

Görölmeyeni Görmek: Nükleer Santrallarda Nesnelerin İnterneti (IoT) Tabanlı Kestirimci Bakım

Harun ŞAHİN
TEİAŞ Genel Müdürlüğü / ETKB
@Ankara - 2025

Nesnelerin İnterneti (IoT) Nedir?



Üzerinde sensör
bulunan nesneler
(cihazlar) ...



Böylece cihazlar işlem
yapmaya yönlendirilir.



... farklı haberleşme
teknolojileri ile sistem
arasında ...



IoT Teknolojileri
verimlilik ve yeni gelir
kalemleri, kaliteyi
yükseltmek, iş
güvenliğini artırmak
için ihtiyaç duyarız.



... iletişim kurarak
cihazdan giden veya
gelen veri işlenir.



Üretim izleme sistemleri
Üretim Yönetim Sis.
Kestirimci Bakım
Enerji Veri Yönetimi
Lojistik ve Dağıtım vb.

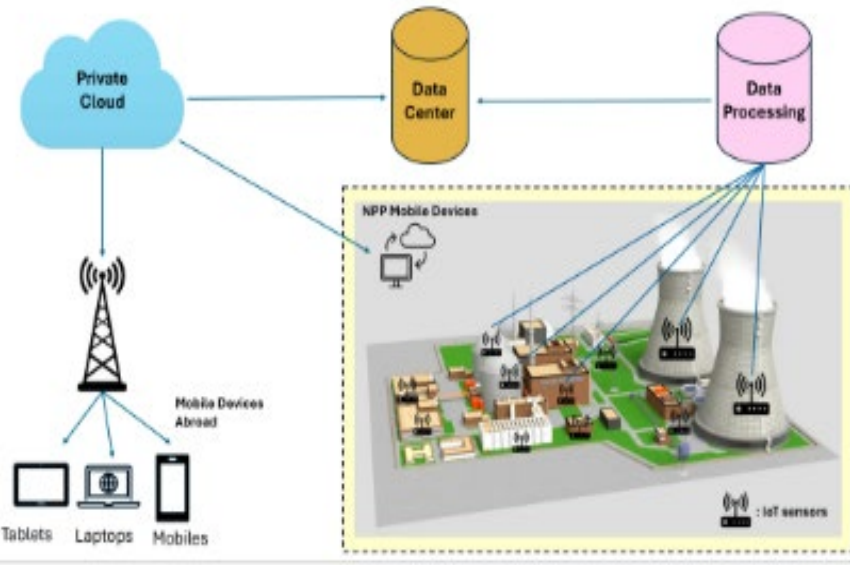


Nükleer Santrallerde Nesnelerin İnterneti (IoT)

Nesnelerin İnterneti, nükleer santrallerde ekipmanların ve sensörlerin birbirine bağlı olarak veri toplayıp analiz etmesini sağlayarak, güvenliğini ve verimliliğini artıran teknolojidir.



Ancak geleneksel bakım yöntemleri, öngörü eksikliği, yüksek maliyetler ve güvenlik riskleri gibi önemli sınırlılıklar taşır.



Yüksek Enerji Üretim Kapasitesi

Nükleer enerji santralleri, diğer enerji kaynaklarına kıyasla çok yüksek miktarda elektrik enerjisi üretebilir.

Çevreye Sıfır Karbon Salımı

Nükleer enerji üretimi sırasında fosil yakıtların aksine doğrudan karbondioksit (CO₂) salımı gerçekleşmez.

Kaynak: IAEA

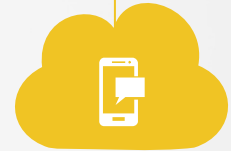


Karmaşıklık

Nükleer enerji santralleri yüksek teknoloji, hassas ekipman ve uzmanlık gerektirir.



Santralin tasarımı, inşası ve işletilmesinde çok sayıda güvenlik önlemi alınmasını zorunlu kılar.



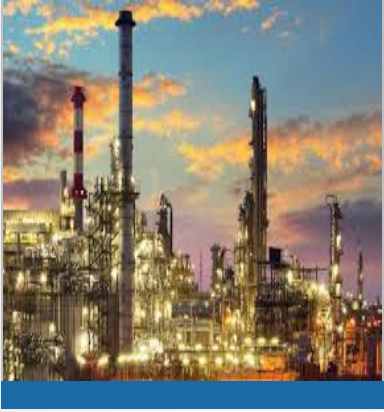
Yakıtın imalatı, reaktörün işletimi ve atık yönetimi konusunda özel uzmanlık gerektirir.



Nükleer Enerji Santrallerinin Önemi ve Karmaşıklık,
Yüksek Enerji Üretim Kapasitesi,
Çevreye Düşük Karbon Salımı.

Nükleer Enerji Santral

Kritik altyapı olması sebebiyle yüksek güvenlik ve verimlilik gereksinimi



Kritik Altyapı Olması

Nükleer enerji santralleri, bir ülkenin enerji arzının temel taşlarından biridir.



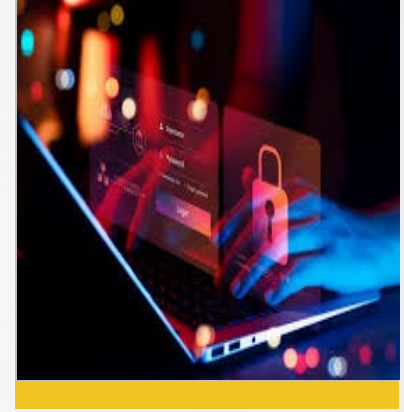
Yüksek Güvenlik Gereksinimi

Nükleer santrallerin muhteviyatındaki radyoaktif materyaller ve yüksek enerji yoğunluğu, potansiyel risklerin çok ciddi olmasına neden olmaktadır.



Yüksek Emraamadelik ve Verimlilik Gereksinimi

Enerji arzının kesintisiz ve ekonomik olması için santrallerin yüksek emraamadelik ve verimlilikle çalışması gerekir.



Nükleer enerji santralleri, kritik altyapı olarak yüksek güvenlik standartlarına uyum sağlamak zorundadır.

