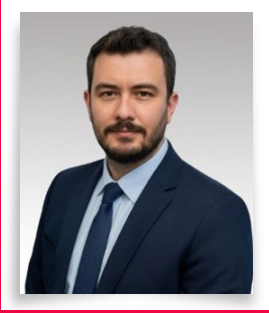


EVAPORATİF SOĞUTMA SİSTEMLERİNDE YAPAY ZEKA DESTEKLİ DİJİTAL İKİZ UYGULAMASI



İbrahim KARATAŞ

Alindair Soğutma Sistemleri
Bilgi Teknolojileri Müdürü

ÖZET

Endüstriyel tesislerde enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik, artan enerji maliyetleri ve çevresel kaygılar nedeniyle kritik öneme sahiptir. Evaporatif soğutma sistemleri, düşük enerji tüketimi avantajı sunmalarına rağmen çevresel koşullara yüksek derecede bağımlıdır ve performansları değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada, endüstriyel evaporatif soğutma sistemleri için uç nokta YZ (Edge AI) destekli hibrit dijital ikiz yaklaşımına dayanan uçtan uca akıllı bir platform önerilmektedir. Geliştirilen dijital ikiz modeli, fizik tabanlı evaporatif soğutma prensiplerini veri odaklı kalibrasyon ile birleştirerek sistem davranışını daha gerçekçi ve adaptif bir şekilde temsil etmektedir. Python tabanlı simülasyonlar aracılığıyla bağıl nem, fan hızı ve su debisinin sistem performansı, enerji tüketimi ve su tüketimi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın karar destek mekanizması olarak kullanılabileceğini ve endüstriyel uygulamalarda uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

ABSTRACT

Energy efficiency and sustainability in industrial facilities have become critical concerns due to rising energy costs and growing environmental challenges. Although evaporative cooling systems offer the advantage of low energy consumption, their performance is highly dependent on environmental conditions and can vary significantly. This study proposes an end-to-end intelligent platform based on an Edge AI-powered hybrid digital twin framework for industrial evaporative cooling systems. The developed digital twin model combines physics-based evaporative cooling principles with data-driven calibration techniques, enabling a more realistic and adaptive representation of system behavior. Using Python-based simulations, the effects of relative humidity, fan speed, and water flow rate on system performance, energy consumption, and water usage were analyzed. The results indicate that the proposed approach can function as an effective decision-support tool and provides a practical solution for industrial applications.

Anahtar Kelimeler: Dijital ikiz, Uç nokta Yapay Zeka (YZ) (Edge AI), evaporatif soğutma, endüstriyel sistemler, enerji verimliliği, endüstriyel nesnelerin interneti (IIoT), tahminsel bakım, hibrit modelleme.

Keywords: Digital twin, Edge AI, evaporative cooling, industrial systems, energy efficiency, Industrial Internet of Things (IIoT), predictive maintenance, hybrid modeling.



1. GİRİŞ

Endüstriyel soğutma sistemleri, küresel ölçekte elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %15'ini oluşturmakta ve bu oran sürekli artmaktadır [1]. Özellikle üretim tesisleri, lojistik depoları ve büyük hacimli kapalı alanlarda iklimlendirme ihtiyacı, enerji maliyetleri ve karbon ayak izi açısından kritik bir problem alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Artan enerji fiyatları, iklim değişikliğinden kaynaklı regülasyonlar ve sürdürülebilir üretim hedefleri, endüstriyel soğutma teknolojilerinin daha verimli, akıllı ve çevre dostu hale getirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Evaporatif soğutma sistemleri, özellikle sıcak ve kuru iklim bölgelerinde mekanik soğutma sistemlerine kıyasla çok daha düşük enerji tüketimi sunmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu sistemler, suyun buharlaşması sırasında ortamdan ısı çekmesi prensibine dayanmakta olup, kompresörlü sistemlere kıyasla hem ilk yatırım maliyetleri hem de işletme maliyetleri açısından avantaj sağlamaktadır [2]. Bununla birlikte evaporatif soğutma sistemlerinin performansı; ortam sıcaklığı, bağıl nem, hava debisi, fan hızı ve su debisi gibi çok sayıda değişkene yüksek derecede bağlıdır.

