



## ENDÜSTRİ İÇİN KESTİRİMCİ BAKIM

Mehmet Ümit Gürsoy<sup>a\*</sup>, Umut Can Çolak<sup>a</sup>, Mahmut Hilmi Gökçe<sup>a</sup>, Cem Akkulak<sup>a</sup>, Semih Ötleş<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi Anabilim Dalı, Türkiye

<sup>b</sup>Ege Üniversitesi, Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) Mükemmeliyet Merkezi, İzmir, Türkiye

\* Sorumlu Yazar: [mugursoy@gmail.com](mailto:mugursoy@gmail.com)

### ÖZET

Üretim ekosisteminin küreselleşmesi ile artan rekabet koşulları endüstride akıllı fabrikalara duyulan talebi gün geçtikçe artırmaktadır. Bu durum büyük bir zorluğu beraberinde getirerek imalat sektörünü bir sonraki adım olan tahmine dayalı üretime zorlamaktadır. Dolayısıyla üreticiler daha rekabetçi hale gelebilmek için verimliliklerini ve üretkenliklerini artırmalıdır. Bunun için gelişmiş analitik yaklaşımları benimsemeleri gerekmektedir. Nesnelerin İnterneti (Internet of Things: IoT) sistematik olarak veri toplamak, depolamak ve bu veriyi analiz ederek anlamlandırmak için kullanılmaktadır. Toplanan büyük veri analitik yöntemler vasıtasıyla yorumlanarak eski sorunlara yeni bakış açıları getirmeye ve tamamen yeni araştırma alanlarına olanak tanır. Şirketleri, IoT ile stratejik veya operasyonel süreçlerle nasıl karlı bir şekilde bütünleşebilecekleri konusunda bilgilendiren çok az araştırma ve derleme yapılmıştır. Bu çalışmada, endüstri ortamında üretilen büyük veri vasıtasıyla bakım yönetiminin potansiyellerini ve eğilimlerini dinamik olarak yönetmek için kestirimci bakım araştırılmıştır. Kestirimci bakım; ekipmanın ve bileşenlerinin arızalanmadan önce durumlarının izlenmesi ve verilerin analitik yöntemlerle analiz edilmesiyle yaşam ömürlerinin öngörülüp arıza çıkarma ihtimallerini değerlendirmek ve önlem almaktır. Böylece, ekipmanın plansız duruşlara maruz kalacağı ortamlarda önleyici bakım politikaları, gerçek zamanlı veri kullanımı ve tahmine dayalı makine öğrenimi algoritmalarının kullanılması yoluyla bakımı planlamakta ve optimize etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Kestirimci Bakım, Nesnelerin İnterneti (IoT), Büyük Veri, Endüstri 4.0

### PREDICTIVE MAINTENANCE FOR INDUSTRY

#### ABSTRACT

The increasing competition with the globalization of the production ecosystem increases the demand for intelligent factories in the industry day by day. This situation is forcing bringing with it a major challenge to the manufacturing sector to produce the next step. Therefore, manufacturers should increase their efficiency and productivity to become more competitive. To this end, they need to adopt advanced analytical approaches. Internet of Things (IoT) is used to collect and store data systematically and to make sense of this data by analyzing it. The collected large data can be interpreted by means of analytical methods to bring new perspectives to the old problems and to allow for new areas of research. Few researches and compilations have been made to inform companies about how they can profitably integrate with the IoT through strategic or operational processes. In this study, predictive maintenance has been investigated to dynamically manage the potentials and trends of maintenance management by means of large data generated in the industrial environment. Predictive maintenance; monitoring of the condition of the equipment and its components before failure and analyzing the data by analytical methods, evaluating the life expectancy and evaluating the possibility of failure and evaluating the data. Thus, it plans and optimizes maintenance by using preventive maintenance policies, real-time data usage and predictive machine learning algorithms in environments where equipment will be exposed to unplanned downtime.

**Keywords:** Predictive Maintenance, Internet of Things (IoT), Big Data, Industry 4.0.

## 1. GİRİŞ

“Nesnelerin İnterneti (Internet of Things:IoT)” terimi ilk olarak 1999’da “Tedarik zincirlerinde RFID (Radio Frequency Identification)” başlıklı sunumunda konuşan Kevin Ashton tarafından kullanılmıştır. Genel olarak IoT, insanları, verileri, süreçleri, makinaları ve fiziksel nesnelere birbirine bağlayan ağdır. Bu üst düzey bağlanabilirlik, işletmeler, bireyler ve şehirler için yeni özellikler, daha zengin deneyimler ve daha önce benzeri görülmemiş bir ekonomik fırsat sunmaktadır. Yirmi yıl sonra bu terim dünya tarafından bilinir ve hem akademi hem de sanayide önemli bir konu haline gelecektir [1], [2].