Güvenliğin sağlanması, toplum ve çevre için riskleri minimize ederken; yüksek emraamadelik ve verimlilik, enerji üretiminin sürdürülebilir ve ekonomik olmasını garantiler.

Geleneksel bakım yöntemlerinin sınırlılıkları

Nükleer santrallerde kullanılan geleneksel bakım yöntemleri genellikle periyodik ve reaktif bakımı içerir.



Kestirim Eksikliği

Arızalar veya ekipman sorunları ancak meydana geldikten sonra tespit edilir.



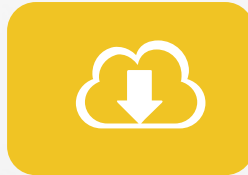
Verimsiz Zamanlama

Bakımlar genellikle belirli aralıklarla yapılır; bazen gereksiz yere erken veya geç yapılabilir.



Yüksek Maliyetler

Plansız arızalar onarım maliyetlerini artırır.



Güvenlik Riskleri

Ani arızalar, hem personel hem çevre güvenliği açısından risk yaratabilir..

Veri ve İzleme Eksikliği

Geleneksel yöntemler gerçek zamanlı veri kullanmaz.

Bu nedenle, ekipmanların durumu hakkında güncel bilgi edinmek zorlaşır.

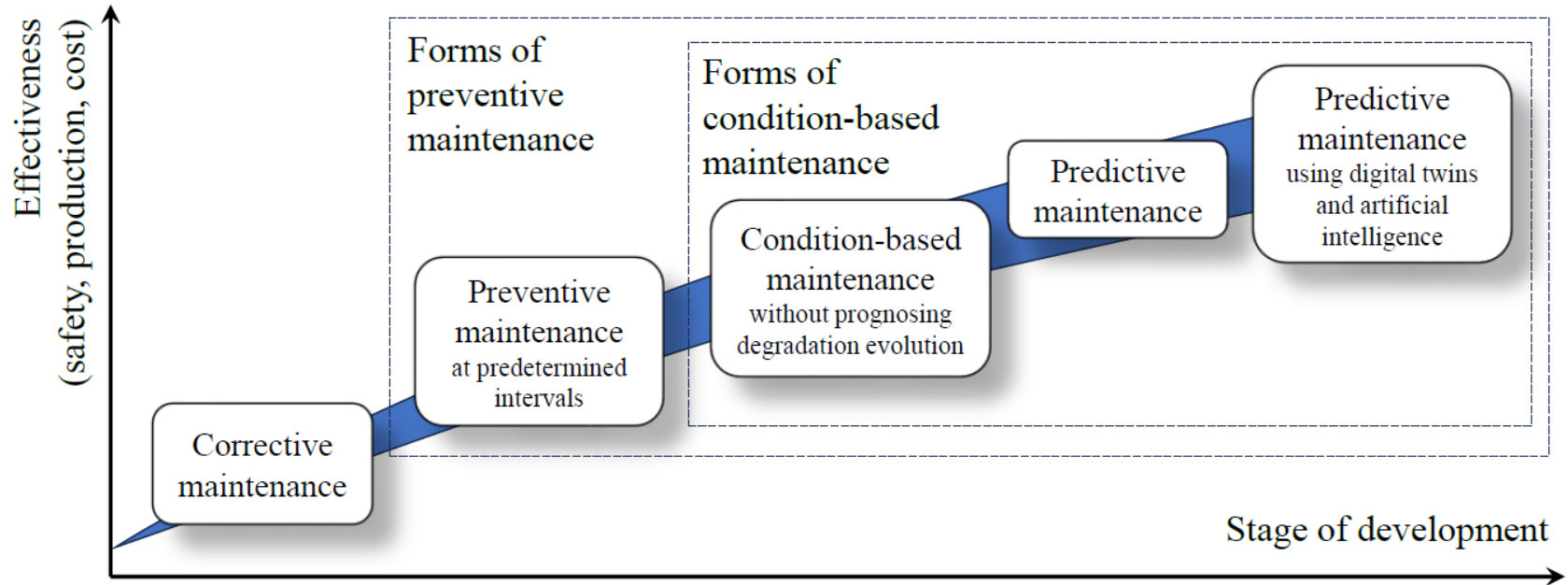
Kestirimci Bakım Nedir?

Kestirimci bakım, ekipmanların ve sistemlerin durumunu gerçek zamanlı veri toplama ve analiz yoluyla sürekli izleyerek, olası arızaların veya performans düşüşlerinin önceden tahmin edilmesi ve buna göre bakım faaliyetlerinin planlanmasıdır.



Gelişmiş kademeli bakım stratejisi

Yaklaşım, Bakım Zamanlaması, Verimlilik, Maliyet, Arıza Riskleri, Veri Kullanımı, Ekipman Ömrü, Uygulama Karmaşıklığı, Güvenlik ve Süreklilik





Geleneksel Bakım Türleriyle Karşılaştırma

Özellik / Bakım Türü	Geleneksel Bakım (Reaktif / Periyodik)	Öngörücü Bakım
Yaklaşım	Arızadan sonra müdahale (reaktif) veya belirli zaman aralıklarında planlı bakım (periyodik)	Gerçek zamanlı veri izleme ve analizle arıza öncesi müdahale
Bakım Zamanlaması	Sabit zaman aralıkları veya arıza sonrası	İhtiyaca göre, tam olarak gerektiğinde
Verimlilik	Genellikle düşük; gereksiz bakımlar yapılabilir veya arıza gözden kaçabilir	Yüksek; bakım kaynakları etkin kullanılır
Maliyet	Yüksek; plansız arızalar onarımları ve üretim kesintileri maliyetlidir	Daha düşük; arızalar önlenerek kesinti ve tamir maliyetleri azalır
Arıza Riskleri	Yüksek; ani ve beklenmedik arızalar olabilir	Düşük; arızalar <u>önceden</u> tespit edilerek engellenir
Veri Kullanımı	Az veya yok; bakım kararları çoğunlukla deneyime dayanır	Yoğun; <u>sensör</u> ve veri analitiği kullanılır
Ekipman Ömrü	Kısalabilir; gereksiz ya da gecikmiş müdahaleler nedeniyle	Uzatılabilir; zamanında müdahaleyle ekipman korunur
Uygulama Karmaşıklığı	Düşük; basit planlama ve uygulama	Yüksek; <u>sensör</u> altyapısı, veri analizi ve teknoloji gerektirir
Güvenlik ve Süreklilik	Daha riskli olabilir; beklenmeyen arızalar işletme güvenliğini etkileyebilir	Daha güvenli; üretim kesintileri ve riskler minimize edilir

Neden kestirimci bakım? Verimlilik, maliyet, güvenlik avantajları

Kestirimci bakım, özellikle kritik altyapılar (örneğin nükleer enerji santralleri, enerji santralleri, enerji iletim/dağıtım hatları gibi) için giderek daha önemli hale gelen, veri odaklı ve ileri teknolojilere dayalı bir bakım yaklaşımıdır.

