

# Kestirimci Bakımın Sistem Mimarileri, Amaçları ve Yaklaşımları Üzerine Kapsamlı İnceleme

## Giriş

Endüstriyel sektörde bakım, maliyetler ve güvenilirlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Makinelerin veya sistemlerin beklenmeyen arızaları, şirketlerin temel iş süreçlerini kesintiye uğratarak ciddi mali kayıplara ve itibar zararına yol açabilir. Örneğin, Amazon'un 2013 yılında yaşadığı 49 dakikalık kesinti, şirkete 4 milyon dolarlık satış kaybına mal olmuştur. Bu tür örnekler, etkili bir bakım stratejisinin önemini vurgulamaktadır.

Geleneksel bakım yaklaşımları, genellikle yüksek maliyetli ve verimsiz olabilen bazı sınırlamalara sahiptir. Reaktif Bakım (RM), ekipman arızalandıktan sonra müdahale etmeyi içerirken, Önleyici Bakım (PM) ise planlı zamanlarda bakım yaparak gereksiz müdahalelere neden olabilir. Bu noktada, Tahmine Dayalı Bakım (PdM), makine ve sistemlerin gerçek zamanlı verilerine dayanarak arızaları öngörmeyi ve bakım faaliyetlerini optimize etmeyi amaçlayan modern bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır.

## Bakım Yaklaşımlarının Kategorileri

### Reaktif Bakım (RM)

Reaktif Bakım, ekipmanın arızalanmasını bekleyerek müdahale etmeyi içerir. Bu yaklaşım, ekipmanın maksimum kullanımını sağlasa da, beklenmedik arızalar nedeniyle yüksek onarım maliyetlerine ve üretim kayıplarına yol açabilir. Ayrıca, arızaların zincirleme etkileri diğer ekipmanlara zarar verebilir.

### Önleyici Bakım (PM)

Önleyici Bakım, ekipmanın belirli zaman aralıklarında planlı olarak bakımını içerir. Bu yaklaşım, arızaları önlemeyi amaçlasa da, gereksiz bakım maliyetlerine ve planlı duruş sürelerine neden olabilir. Ayrıca, ekipmanın gerçek durumu yerine teorik arıza oranlarına dayanması, bazı arızaların gözden kaçmasına veya gereksiz müdahalelere yol açabilir.

### Tahmine Dayalı Bakım (PdM)

Tahmine Dayalı Bakım, ekipmanın gerçek zamanlı verilerine dayanarak arızaları öngörmeyi ve bakım faaliyetlerini optimize etmeyi hedefler. Sensörler ve IoT teknolojileri sayesinde ekipmanın durumu sürekli izlenir ve derin öğrenme algoritmaları ile arıza tahminleri yapılır. Bu sayede, bakım faaliyetleri sadece gerektiğinde ve en uygun zamanda gerçekleştirilir.

# PdM'nin Avantajları ve Zorlukları

## Avantajları

- **Maliyet Tasarrufu:** Gereksiz bakım faaliyetlerinin azaltılması ve arızaların önlenmesi sayesinde maliyetler düşer.
- **Artan Güvenilirlik:** Ekipmanın sürekli izlenmesi ve arızaların önceden tespit edilmesi, sistem güvenilirliğini artırır.
- **Verimlilik:** Bakım faaliyetlerinin optimize edilmesi, üretim süreçlerinin kesintisiz devam etmesini sağlar.

## Zorlukları

- **Yüksek Başlangıç Maliyeti:** Sensörler, veri toplama ve analiz sistemleri gibi başlangıç yatırımları gerektirir.
- **Veri Yönetimi:** Büyük veri setlerinin işlenmesi ve analiz edilmesi için gelişmiş algoritmalar ve donanımlar gereklidir.
- **Uzmanlık Gereksinimi:** PdM sistemlerinin tasarımı ve uygulanması için uzmanlık ve eğitim gereklidir.