Geleneksel kontrol ve otomasyon yaklaşımları, bu çok değişkenli ve dinamik yapıyı çoğunlukla sabit eşik değerler veya basit geri besleme PID denetleyicileri ile yönetmektedir. Bu durum, değişen çevresel koşullar altında sistem performansının düşmesine, gereksiz enerji ve su tüketimine ve ekipman ömrünün kısılmasına neden olabilmektedir. Bu noktada, fiziksel sistemlerin davranışlarını sanal ortamda temsil edebilen dijital ikiz yaklaşımları ile gerçek zamanlı karar alma yeteneği sunan uç nokta YZ (Edge AI) teknolojileri önemli bir çözüm potansiyeli sunmaktadır.

Bu çalışma, endüstriyel evaporatif soğutma sistemleri için uç nokta YZ destekli hibrit dijital ikiz yaklaşımına dayanan uçtan uca bir akıllı platform önermektedir. Önerilen yaklaşım, fizik tabanlı modeller ile veri odaklı yapay zekâ yöntemlerini bir araya getirerek hem yorumlanabilir hem de adaptif bir sistem modeli sunmayı amaçlamaktadır.

Tablo 1. Geleneksel sistem yaklaşımlarının temel problemleri ve etkileri.

Geleneksel Sistem Sorunları	Ekonomik & Çevresel Etkiler
Değişken koşullara yavaş adaptasyon	%20-35 fazla enerji tüketimi
Reaktif bakım yaklaşımı	Beklenmeyen duruş maliyetleri
Su tüketimi optimizasyonu eksikliği	%15-%30 fazla su kaybı
Manuel operasyon gereksinimleri	Yüksek işgücü maliyetleri

1.1. Çalışmanın Katkıları

Bu çalışma, yukarıda belirtilen sorunlara çözüm olarak:

- Uç nokta YZ Entegrasyonu:** Gerçek zamanlı veri işleme ve tahminleme için Uç nokta düzeyinde YZ modelleri geliştirilmesi.
- Hibrit Dijital İkiz Modeli:** Fizik tabanlı ve veri odaklı yaklaşımları birleştiren yenilikçi bir dijital ikiz mimarisi önerilmesi.
- Tahminsel Bakım Algoritmaları:** Makina öğrenmesi ile ekipman arızalarını önceden tahmin eden algoritmalar geliştirilmesi.
- Endüstriyel Uygulama:** Gerçek saha koşullarında test edilmiş, ölçeklenebilir bir platform tasarlanmasını amaçlamıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Dijital ikiz kavramı, ilk olarak 2002 yılında Michigan Üniversitesi'nde Dr. Michael Grieves tarafından ürün yaşam döngüsü yönetimi (PLM) bağlamında tanıtılmıştır [3]. NASA, 2010 yılında uzay araçları için dijital ikiz teknolojisini kullanmaya başlamış ve bu teknolojinin endüstriyel uygulamalara yayılmasına öncülük etmiştir [4].

Dijital ikizler; fiziksel bir sistemin yapısal, davranışsal ve işlevsel özelliklerini sanal ortamda temsil ederek simülasyon, izleme, analiz ve optimizasyon imkânı sunmaktadır.

Dijital ikiz teknolojilerinin endüstride yaygınlaşmasını sağlayan temel faktörleri; IoT sensörleri, yüksek işlem gücü, veri analitiği ve yapay zekâ algoritmaları olarak tanımlamıştır [5]. Bununla birlikte, yüksek hacimli



verilerin bulut ortamına sürekli aktarılması; gecikme, güvenlik ve maliyet gibi sorunları da beraberinde getirmektedir.

Evaporatif soğutma sistemleri üzerine yapılan çalışmaların büyük bir bölümü, ASHRAE tarafından tanımlanan fizik tabanlı modelleri temel almaktadır [6]. Bu modeller, teorik olarak sistem davranışını açıklamakta, başarılı olmakla birlikte gerçek saha koşullarında ortaya çıkan sensör hataları, çevresel dalgalanmalar ve ekipman yaşlanması gibi faktörleri yeterince temsil edememektedir.