Neden Kestirimci Bakım?

Çünkü kestirimci bakım;

- ✓ Daha verimli,
- ✓ Daha ekonomik,
- ✓ Daha güvenli

bir işletme modeli sunar.

Özellikle nükleer enerji gibi hataya yer olmayan sektörlerde, hem teknik hem stratejik bir zorunluluktur.



Verimlilik Avantajları



Maliyet Avantajları



Güvenlik Avantajları



Çevre Koruma

Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Kestirimci Bakım İlişkisi

IoT'nin sanayiye entegrasyonu ve bakım alanındaki etkisi



Verimliliğin Artması

Ekipmanların daha uzun süre maksimum performansla çalışması sağlar.

İşletme ve bakım süreçleri daha etkin hale gelir.

Güvenlik ve Çevresel Risklerin Azalması

Kritik bileşenlerdeki riskler önceden fark edilerek kaza veya çevreye zarar verme olasılığı azaltılır.

IoT teknolojisinin sanayiye entegrasyonu, özellikle bakım süreçlerinde devrim niteliğinde bir dönüşüm sağlamaktadır. Fabrikalar, enerji santralleri ve üretim tesisleri için daha verimli, ekonomik ve güvenli bir bakım altyapısı oluşturulmasına imkan tanır.

Etki Alanı	Geleneksel Yaklaşım	<u>IoT Destekli Yaklaşım</u>
İzleme	Manuel ve periyodik	Gerçek zamanlı ve sürekli
Müdahale	Arıza sonrası	Arıza öncesi, proaktif
Karar Süreci	Deneyime dayalı	Veriye dayalı ve otomatik
Güvenlik	Riskli	Kontrollü ve izlenebilir
Maliyet	Yüksek arıza ve duruş maliyetleri	Düşük, <u>optimize</u> edilmiş bakım giderleri

IoT'nin Bakım Üzerindeki Rolü

IoT'nin Nükleer Santrallerde Kullanımı İçin Fırsatlar

KPI	Actual	Target	Status	Direction
Mechanical maintenance On time delivery %	89,6 %	> 88 %		

Kaynak: IAEA

Kestirimci Bakım

Gerçek Zamanlı İzleme ve
Durum Takibi

Saha Personel Güvenliği ve
Çevresel İzleme

Karar Destek Sistemleri ve
Yapay Zeka Entegrasyonu

Uzaktan İzleme ve Dijital İkiz
Teknolojisi,

Siber Güvenlik ile Entegrasyon

Fırsat Alanı	<u>IoT'nin</u> Sağladığı Katkı
Operasyonel Verimlilik	Arıza öncesi müdahale, enerji üretiminde kesintisizlik
Güvenlik	Personel ve çevre güvenliğinde anlık izleme ve uyarı sistemi
Maliyet Yönetimi	Gereksiz bakımın azaltılması, arıza kaynaklı duruşların önlenmesi
Karar Destek	Veri temelli analizler ve yapay zeka destekli sistemler
Eğitim ve Simülasyon	Dijital ikizlerle güvenli ortamda eğitim ve müdahale planlaması
Uzak Erişim ve Kontrol	Uzaktan yönetim, merkezi izleme ve kriz müdahalesi

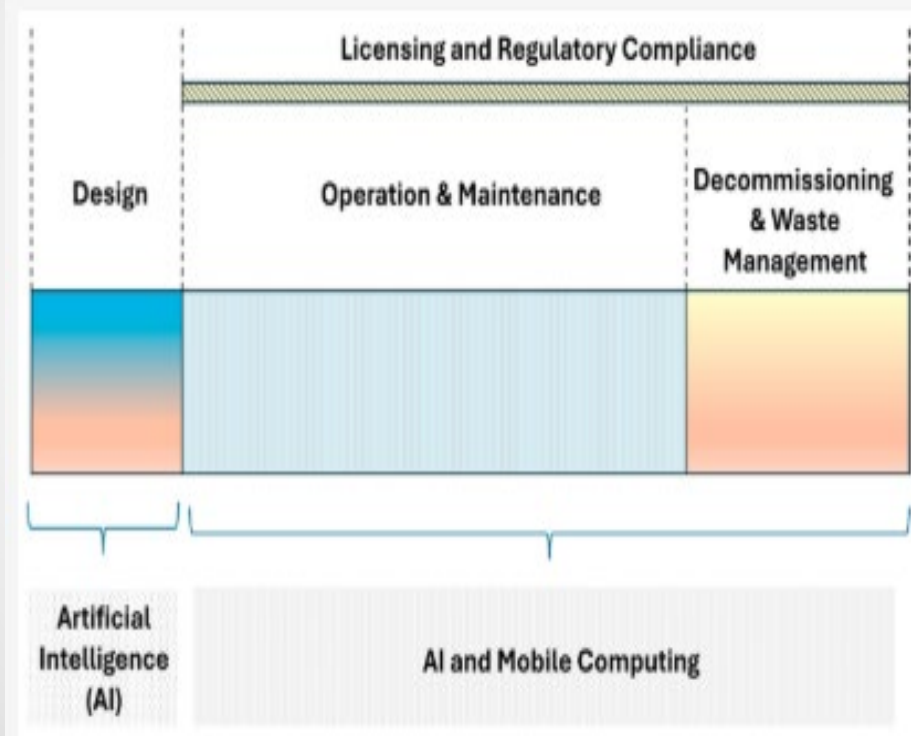
IoT'nin Nükleer Santrallerde Sunduğu Fırsatlar

Nükleer enerji santrallerinde IoT kullanımı, hem operasyonel mükemmellik hem de üst düzey güvenlik için büyük bir fırsat sunar.