IoT’nin en önemli uygulama alanlarından biri imalat sanayisidir. IoT teknolojisinin sağladığı verimlilik iyileştirmeleri, özellikle işletmeyi izlemek, analiz etmek ve otomatikleştirmek için Siber-Fiziksel Sistemlerinde kullanılmasıyla imalat sanayisinde ekonomik ve rekabet edebilirlik üzerinde büyük etkisi olmuştur. Bilhassa, endüstriyel bakım, üretim ekipmanlarının güvenilirliği ve izlenebilirliği yoluyla bu rekabetçiliğe büyük ölçüde katkıda bulunur. Kusurlu bileşenler veya işlem hataları tüm üretimi durdurabilir ve imalat sanayindeki rekabetçiliği önemli ölçüde etkileyebilir. Kestirimci bakım bu nedenle günümüzde giderek önem kazanmaktadır [3].

Optimize edilmiş endüstriyel üretimin gücü internet teknolojileri ile birleştirilir ve üretim sürecini, bakım stratejilerini ve bakım yönetimini önemli ölçüde değiştirir. Bu nedenle, pek çok şirket Endüstri 4.0 terimini özetleyen gelişmeler ve kavramların çeşitliliğini değerlendirmek ve kendi stratejilerini geliştirmekle karşı karşıya kalmaktadır [3]. Dünya üretim ekosisteminin küreselleşmesi ve artan ürün çeşitliliği yerel sanayiler için büyük zorlukları beraberinde getirmektedir. Bu yüksek rekabetçi durum işletmelerin verimliliklerini ve üretkenliklerini artırmalarını zorunlu kılmıştır.

Verimliliğin artması işletmelerin üretim hatlarını ve yönetim birimlerini dijital ortama aktarıp hataları minimize etmekten geçmektedir. Bu da işletmelerin Ürün Yaşam Döngüsü (Product Lifecycle Management: PLM) sistemi, Nesnelerin İnterneti (IoT) sistemi ve Kaynak Planlama Yönetimi (Enterprise Resource Planning: ERP) sistemi gibi sistemlerin verimli ve etkin bir şekilde kullanılmasıyla mümkündür. Ancak bütün bunların yanısıra üretim hattındaki makinaların verimlilikleri bu makinaların daha düzgün çalışması ve tolere edilebilir hata limitlerinde üretimlerini devam ettirmelerine bağlıdır. İşte bu noktada devreye bu makinalardan gelen verileri çeşitlendirerek makinaların planlı ve plansız duruşlarının azaltılması ve bu süreçlerin doğru yönetilmesinden geçmektedir. Bu süreç optimizasyonu da makinaların anlık ürettikleri veri çeşitliliğini artırmaları ve bu verileri doğru ve hızlı analiz edip sonuçları neticesinde hızlı aksiyon almalarıyla mümkündür. Üretim hattındaki veri çeşitliliğini artırmanın yolu ise IoT vasıtasıyla üretim yapan makinalardan verilerin sensörler yardımıyla alınıp, dijital ortamda simüle edilip, gelişmiş analitik çözümler ve siber fiziksel sistem tabanlı yaklaşımlar yardımıyla veriyi yapay zeka teknikleriyle analiz edip, ekipmanların verimlilikleri artırmaktır. Bu noktada makinaların çalışma verimliliklerinin optimize edilmesi ve plansız duruşların önüne geçilmesi hayati öneme sahiptir. Bu da bakımlarının doğru ve zamanında yapılmasıyla mümkündür.

## 2. KESTİRİMCİ BAKIM İÇİN ENDÜSTRİ 4.0

Endüstri 4.0, Siber Fiziksel Sistemler, Nesnelerin İnterneti (IoT), Hizmetlerin İnternetinin (Internet of Services: IoS) ve Veri Madenciliği ile ilgili çeşitli teknolojik gelişmelerin bir araya getirilmesidir. Siber Fiziksel Sistemler, birçok yeni yöntemle insanlarla bütünleşebilecek ve fiziksel özelliklere sahip yeni nesil sistemleri ifade eder. Önemli olan, fiziksel dünyanın hesaplama, iletişim ve kontrol yoluyla etkileşimde bulunma ve yeteneklerini genişletme yetisidir [12]. IoT, çeşitli algılama, tespit, tanıma ve konum izleme aygıtları aracılığıyla fiziksel dünyayı genişletmek için internetteki nesnelere her zaman her yerde erişim olanağı tanımaktadır [13]. IoS, fiziki varlıklar yerine hizmetlerle benzer bir yaklaşım izlemektedir. Bu sistemlerin entegrasyonu, tüm sistemde sadece ortaklar arasındaki işbirliğini teşvik etmektedir. Kestirimci bakım açısından Endüstri 4.0 bu bölümde gözden geçirilerek tartışılacaktır.

