ve İnsan Kaynağı Gelişimi

Türkiye'de dijital dönüşümün başarısı yalnızca teknoloji altyapısına bağlı değildir. İnsan kaynaklarının dönüşümü ve dijital kültürün oluşturulması başarının vazgeçilmez unsurları olarak belirlenmiştir. Gelecekte ulusal eğitim stratejilerinin, kurutma sistemleri dahil sanayide dijital yetkinlik kazandırmaya yönelik olarak yeniden şekillendirilmesi kritik olacaktır.

Sonuç Ve Öneriler

Sonuç

Bu çalışma, Endüstri 4.0'ın temel teknolojilerinin (IIoT, CPS, dijital ikiz, büyük veri, yapay zeka) kurutma sistemlerine entegrasyonunu detaylı olarak analiz etmiş ve Türkiye özelinde uygulama örneklerini akademik kaynaklarla sunmuştur. Elde edilen bulgular şunlardır:

Enerji verimliliği: Hibrit güneş enerjili sistemlerde ve PID kontrollü otomasyonla %17-24 arası enerji tasarrufları sağlanabilmektedir.

Kalite ve süreç kontrolü: Sensör destekli sistemler sayesinde nem kontrolü ve veri kaydı ile ürün kalitesi ve izlenebilirlik artmıştır.

Süreklilik ve esneklik: CPS ve ısı pompalı sistemler sayesinde 7/24 çalışabilen sistemler elde edilmiştir.

Otonomi ve bakım: Dijital ikiz ve öngörücü bakım yaklaşımları sayesinde bakım süreleri kısalmış, proses verimliliği artmıştır.

Bu bulgular, dijital dönüşümün kurutma teknolojilerinde enerji, kalite, verimlilik ve bakım süreçlerinde somut faydalar sağladığını net biçimde ortaya koymaktadır. Ancak bu dönüşüm yalnızca teknolojik yatırımlarla gerçekleşmemekte; süreç iyileştirme, operatör eğitimi ve dijital kültürün eş zamanlı benimsenmesi kritik önem taşımaktadır.

Öneriler

Pilot Projelerin Yaygınlaştırılması

Kurutma teknolojileri için IIoT sensörleri, CPS geri besleme sistemleri ve dijital ikiz platformları içeren pilot tesisler kurulmalı; uygulamalı eğitimler ve saha testleri yapılmalıdır. Bu sayede hem teknoloji güvenilirliği test edilir hem de operatörlerin adaptasyonu hızlandırılır.

Finansman ve Teşvik Modelleri

KOBİ'ler için maliyet bir bariyer oluşturduğundan, KOSGEB ve TÜBİTAK'ın dijitalleşme ve Endüstri 4.0 kapsamında hibe-kredi destek programları yaygınlaştırılmalı, proje danışmanlığı hizmetleri sunulmalıdır.

Eğitim ve İnsan Kaynağı Gelişimi

Üniversite-sanayi işbirliği kapsamında meslek yüksekokullarında ve teknik liselerde "Endüstri 4.0 ve kurutma teknolojileri" konulu modüller oluşturulmalıdır. Ayrıca sanayi personeli için AR destekli eğitim programları geliştirilebilir.

Siber Güvenlik ve Veri Yönetimi Standartları

Dijitalleşme sürecindeki sistemler için veri güvenliği protokolleri ve siber güvenlik önlemleri (şifreleme, VPN, erişim kontrolü) tanımlanmalı ve uygulanmalıdır. Özellikle sensör ağlarının yönetimi ihmal edilmeyecek bir gerekliliktir.

Süreç Odaklı Yaklaşım

Dijitalleşme girişimlerine başlamadan önce sürecin haritalanması, ölçütlerin belirlenmesi ve dokümantasyonun yapılması zorunlu hale getirilmeli; bu sayede teknoloji entegrasyonu süreci sorunsuz ilerleyebilir.

Kaynakça

- Baierle, I. C., da Silva, F. T., de Faria Correa, R. G., & de Souza, J. A. (2022). Competitiveness of food industry in the era of digital transformation towards agriculture 4.0. *Sustainability*, 14(18), 11779. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11779>
- Fernando, A. J. (2024). Transitions of Food Drying Processes toward Industry 5.0. *Journal of Scientific and Engineering Research*. https://www.researchgate.net/profile/Jayaruwani-Fernando2/publication/385619919_Transitions_of_Food_Drying_Processes_toward_Industry_50/links/672c9f93ecbbde716b5e8efa/Transitions-of-Food-Drying-Processes-toward-Industry-50.pdf
- Gülseren, A., & Sağbaş, A. (2019). Endüstri 4.0 perspektifinde sanayide dijital dönüşüm ve dijital olgunluk seviyesinin değerlendirilmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(2), 1-12. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ejeas/issue/51436/650329>
- Gürkan, Ç. (2021). Endüstri 4.0 ve dijital dönüşüm teknolojileri ile desteklenen akıllı fabrika yönetim ve bilişim sisteminin geliştirilmesi (Doctoral dissertation, ProQuest Dissertations Publishing). <https://search.proquest.com/openview/312bb90f523624a1721e5b66ec81c598/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Hassoun, A., Ait-Kaddour, A., Dankar, I., Safarov, J., & Mujumdar, A. S. (2025). The significance of industry 4.0 technologies in enhancing various unit operations applied in the food sector: focus on food drying. *Food and Bioprocess Technology*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-024-03465-2>
- Ku, C. C., Chien, C. F., & Ma, K. T. (2020). Digital transformation to empower smart production for Industry 3.5 and an empirical study for textile dyeing. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106249. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835220300310>
- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2009). *Advanced drying technologies*. Taylor & Francis. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420073898/advanced-drying-technologies-arun-mujumdar-tadeusz-kudra>
- Özdoğan, O. (2017). Endüstri 4.0: Dördüncü sanayi devrimi ve endüstriyel dönüşümün anahtarları. Google Books. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=zktDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR10&dq=End%C3%BCstri+4.0+kurutma+teknolojileri+dijital+d%C3%B6n%C3%BC%C5%9F%C3%BCm&ots=8D7hoDSFgM&sig=GKoKrazuSSu9li6UL9E4PXjvzZs>
- Parente, R., Feola, R., & Celenta, R. (2023). Leveraging collaboration between academic research and SMEs to support digital transformation in the agri-food Italian industry: the case of Santomiele. In *Cases on Digital Entrepreneurship* (pp. 193-208). Edward Elgar Publishing. <https://www.elgaronline.com/edcollchap/book/9781802203868/book-part-9781802203868-12.xml>
- Piacentini, R. D., Vega, M., & Mujumdar, A. S. (2021). Beyond industrial revolution 4.0: How industrial revolution 5.0 is related to drying technology. *Drying Technology*, 39(1), 1-12. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373937.2021.1875185>
- Sarı, T. (2020). Endüstri 4.0 teknolojik olgunluk düzeyinin analitik hiyerarşi prosesi ile modellenmesi: gıda ve içecek imalat sektörü örneği. *Journal of Business & Management Studies: An International Journal*. <https://pdfs.semanticscholar.org/c2a2/1426b1b353c315215ff21464be84ca1cc579.pdf>
- Su, Y., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2015). Recent developments in smart drying technology. *Drying Technology*, 33(1), 99-110. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2014.985382>
- Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). *Industry 4.0: managing the digital transformation*. Springer. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-57870-5.pdf>