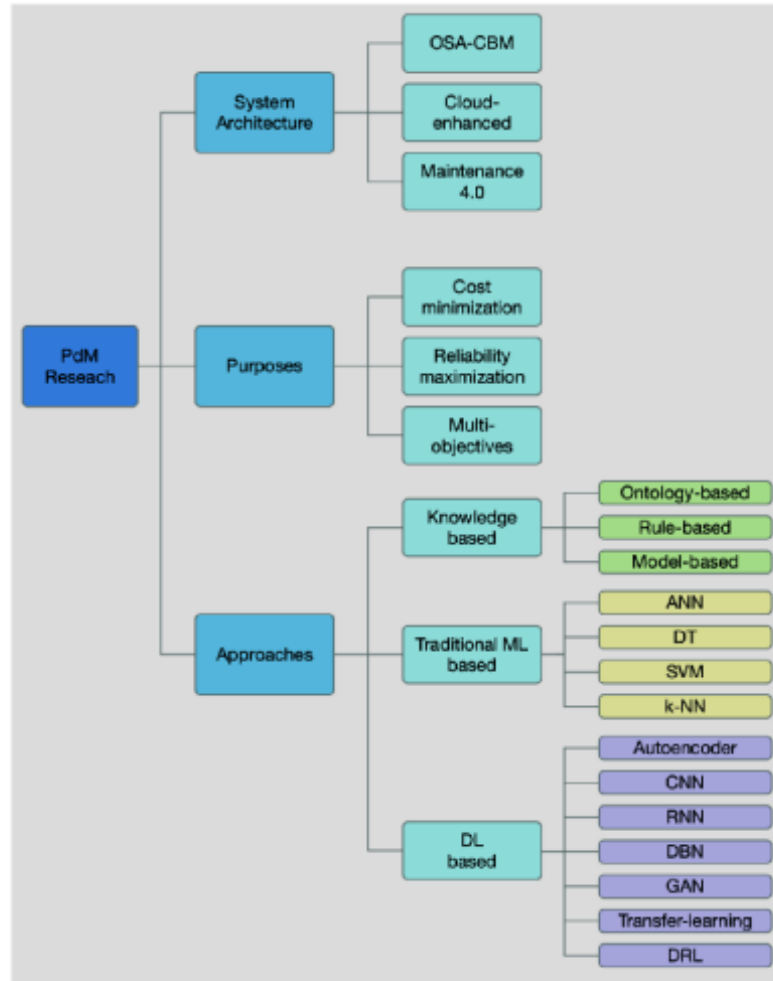


Figure 1: Taxonomy of the surveyed research works.

# PdM Sistem Mimarileri

## Koşula Dayalı İzleme için Açık Sistem Mimarisi (OSA-CBM)

OSA-CBM, farklı üreticilerin cihazları arasında veri alışverişini kolaylaştıran bir standarttır. Bu mimari, veri toplama, analiz ve karar verme süreçlerini standartlaştırarak PdM uygulamalarını destekler.

## Bulut Destekli PdM Sistemleri

Bulut bilişim teknolojileri, büyük veri setlerinin depolanması ve işlenmesi için ölçeklenebilir çözümler sunar. Bulut tabanlı PdM sistemleri, gerçek zamanlı veri analizi ve uzaktan erişim imkanı sağlar.

## PdM 4.0

Endüstri 4.0 ile birlikte, PdM sistemleri yapay zeka, makine öğrenimi ve IoT teknolojileri ile entegre hale gelmiştir. Bu yeni nesil PdM yaklaşımları, daha akıllı ve otonom bakım sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanır.

## PdM'nin Amaçları

### Maliyet Minimizasyonu

PdM, bakım ve onarım maliyetlerini optimize etmeyi hedefler. Gereksiz bakım faaliyetlerinin azaltılması ve arızaların önlenmesi sayesinde toplam maliyetler düşer.

### Güvenilirlik ve Kullanılabilirlik Maksimizasyonu

Ekipmanın sürekli izlenmesi ve arızaların önceden tespit edilmesi, sistemlerin güvenilirliğini ve kullanılabilirliğini artırır.

### Çok Amaçlı Optimizasyon

PdM, maliyet, güvenilirlik ve performans gibi birden fazla hedefi aynı anda optimize etmeyi amaçlar. Bu sayede, şirketlerin genel iş hedeflerine daha iyi uyum sağlar.

## Arıza Teşhisi ve Tahmini Yaklaşımları

### Bilgi Tabanlı Yaklaşımlar

Uzman sistemler ve kural tabanlı modeller, ekipmanın çalışma prensiplerine dayanarak arıza teşhisi yapar. Bu yaklaşımlar, belirli durumlar için etkili olsa da, karmaşık ve dinamik sistemlerde sınırlı kalabilir.