Akıllı sensörler, veri analitiği ve otomasyon sistemleri sayesinde santraller daha akıllı, güvenli ve sürdürülebilir hale gelir.

IoT'nin Nükleer Enerji Santrallerinde Kullanımı

Sensörler – Temel Veri Kaynakları



Kaynak: IAEA



Neden

Ekipmanların fiziksel durumunun sürekli takibi

Sensör çeşitleri: Sıcaklık, basınç, titreşim, radyasyon, nem vb.



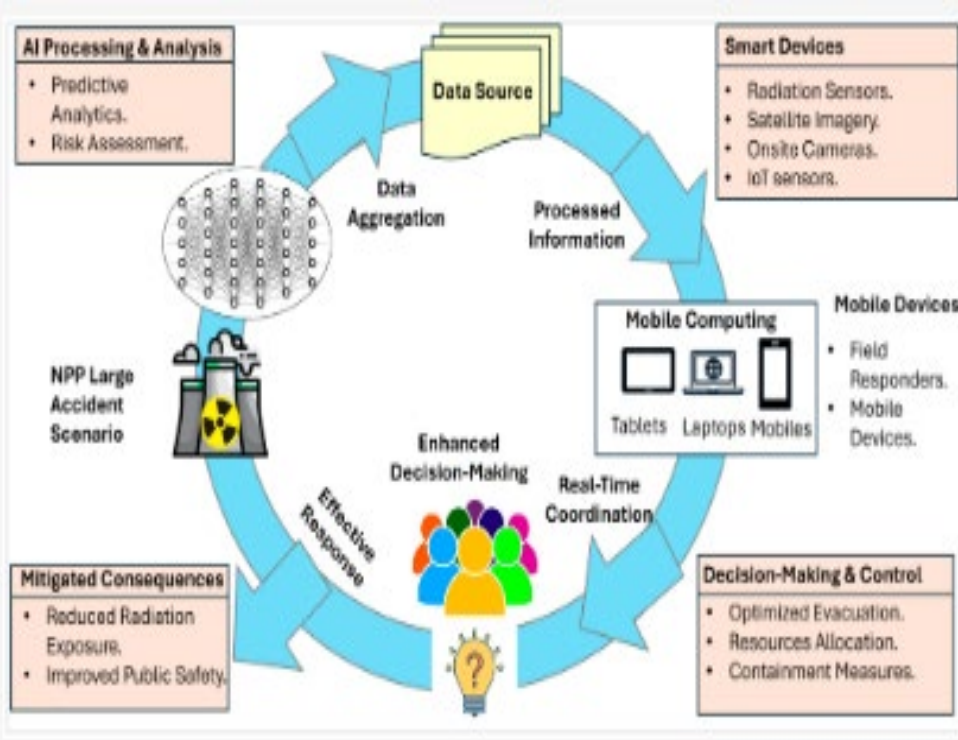
Sonuç

Gerçek zamanlı, doğru ve kapsamlı veri elde edilmesi

Örnek: Radyasyon sensörlerinin erken sızıntı tespiti

IoT'nin Nükleer Enerji Santrallerinde Kullanımı

Veri Toplama ve Yönetimi



Neden

Yüksek hacimli ve farklı tipteki verilerin güvenli, düzenli toplanması

Veri toplama mimarisi: Edge computing ve bulut entegrasyonu



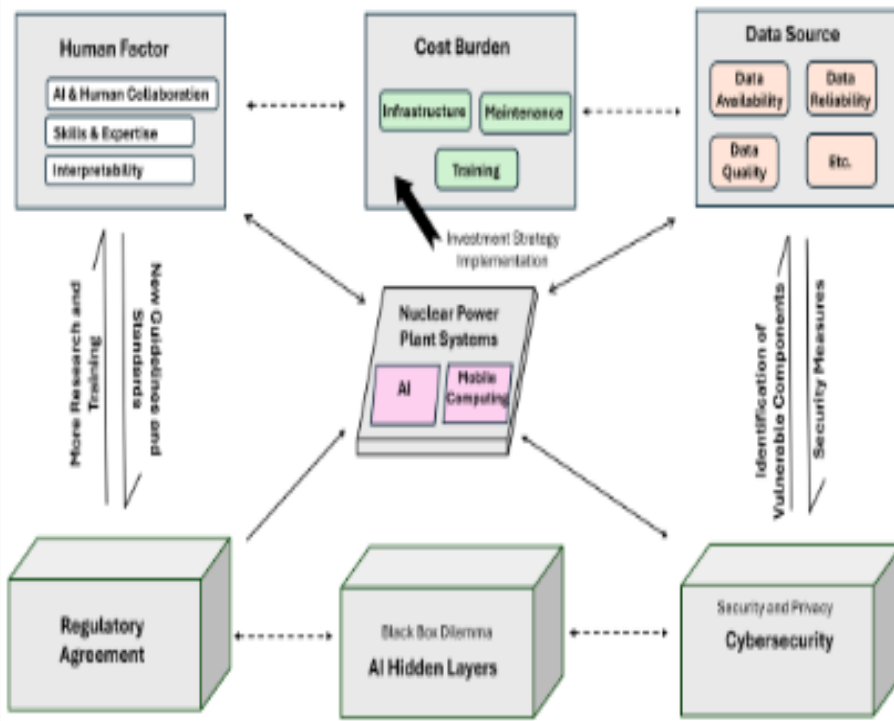
Sonuç

Kesintisiz veri akışı, hızlı ve doğru analiz yapılabilmesi

Veri ön işleme ve filtreleme yöntemleri

IoT'nin Nükleer Enerji Santrallerinde Kullanımı

Uzaktan İzleme ve Kontrol



Neden

Erişimi zor veya tehlikeli alanlarda insan güvenliği ve maliyet optimizasyonu,

Gerçek zamanlı izleme ile anormal durumların hızlı tespiti