Son yıllarda, veri odaklı ve makina öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar, enerji sistemlerinde performans tahmini ve optimizasyon amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Ancak literatürde evaporatif soğutma sistemleri özelinde uç nokta YZ tabanlı dijital ikiz uygulamalarının sınırlı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, bu çalışma literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

3. YÖNTEM

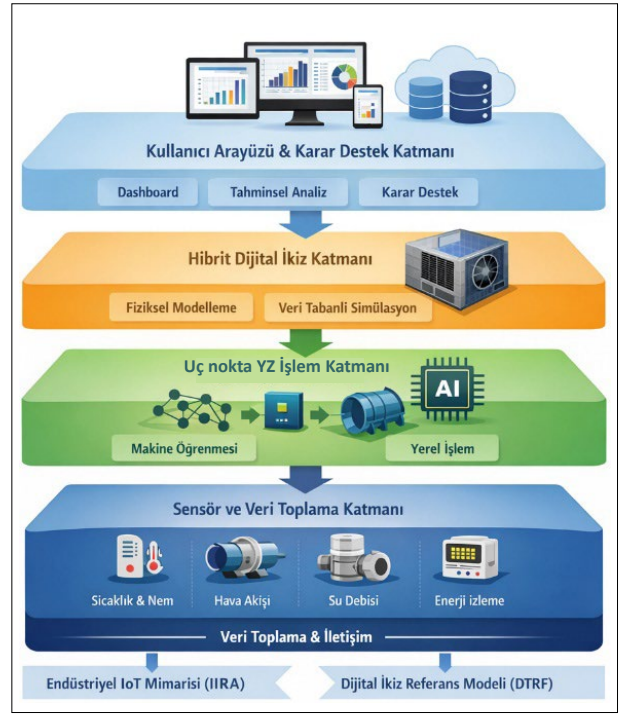
Sistem mimarisi uç nokta YZ destekli dijital ikiz platformu, katmanlı bir mimari üzerine inşa edilmiştir (Şekil 1). Bu mimari, endüstriyel IoT referans mimarisi olan endüstriyel internet referans mimarisi (IIRA-Industrial Internet Reference Architecture) ve dijital ikiz referans modeli Dijital İkiz Yazılım Çatısı/ Mimari (DTRF-Digital Twin Reference Framework) prensipleri dikkate alınarak tasarlanmıştır.

Önerilen uçtan uca akıllı platform, dört ana katmandan oluşmaktadır:

1. Sensör ve Veri Toplama Katmanı
2. Uç nokta YZ İşlem Katmanı
3. Hibrit Dijital İkiz Katmanı
4. Kullanıcı Arayüzü ve Karar Destek Katmanı

Sensör katmanında ortam sıcaklığı, bağıl nem, giriş ve çıkış hava sıcaklıkları, fan hızı, su debisi ve enerji tüketimi gibi parametreler gerçek zamanlı olarak toplanmaktadır. Bu veriler, düşük gecikmeli haberleşme protokolleri aracılığıyla uç nokta YZ birimine aktarılmaktadır.

Uç nokta YZ katmanı, verilerin ön işlenmesi, aykırı değerlerin filtrelenmesi ve kısa vadeli tahminlerin yapılmasından sorumludur. Bu yaklaşım, sistemin bulut bağımlılığını azaltmakta ve gerçek zamanlı karar alma yeteneğini güçlendirmektedir.



Şekil 1. Önerilen uç nokta YZ destekli dijital ikiz mimarisi.

4. DİJİTAL İKİZ MODELİ

Uç nokta paradigması, verilerin kaynağında işlenmesi prensibine dayanmakta ve özellikle endüstriyel IoT uygulamalarında kritik öneme sahiptir. Uç nokta gecikme, bant genişliği ve güvenlik avantajlarını detaylandırmıştır [7].

YZ modellerinin uç nokta cihazlarda çalıştırılması, TensorFlow Lite, ONNX Runtime ve Apache TVM gibi yazılım çatıları sayesinde mümkün hale gelmiştir. Uç nokta YZ'nin endüstriyel uygulamadaki performans kazanımı %40-60 aralığında raporlamıştır [8].

Önerilen dijital ikiz modeli, iki ana bileşenden oluşmaktadır:

- Fizik tabanlı evaporatif soğutma modeli
- Veri odaklı uç nokta YZ kalibrasyon modeli

Fizik tabanlı model, evaporatif soğutma verimi, giriş hava sıcaklığı, çıkış hava sıcaklığı ve yağ termometre sıcaklığı arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Ancak bu model, sabit varsayımlar içerdiğinden dinamik koşullara sınırlı uyum sağlamaktadır.