## Geleneksel Makine Öğrenimi Yaklaşımları

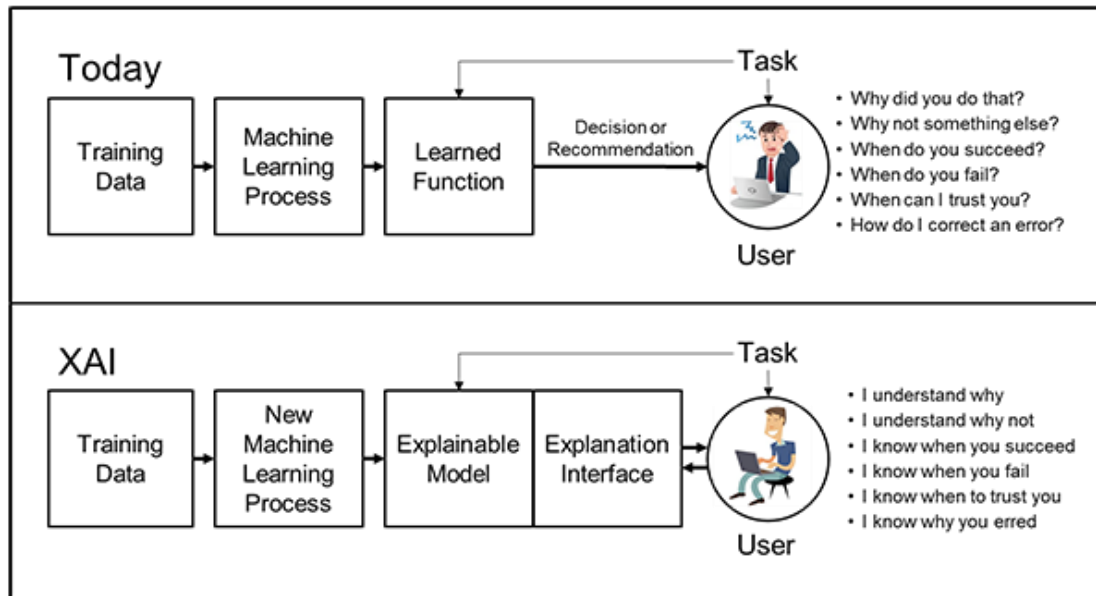
- **Destek Vektör Makineleri (SVM):** Verileri sınıflandırmak ve regresyon analizleri yapmak için kullanılır.
- **Karar Ağaçları ve Rastgele Ormanlar:** Verilerin hiyerarşik olarak sınıflandırılmasını sağlar.
- **k-En Yakın Komşu (k-NN):** Benzer veri noktalarına dayanarak sınıflandırma yapar.

## Derin Öğrenme Yaklaşımları

- **Evrişimli Sinir Ağları (CNN):** Görüntü ve zaman serisi verilerinin analizinde kullanılır.
- **Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) ve LSTM:** Zaman bağımlı verilerin işlenmesinde etkilidir.
- **Oto-enkoderler ve Derin İnanç Ağları (DBN):** Veri boyutunu azaltma ve özellik çıkarma için kullanılır.
- **Üretici Karşıt Ağlar (GAN):** Veri artırma ve sentezleme işlemlerinde kullanılır.
- **Derin Pekiştirmeli Öğrenme (DRL):** Karar verme ve kontrol süreçlerinde etkilidir.

## Gelecek Trendler ve Araştırma Yönleri

- **Transfer Öğrenimi:** Farklı alanlarda eğitilmiş modellerin yeni uygulamalara uyarlanması.
- **Bulut ve Kenar Bilişim Entegrasyonu:** Veri işleme ve depolamanın optimize edilmesi.
- **Yapay Zeka ve İnsan İşbirliği:** Bakım süreçlerinde insan ve yapay zeka arasındaki etkileşimin geliştirilmesi.
- **Güvenlik ve Veri Gizliliği:** PdM sistemlerinde veri güvenliğinin sağlanması ve siber saldırılara karşı koruma.



# Predictive Maintenance ve XAI

PdM'nin temel prensibi, makine öğrenimi ve yapay zeka modelleri ile büyük miktarda veriyi analiz ederek makinelerin ömrünü uzatmak ve arızaları tahmin etmektir. Ancak PdM sistemlerine kullanıcılar tarafından güvenilmesi gerekir. Bu, Explainable AI (XAI) ile desteklenebilir. XAI, modellerin nasıl çalıştığını ve sonuçlara nasıl ulaşıldığını açıklamayı sağlar. Bu sayede bakım uzmanları, modellerin neden belirli bir arızayı tahmin ettiğini ve hangi faktörlerin bu sonuca yol açtığını daha iyi anlayabilir. Bu, aynı zamanda kararların güvenilirliğini ve doğruluğunu ve kullanıcıların sistemlere güvenini artırır.