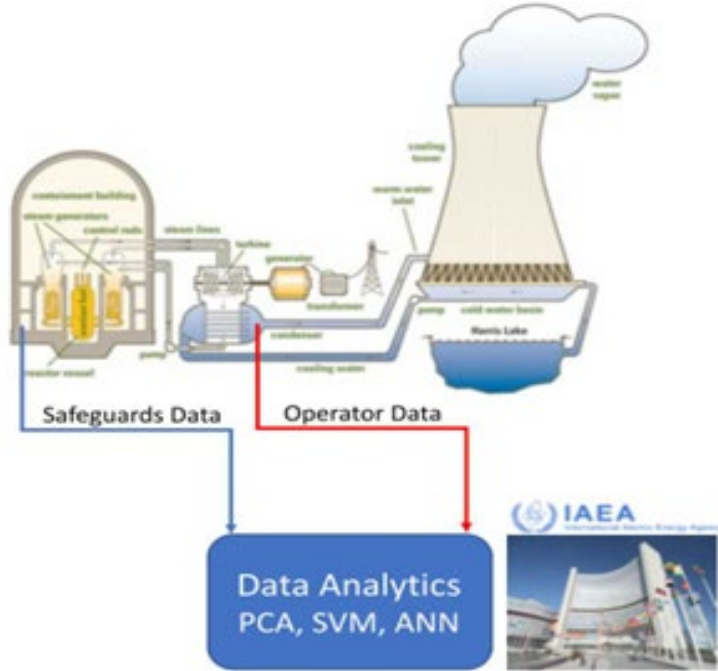
Sonuç

İşletme sürekliliği artışı, acil müdahalelerde hızlanma,

Operatörlerin mobil veya merkezi sistemlerden izleme yapabilmesi

IoT'nin Nükleer Enerji Santrallerinde Kullanımı

Olay ve Alarm Yönetimi



Neden

Çok sayıda uyarının manuel olarak takip edilmesi zorlukları,

IoT tabanlı otomatik olay sınıflandırması ve önceliklendirme



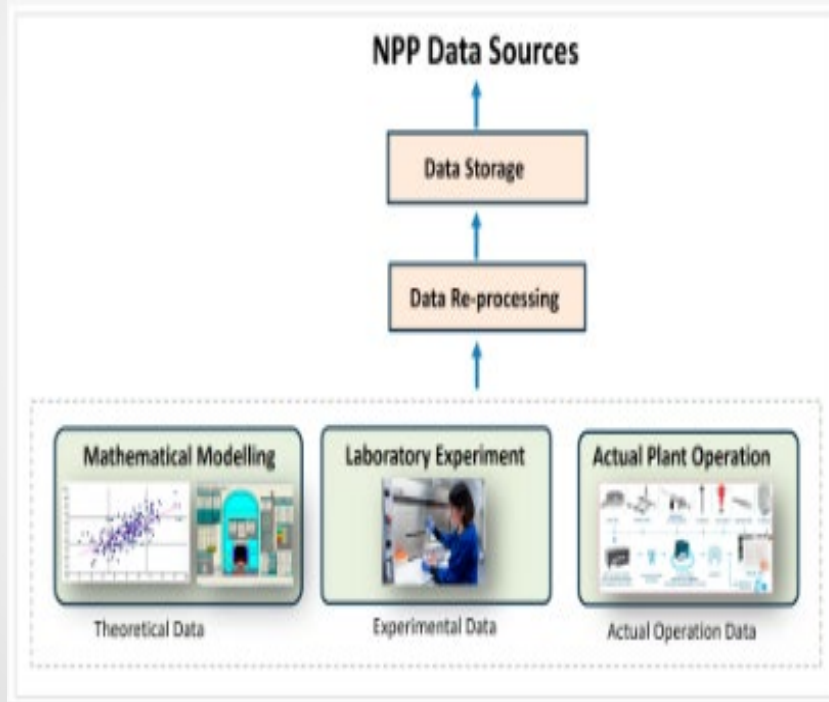
Sonuç

Bakım ekiplerinin kritik sorunlara odaklanması, arıza sürelerinin azalması,

Yapay zeka ve makine öğrenmesi destekli karar destek sistemleri

Neden – Sonuç İlişkisi ile IoT'nin Kestirimci Bakıma Katkısı

Sensörlerden Veri Toplamanın Nedeni ve Sonucu



Neden

Ekipmanların gerçek zamanlı ve sürekli izlenme gereği

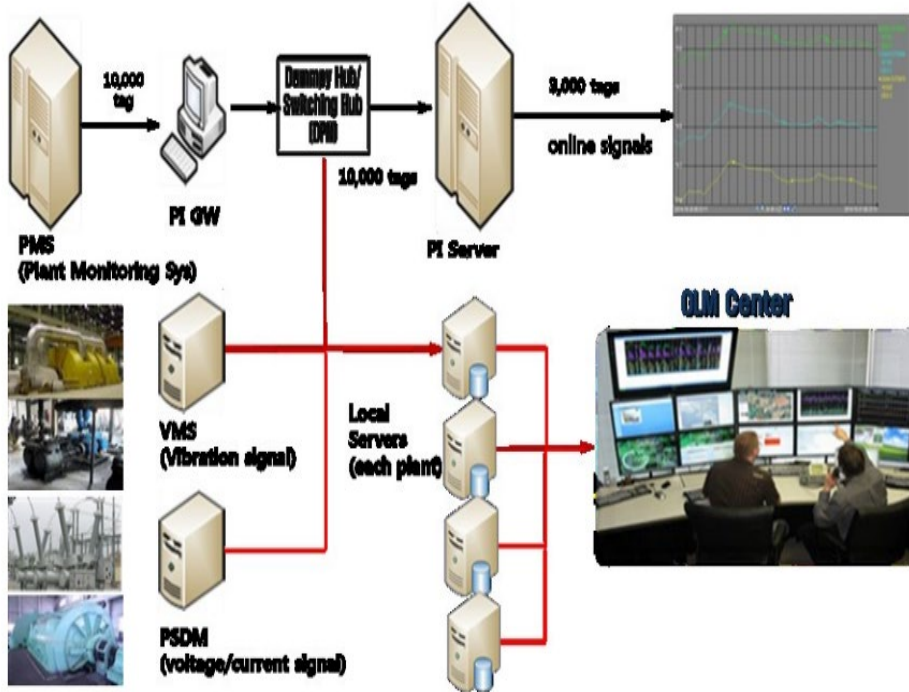


Sonuç

Anormalliklerin erken tespiti, planlı bakım imkanı

Neden – Sonuç İlişkisi ile IoT'nin Kestirimci Bakıma Katkısı

Otomatik Veri Toplama ve Analizin Nedenleri



Neden

Çok büyük veri hacminin manuel işlenememesi



Sonuç

Veri bazlı bakım kararlarının hızlanması ve doğruluğu

Neden – Sonuç İlişkisi ile IoT'nin Kestirimci Bakıma Katkısı