Bu nedenle, uç nokta YZ bileşeni; geçmiş sensör verileri üzerinden öğrenilen örüntülerle fizik tabanlı model çıktısını sürekli olarak kalibre etmektedir. Bu hibrit yapı, hem modelin yorumlanabilir oluşunu korumakta hem de adaptif bir davranış sergilemesini sağlamaktadır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Simülasyon sonuçları, bağıl nem oranının artmasıyla evaporatif soğutma performansının azaldığını göstermektedir. Su debisinin artırılması belirli bir seviyeye kadar sistem verimini artırmakta, ancak bu noktadan sonra marjinal kazanımlar azalmaktadır.

Enerji tüketimi analizleri, fan hızının toplam enerji tüketimi üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Hibrit dijital ikiz yaklaşımı, yalnızca fizik tabanlı modele kıyasla daha kararlı ve adaptif sonuçlar üretmiştir. Uç nokta YZ entegrasyonu, sistemin gerçek zamanlı izlenmesi ve hızlı karar alma süreçlerini desteklemektedir.

Evaporatif soğutma, enerji verimliliği ve çevre dostu yapısı ile endüstriyel iklimlendirmenin geleceğini şekillendirmektedir. Bu çalışmada gösterildiği üzere, yapay zeka teknolojilerinin evaporatif soğutma sistemleri ile entegrasyonu:

- **Enerji Verimliliği:** IoT ve YZ sayesinde %32 enerji tasarrufu
- **Operasyonel Mükemmellik:** Tahminsel bakım ile %78 duruş azalması
- **Sürdürülebilirlik:** %28 su tasarrufu ve sıfır kimyasal kullanım
- **Ekonomik Kazanç:** 1.8 yıl geri dönüş süresi ile yüksek yatırım geri dönüşü sağlamaktadır.

6. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, endüstriyel evaporatif soğutma sistemleri için uç nokta YZ destekli hibrit dijital ikiz yaklaşımına dayanan uçtan uca bir akıllı platform önerilmiştir. Geliştirilen model, enerji ve su tüketiminin optimize edilmesi, sistem performansının izlenmesi ve karar destek süreçlerinin güçlendirilmesi açısından uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, gerçek endüstriyel tesislerden elde edilecek uzun dönemli sensör verileri ile modelin doğrulanması, tahminsel bakım algoritmalarının dijital ikize entegre edilmesi ve uç nokta YZ donanımlarının

saha koşullarına uygun olarak optimize edilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] IEA (2023). Energy Efficiency 2023. International Energy Agency, Paris
- [2] Cuce, E., & Riffat, S. B. (2016). A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1240-1249.
- [3] Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *Digital Twin White Paper*, 1(2014), 1-7.
- [4] Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures meeting* (p. 1818).
- [5] Fuller, A., et al. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971.
- [6] ASHRAE (2021). Evaporative Air-Cooling Equipment. *ASHRAE Handbook - HVAC Applications*, Chapter 52.
- [7] Chen, J., & Ran, X. (2019). Deep learning with edge computing: A review. *Proceedings of the IEEE*, 107(8), 1655-1674.

ÖZGEÇMİŞ

2014 yılında Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi Bölümü'nden mezun olan İbrahim KARATAŞ, Microsoft Türkiye'de gerçekleştirilen staj sürecinde kurumsal yazılım ve bulut tabanlı sistemler üzerine önemli deneyimler edinmiştir.

2016 yılında Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği yüksek lisans programı kapsamında "Tekstil Kumaşlarında Yapay Görme Sistemleri ile Hata Tespit Uygulaması" başlıklı tez çalışmasını tamamladıktan sonra iş hayatında yazılım ve ERP alanlarında uzmanlaşma sağlanmış ve kariyer bu doğrultuda sürdürmüştür.

Halen Alindair Soğutma Sistemleri San. ve Tic. A.Ş.'de Bilgi Teknolojileri Müdürü olarak görev yapan İbrahim KARATAŞ, eğitimden mühendisliğe ve yazılım geliştirmeye uzanan kariyer yolculuğunda disiplinler arası birikimlerle ilerlemektedir.