## Yeni Nesil Teknolojilerin PdM'ye Etkisi

Tahmine Dayalı Bakım (PdM), IoT, yapay zeka, büyük veri ve bulut bilişim gibi gelişen teknolojilerle daha etkin hale geliyor. Özellikle, yapay zeka destekli analizlerle donatılan PdM sistemleri, makinelerden gelen sürekli veri akışını değerlendirerek anlık ve doğru tahminler yapabiliyor. Bu gelişmeler, bakım süreçlerinde proaktif yaklaşımlar geliştirilmesini sağlıyor ve yalnızca arıza tahmini değil, aynı zamanda operasyonel süreçlerin optimizasyonu için de olanak sunuyor.

## Kullanıcı Eğitim ve Adaptasyonu: XAI'nin Rolü

XAI'nin sunduğu en önemli avantajlardan biri, sadece sistemin mühendisleri değil, aynı zamanda saha operatörleri ve karar vericilerin de PdM süreçlerine kolayca entegre olmasını sağlamasıdır. Kullanıcılar, XAI'nin sağladığı açıklamalar sayesinde sistemin verdiği kararlara daha fazla güven duyarlar. Bu güven, bakım stratejilerinde doğru kararlar alınmasına ve maliyetlerin düşürülmesine katkıda bulunur. Ayrıca, kullanıcıların makinelerin neden arızalanacağını ve hangi parçaların risk altında olduğunu anlayabilmesi, operasyonel süreçlerde kritik önem taşır.

## Sürdürülebilirlik ve Enerji Verimliliği ile Entegrasyon

Modern endüstriyel süreçlerde sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği öncelikli konular haline gelmiştir. PdM sistemleri, sadece makine arızalarını önlemekle kalmaz, aynı zamanda enerji verimliliğini optimize etmek için de kullanılabilir. Makinelerin verimli çalışma sürelerini izleyen ve enerji tüketimini analiz eden PdM sistemleri, gereksiz enerji israfını engelleyebilir. Bu noktada, XAI ile zenginleştirilmiş PdM sistemleri, enerji kullanımını daha şeffaf ve anlaşılabilir hale getirerek, sürdürülebilir bir üretim modelinin de önünü açar.

## PdM ve 5G Teknolojisinin Gücü

5G teknolojisinin endüstride yaygınlaşmasıyla birlikte, PdM sistemlerinde devrim niteliğinde gelişmeler beklenmektedir. 5G'nin sunduğu yüksek hız, düşük gecikme ve geniş bant genişliği, daha fazla cihazın birbirine bağlanmasını ve daha yüksek veri akışının yönetilmesini sağlar. Bu, PdM'nin IoT ve sensörlerle olan entegrasyonunu daha da geliştirir ve bakım süreçlerinin daha hızlı ve güvenilir bir şekilde yönetilmesine olanak tanır. 5G ile çalışan PdM sistemlerinde, gerçek zamanlı analizlerin ve kararların hızlı bir şekilde alınması mümkün olacaktır.

Bir xAI modelinin nasıl yanıt verdiğini göstermek için basit bir örnek üzerinden ilerleyelim. Diyelim ki bir yapay zeka modeline şu soruyu sorduk:

**Soru:** "Bu kredi başvurusunu neden reddettin?"

Bir xAI modeli, bu soruya şu şekilde yanıt verebilir:

1. **Modelin Yanıtı (xAI açıklaması olmadan):** "Başvuru reddedildi çünkü modelin hesapladığı kredi riski yüksek çıktı."

Bu cevap yetersiz ve şeffaf değil. Ancak bir **xAI modeli** bu yanıtı daha anlaşılır ve detaylı bir şekilde açıklayabilir:

2. **xAI Modeli ile Yanıt:** "Kredi başvurusunu reddettim çünkü kredi skorunun düşük (550), aylık gelirinin başvuru kredi miktarına oranla düşük (gelir: 3,000 TL, kredi: 200,000 TL) ve iş geçmişinin kısa (6 ay) olması kredi riskini artırdı. Ayrıca, son 6 ayda 2 ödenmemiş fatura kaydı mevcut. Bu nedenlerle toplam risk puanın, reddedilen kredi başvuruları sınırını (0.7) aşarak 0.85 oldu."