Uzaktan İzlemenin Nedenleri ve Etkileri



Neden

İnsan müdahalesinin risk ve maliyetlerinin azaltılması

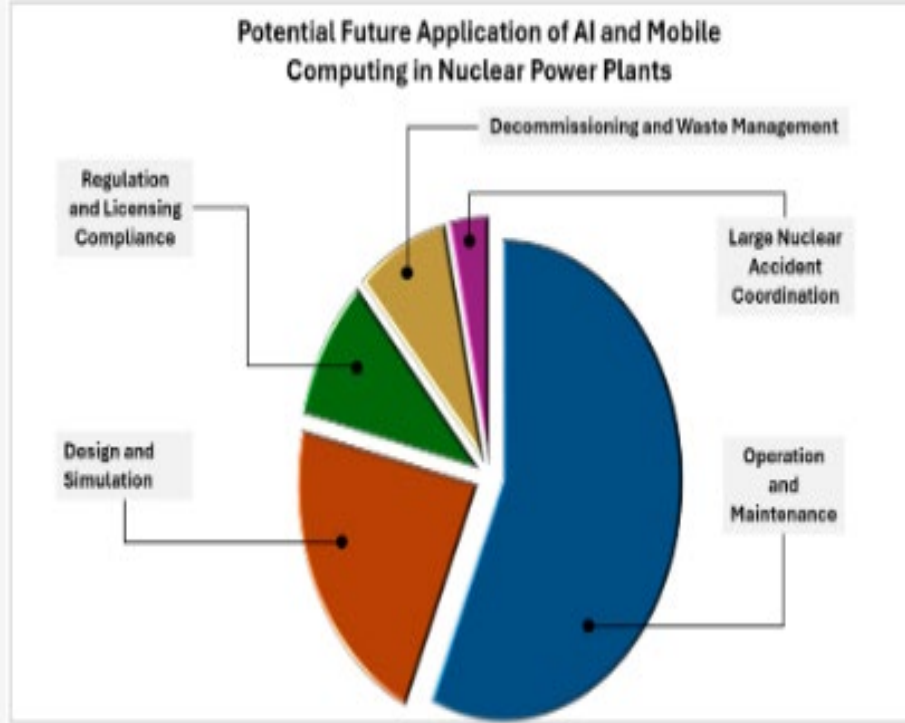


Sonuç

Güvenlik artışı ve bakım süreçlerinde verimlilik

Neden – Sonuç İlişkisi ile IoT'nin Kestirimci Bakıma Katkısı

Olay Yönetimi Otomasyonunun Gerekçeleri ve Sonuçları



Neden

Olay sayısının artması ve hızlı tepki gerekliliği



Sonuç

Bakım müdahale süresinin kısılması ve maliyet düşüşü

Kestirimci Bakımda IoT Uygulama Senaryoları

Titreşim Analizi ile Pompa Arızalarının Önlenmesi



Sensörler titreşimdeki değişiklikleri tespit eder.

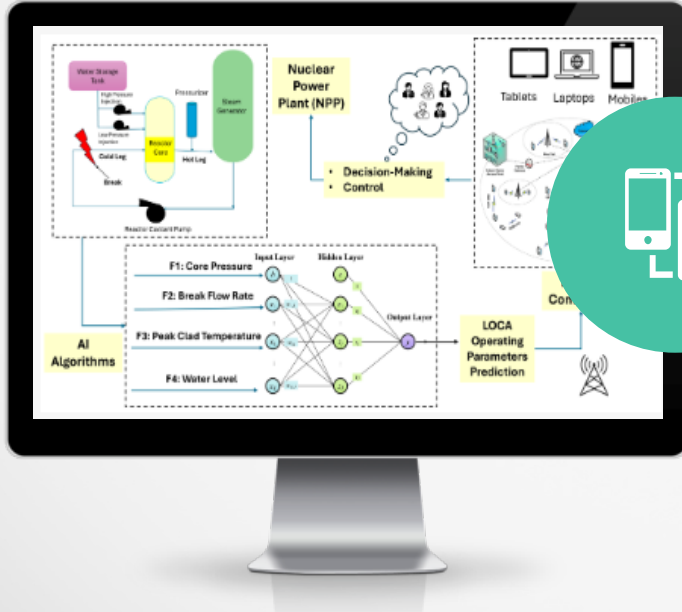
Veri analizi arızaya işaret eden paternlere odaklanır.

Sonuç

Planlı bakım ile büyük arızalar engellenir.

Kestirimci Bakımda IoT Uygulama Senaryoları

Radyasyon Seviyesi İzleme ve Anormallik Tespiti



IoT sensörleri sürekli radyasyon seviyelerini ölçer.

Uzaktan izleme ile acil durumlarda hızlı müdahale sağlanır.

Kestirimci Bakımda IoT Uygulama Senaryoları

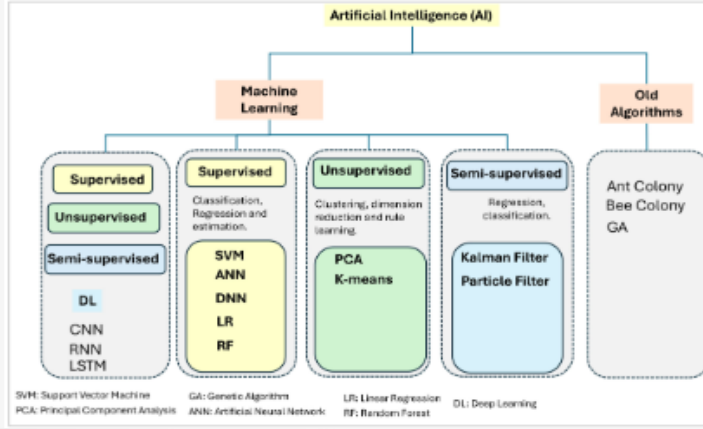
Türbin Performans Analizi ve Enerji Verimliliği



Sensör verileri ile türbin performansı izlenir.