#### **Açıklama:**

- xAI modeli, sadece sonucu vermekle kalmıyor, aynı zamanda modelin hangi özellikleri (kredi skoru, gelir, iş geçmişi) dikkate aldığını ve bunların nasıl bir etki yaptığını açıklıyor.
- Bu açıklama, kredi başvurusunun neden reddedildiğini anlayabilmemizi sağlıyor ve hangi faktörlerin sonucu etkilediğini netleştiriyor.

Bu sayede, kullanıcı hem modelin nasıl çalıştığını daha iyi anlar hem de kararın doğruluğunu değerlendirebilir.

#### **Soru: ChatGPT bir xAI mıdır?**

ChatGPT'nin cevabına da neden diye sorduğumuzda bize açıklama yapıyor. ChatGPT bir xAI mı ? Bu soruya ChatGPT'nin yanıtına bir bakalım :

Benim size açıklama yapmam, sorularınıza daha anlaşılır cevaplar sunmam xAI'den tamamen farklı bir konsept. İşlevim, sizinle anlamlı bir dil etkileşimi kurmak, yani size sorularınıza uygun yanıtlar vermek. Ancak, bu cevapları kendi içimdeki süreçleri açıklayarak veya verdiğim sonuçların matematiksel/mantıksal nedenlerini derinlemesine irdeleyerek değil, dil modelleri üzerinden sağlıyorum.

Bir **xAI modeli** ise, karar alma süreçlerini ve sonuçların hangi verilere dayandığını teknik açıdan açıklayan, daha şeffaf ve açıklanabilir modelleri kapsar. Yani xAI, karar verme sürecindeki her bir adımı şeffaflaştırmaya ve bunu matematiksel veya istatistiksel olarak izah etmeye çalışır. Benim yaptığım ise sadece dil ve bilgi tabanlı açıklamalar sağlamak.

Kısacası, size verdiğim cevaplar xAI'nin yaptığı gibi kararların altında yatan verileri ve modeli açıklamak üzerine değil, daha çok doğal dil anlayışı ve cevap üretme üzerine odaklanıyor. Bu yüzden teknik anlamda ben bir **xAI değilim**.

# Predictive Maintenance Sistemi Örneği: Üretim Hattındaki Bir Motorun Takibi

Predictive Maintenance (PdM) sisteminin nasıl çalıştığına dair örnek bir süreç aşağıda açıklanmıştır. Bu örnekte, bir üretim hattında çalışan bir makine için PdM sistemi uygulanacaktır:

## 1. Veri Toplama

- **Sensörler:** Üretim hattındaki motorun üzerine çeşitli sensörler yerleştirilir. Bu sensörler, motorun çeşitli durumlarını ve çalışma koşullarını sürekli olarak ölçer:
  - **Titreşim Sensörleri:** Motorun titreşim seviyelerini izler.
  - **Sıcaklık Sensörleri:** Motorun ısını izler.
  - **Akım Sensörleri:** Elektrik motorunun çektiği akımı ölçer.
  - **Hız Sensörleri:** Motorun dönüş hızını takip eder.
  - **Ses Sensörleri:** Motorun çalışma sırasında çıkardığı sesleri kaydeder.
- **Veri Akışı:** Sensörlerden gelen veriler, IoT (Nesnelerin İnterneti) teknolojisi ile bir veri toplama platformuna (örneğin, bulut tabanlı bir veri depolama sistemi) gönderilir. Bu veriler gerçek zamanlı olarak sürekli izlenir ve kaydedilir.

## 2. Veri Analizi

- **Büyük Veri Analitiği:** Motorun çalışmasından toplanan büyük veri seti, büyük veri işleme teknikleri kullanılarak analiz edilir. Bu aşamada verilerin anlamlı hale getirilmesi için veri temizleme, özellik çıkarma ve normalleştirme gibi işlemler gerçekleştirilir.
- **Makine Öğrenimi ve Model Eğitimi:** Önceden belirlenmiş motor arızası senaryolarına (titreşimde anormal artış, aşırı ısınma vb.) dayalı olarak makine öğrenimi algoritmaları eğitilir. Bu aşamada model, normal ve anormal motor davranışlarını öğrenir. Örneğin:
  - **Anormallik Tespiti Modelleri:** Makine öğrenimi modeli, normal motor titreşimleri ile anormal titreşimleri ayırt eder.
  - **Kalan Faydalı Ömür (RUL) Tahmini:** Zamanla motorun ömrü azalırken, model motorun kalan faydalı ömrünü tahmin eder. Bu tahmin, motorun ne zaman bakım veya değiştirme gerektireceği konusunda bilgi verir.

## 3. Gerçek Zamanlı İzleme ve Tahmin

- **Gerçek Zamanlı İzleme:** Motor sürekli olarak izlenir ve sensörlerden gelen veriler anlık olarak değerlendirilir. Eğer verilerde bir anormallik tespit edilirse (örneğin, titreşim seviyesinde ani bir artış), PdM sistemi bu durumu işaretler ve potansiyel bir arıza olabileceği konusunda uyarı verir.
- **Tahmine Dayalı Analiz:** Makine öğrenimi modeli, verileri analiz ederek motorun belirli bir süre içinde arızalanma olasılığını tahmin eder. Örneğin, model motorun 10 gün içinde aşırı ısınma nedeniyle arızalanacağını öngörebilir.

## 4. Karar Verme ve Müdahale

- **Uyarı Sistemleri:** PdM sistemi, motorun yakında arızalanabileceğini öngörürse, bakım ekibine otomatik olarak bir uyarı gönderir. Uyarı sistemi şunları içerebilir:

- Arıza türü (örneğin, aşırı ısınma veya anormal titreşim).
- Önerilen bakım zamanı (örneğin, önümüzdeki 5 gün içinde bakım yapılmalı).
- Arıza olasılığına dayalı eylem planı (örneğin, motorun soğutulması, belirli parçaların değiştirilmesi).
- **Bakım Planlama:** Tahmine dayalı analizden elde edilen bilgilere dayanarak, bakım ekibi motor için gerekli önleyici bakım işlemlerini planlar. Bu bakım işlemi, motor arızalanmadan önce gerçekleştirilir, böylece beklenmeyen duruş süreleri ve maliyetler en aza indirilir.

#### 5. Bakımın Gerçekleştirilmesi ve Sistem Geri Bildirimi

- **Bakım Müdahalesi:** Motorun bakım işlemi gerçekleştirilir. Arızalı veya aşınmış parçalar değiştirilir ve motorun normal çalışması sağlanır.
- **Geri Bildirim:** Bakım sonrası yeni sensör verileri toplanarak sistem güncellenir. Makine öğrenimi modeli, bakımın etkinliğini ve motorun gelecekteki performansını değerlendirmek için bu verileri kullanır.

#### 6. Sonuçlar

- **Duruş Sürelerinin Azaltılması:** PdM sistemi sayesinde motor arızalanmadan önce bakım yapılır, böylece plansız duruş süreleri önlenir.
- **Maliyet Tasarrufu:** Anormal durumların erken tespit edilmesi, arıza sonrası onarıma kıyasla daha düşük maliyetli bakım yapılmasını sağlar.
- **Verimlilik Artışı:** PdM sistemi, bakım işlemlerini optimize ederek üretim hattındaki genel verimliliği artırır.

---

Bu örnek, Predictive Maintenance sistemlerinin endüstriyel uygulamalarda nasıl çalıştığını göstermektedir. Bu süreçte IoT sensörleri, makine öğrenimi algoritmaları ve veri analitiği gibi teknolojiler kritik bir rol oynar. PdM'nin amacı, arıza oluşmadan önce bakım gereksinimlerini tespit ederek operasyonel verimliliği en üst düzeye çıkarmaktır.

## Sonuç

Tahmine Dayalı Bakım, modern endüstriyel sistemlerin bakım ihtiyaçlarına yenilikçi çözümler sunmaktadır. IoT, büyük veri ve yapay zeka teknolojilerinin entegrasyonu ile PdM, maliyetlerin azaltılması, güvenilirliğin artırılması ve bakım süreçlerinin optimize edilmesi açısından büyük potansiyele sahiptir. Ancak, başarılı bir PdM uygulaması için uygun sistem mimarilerinin tasarlanması, net hedeflerin belirlenmesi ve doğru yaklaşımların seçilmesi kritik öneme sahiptir. Gelecekte, PdM'nin gelişen teknolojilerle daha da entegre olması ve endüstriyel uygulamalarda standart bir yöntem haline gelmesi beklenmektedir.



## References

- Zhou, H., Zhang, Y., Yang, D., & Zhu, J. (2020). **A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes, and Approaches**. arXiv preprint arXiv:1912.07383. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1912.07383>.
- Adadi, A., Berrada, M., & Stojanovic, J. (2023). **Explainable Predictive Maintenance: A Survey of Current Methods, Challenges, and Opportunities**. arXiv preprint arXiv:2401.07871. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2401.07871>.

Burak Can Evci

tarafından hazırlanmıştır.