Anormal değerler kestirimci bakım aktivitelerini tetikler.

IoT ve Yapay Zeka ile İleri Düzey Kestirimci Bakım



Kaynak: IAEA

**Otomatik bakım
planlama ve kaynak
yönetimi**

**Sonuç: Santral
verimliliğinde ve
güvenliğinde devrim**



**Büyük veri ve yapay zekanın
IoT verileri üzerindeki rolü**



**Makine öğrenmesi
algoritmaları ile arıza
tahmini**



Zorluklar ve Çözüm Önerileri

Veri Güvenliği ve
Siber Tehditler

6. Uluslararası Standartlara Uyum

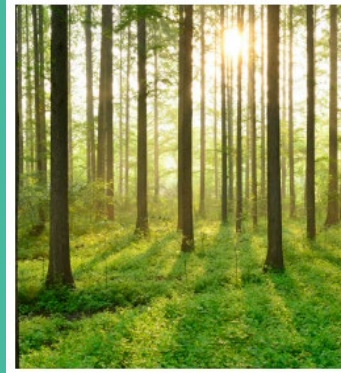


5. Acil Durum Planlaması

4. Fiziksel Güvenlik

1. İnsan ve Çevre Güvenliği

2. Kritik Sistemlerin Sürekliliği



3. Siber Güvenlik





Kritik altyapılarda güvenlik önlemlerinin önemi

Nükleer enerji santrallerinde kritik altyapılarda güvenlik önlemleri, hem insan sağlığı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından hayati öneme sahiptir.

Bu önlemler, olası kazaların, sabotajların ve doğal afetlerin etkilerini en aza indirmek için uygulanır.

Sonuç

Nükleer enerji santralleri yüksek emreemadelik ve enerji verimliliği sunsa da, ciddi güvenlik riskleri barındırır.

Bu nedenle kritik altyapılarda çok katmanlı güvenlik önlemleri alınmalı; fiziksel, dijital ve operasyonel düzeyde tüm olasılıklar planlanmalıdır.

Güvenlik, nükleer enerjinin toplumda kabul görmesinin ve sürdürülebilirliğinin temelidir.

IoT Cihazlarının Güvenlik Açıkları ve Çözüm Yaklaşımları

IoT Cihazlarının Güvenlik Açıkları ve Güvenlik İçin Çözüm Yaklaşımları

Güvenlik İçin Çözüm Yaklaşımları



IoT Cihazlarının Güvenlik Açıkları

1. Zayıf Kimlik Doğrulama ve Şifreleme



2. Güncellenmeyen Yazılımlar



3. Ağ İzolasyonu Eksikliği



4. Cihazların Fiziksel Erişim Riski

5. Geri Plan Servislerinin (Backdoor) Açıklığı



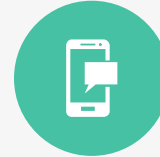
1. Güçlü Kimlik Doğrulama ve Şifreleme



2. Düzenli Yazılım Güncellemeleri ve Yama Yönetimi

3. Ağ Bölümlendirme (Segmentation)

4. Saldırı Tespiti ve Anomali İzleme



5. Cihaz Kimlik Doğrulama ve Sertifikalandırma

6. Fiziksel Güvenlik Önlemleri



7. Siber Güvenlik Farkındalığı ve Eğitim

8. Uluslararası Standart ve Kılavuzlar



IoT cihazlarının güvenlik açıkları ve çözüm yaklaşımları

Nükleer enerji santrallerinde Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazlarının kullanımı, verimlilik ve otomasyon açısından önemli avantajlar sağlarken; aynı zamanda siber güvenlik açıkları ile ciddi riskler doğurabilir.

Bu nedenle, IoT cihazlarının güvenliği, nükleer santrallerde kritik altyapının korunması açısından son derece önemlidir.



Sonuç

Nükleer enerji santrallerinde kullanılan IoT cihazlarının güvenliği, santralin genel güvenliğinin bir parçası olarak ele alınmalıdır.

Proaktif güvenlik önlemleri, yazılım güncellemeleri, ağ mimarisi ve kullanıcı eğitimi gibi çok katmanlı bir yaklaşım benimsenmelidir.

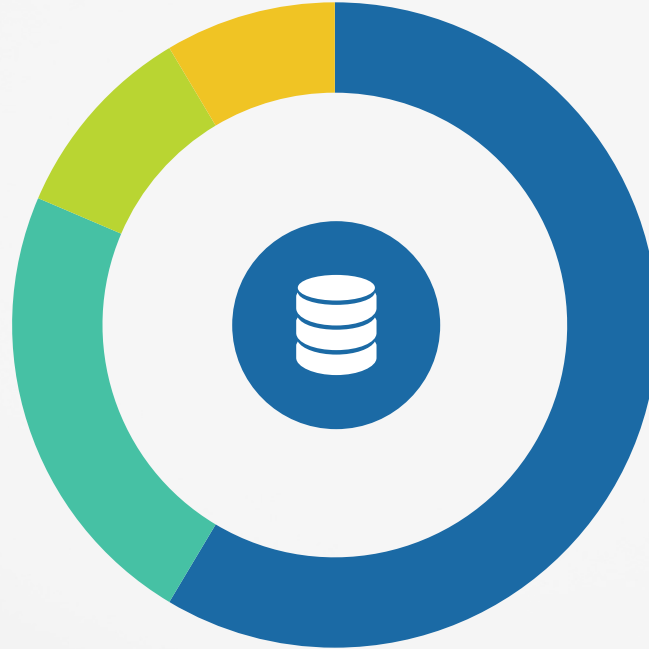
"Güvenlik, cihazın üretildiği andan hizmetten çıkarıldığı ana kadar sürekli bir süreçtir."

Veri Entegrasyonu ve Standartlaştırma

Farklı sensörlerden gelen verilerin uyumlu hale getirilmesi

Nükleer enerji santrallerinde farklı sensörlerden gelen verilerin uyumlu hale getirilmesi (veri entegrasyonu), hem sistem güvenliği, hem de operasyonel verimlilik açısından kritik öneme sahiptir.

Bu süreç, çok çeşitli sensör türlerinden gelen verilerin anlamlı, karşılaştırılabilir ve işlenebilir hale getirilmesini içerir.



Zorluklar: Farklı Sensör Verilerinin Uyum Sorunları

1

1. Veri Formatları Farklılığı

2

**2. Zaman Eşitleme
(Senkranizasyon) Sorunları**

3, 4

3. Birim Uyumsuzluğu

4. Veri Kalitesi ve Gürültü

5

**5. Anlam Uyuşmazlığı
(Semantik Tutarsızlık)**

Uyumlaştırma (Veri Entegrasyonu) Yaklaşımları



**1. Sensör Veri
Standartlaştırması**



**2. Veri Birimi ve
Format Dönüşümü**



**3. Zaman
Senkronizasyonu**



**4. Veri Temizleme ve
Filtreleme**



**5. Veri Füzyonu ve
Bütünleştirme**



**6. Veri
Anlamlandırma ve
Ontolojiler**

Nükleer santrallerde farklı sensörlerden gelen verilerin uyumlu hale getirilmesi, sadece teknik bir ihtiyaç değil, aynı zamanda güvenlik, karar destek ve otomasyon sistemlerinin temelidir.

Bu uyum, yalnızca yazılım mühendisliğiyle değil; sistem mühendisliği, zaman yönetimi, veri bilimi ve endüstriyel standartlara uygunlukla sağlanır.

Uygulamada Kullanılan Teknolojiler

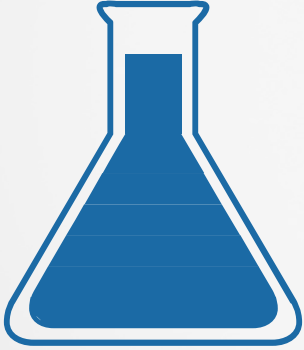
Teknoloji	Açıklama
OPC UA (Unified Architecture)	Endüstriyel veri iletişimi için platform bağımsız, güvenli standart
MQTT / AMQP	<u>IoT</u> cihazları için hafif mesajlaşma protokolleri
Data Lake / Historian	Farklı verilerin merkezi olarak toplanıp analiz edildiği büyük veri altyapıları
ETL Süreçleri	<u>Extract</u> , <u>Transform</u> , <u>Load</u> – verilerin toplanıp işlenip sistemlere aktarılması



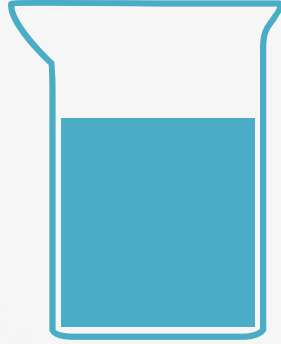
Teknolojik ve İnsan Kaynağı Yatırımları

Nükleer enerji santrallerinde uzman personel ihtiyacı ve eğitim programları, tesisin güvenli, verimli ve sürdürülebilir şekilde işletilmesi için vazgeçilmez unsurlardır.

Nükleer tesisler, karmaşık teknolojilere ve ciddi güvenlik protokollerine sahip olduğu için, bu tesislerde görev alacak personelin yüksek düzeyde teknik bilgi, operasyonel beceri ve düzenleyici farkındalığa sahip olması gerekir.



1. Yüksek Güvenlik Riski



2. Karmaşık Sistemler ve Teknolojiler



3. Uluslararası Standart ve Düzenlemeler



4. Eğitim Programlarının Özellikleri

Neden Uzman Personel Gerekir?

Teknolojik Altyapı Yatırımlarının Maliyeti ve Geri Dönüşü

Nükleer santrallerde teknolojik altyapı yatırımlarının maliyeti ve geri dönüşü (ROI - Return on Investment), hem ekon hem de stratejik açıdan dikkatle değerlendirilmesi gereken bir konudur.

Bu yatırımlar ilk etapta yüksek maliyetli olsa da, uzun vadede enerji güvenliği, düşük işletme maliyeti ve karbon nötr enerji üretimi açısından güçlü geri dönüşler sağlar.



FIG. V-8. Main Transformer Phase C Control Panel.



FIG. V-9. NSPB of Non-IE 13.8KV CB.

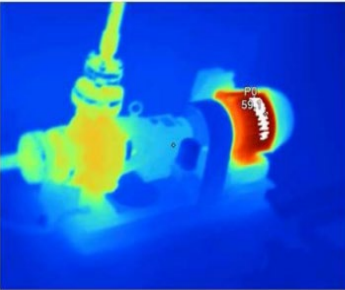


FIG. V-10. Condenser Hotwell Sampling Pump.



FIG. V-11. Main Transformer A GIB Ground Wire.

Kurulum ve İnşaat Maliyeti (CapEx – Sermaye Gideri)

Kalem	Yaklaşık Payı (%)
Reaktör Tasarımı ve İnşaatı	30–40%
Güvenlik Sistemleri	10–15%
<u>Otomasyon ve Enstrümantasyon</u>	10%
Soğutma, Türbin ve Yakıt Sistemleri	15–20%
Lisanslama, çevre etki değerlendirmesi, denetim	5–10%

Geleceğe Bakış ve Sonuçlar

1. Güvenlik Kazanımları



2. Maliyet Kazanımları



3. Performans Kazanımları



Bu nedenle kestirimci bakım,
nükleer santrallerde:

- ✓ Güvenliği artırır,
- ✓ Maliyetleri düşürür,
- ✓ Performansı optimize eder



Geleceğe Bakış ve Sonuçlar

IoT destekli kestirimci bakım, nükleer santrallerde güvenliğin artırılması, maliyetlerin azaltılması ve ekipman verimliliğinin maksimize edilmesi açısından geleceğin olmazsa olmaz teknolojilerinden biridir.



Bu teknoloji, nükleer enerji sektörünün dijital dönüşümünde kritik bir rol oynayacak ve santrallerin sürdürülebilir işletimini sağlayacaktır.



*Dinlediğiniz İçin
Teşekkür Ederiz.*