### 2.1. Bulut Bilişim

Endüstri 4.0’ın arkasındaki itici güçlerden biri olan bulut bilişim, esnekliği ve diğer pek çok avantajı nedeniyle dünya çapında birçok işletmede kabul gören bir bilgisayar paradigması olarak hızla ortaya

çıkıştır [14]. Bulut bilişim çoklu kaynaklardan paylaşılan verileri verimli ve esnek bir şekilde yönetebilir ve IoT uygulamaları için birleşik bir servis dağıtım platformu sağlayabilmektedir [15]. Bulut tabanlı bir sistem, veri sağlamak için teknolojik bir temel sağlar ve yalnızca topluluk tipi hizmetlerin yaratılmasına değil, aynı zamanda etkileşimli, işbirliğine dayalı ve isteğe bağlı olarak özelleştirilebilir niteliklere sahip olabilecek açık bir hizmet platformu ortamının oluşturulmasına da izin vermektedir. Kestirimci bakım açısından bulut bilişim ortamı, çeşitli akıllı hizmetleri etkin bir şekilde destekleyebilir ve ekipmanın bellek kapasitesi, işlemcinin bilgi işlem gücü, veri güvenliği ve birden fazla kaynaktan gelen verileri birleştirme gibi çeşitli sorunları çözebilir.

## 2.2. Endüstriyel Büyük Veri

Endüstri 4.0 yeni bir üretim yönetimi ve fabrika dönüşümü elde etmek için akıllı analitik ve Siber-Fiziksel sistemlerin birleşimidir. Bu sistemler beraberinde sürekli farklı tiplerde endüstriyel veri üretirler ve bu veriler biraraya Endüstriyel büyük veri uygulamaları, üretim, tedarik zinciri, bakım ve servis, kalite yönetimi ve enerji dahil olmak üzere farklı üretim alanlarında faaliyet göstermektedir [16]. Bakım, arıza teşhisi ve sorun tahmininin araştırılması alanlarında, ekipmanın çalışma durumunu izlemek için uygun sensör kurulumları ve çeşitli sinyal işleme teknikleri kullanılmaktadır. Ek olarak, mevcut ve geçmiş verileri veri madenciliği teknolojileri ile karşılaştırarak olası hataların derecesinin belirlenmesi, bazı bileşenlerin güvenilirliğinin sağlanması ve diğer faydalı bilgilerin toplanmasını mümkün kılmaktadır.

## 2.3. Akıllı Fabrika

Endüstri 4.0 devrimi, ayrıca Siber-Fiziksel Sistemlerin fiziksel süreçleri takip ettiği, fiziksel dünyayı temsil etmek ve doğru kararların alınmasını kolaylaştırmak için sanal bir kopya oluşturduğu "Akıllı Fabrika" fikrinin vizyonunu ve uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Bu teknoloji, fabrikadaki ürünlerin sadece kimliklerini belirlemekle kalmaz aynı zamanda özelliklerini, tarihçesini ve durumunu Radyo Frekans Tanımlama (RFID) teknolojisi ile kaydedebilmektedir. Böylece Siber-Fiziksel Sistemler internet üzerinden iletişim kurup işbirliği yaparak fiziksel ve dijital dünyaları birbirine bağlamaktadır [17].

## 3. BAKIM STRATEJİLERİNİN İNCELENMESİ

Bakım, ekipmanların ya da makinaların muhtemel arızalardan arındırılarak ekipmanın yaşam döngüsü kadar süre içerisinde arıza yapmadan verimli bir şekilde çalışmasının sağlanması şeklinde tanımlanmaktadır. Makinelerin beklenmedik arızaları sebebiyle üretimin durması üretim kayıplarına ve maliyeti yüksek bakım ve onarım giderlerine sebep olmaktadır. Bu noktada üretimin sürekliliğini sağlamak ve verimi artırmak için atılması gereken en önemli adım; bakım teknolojilerinin gözden geçirilmesi ve en doğru yöntemlerin uygulanması olmalıdır. Söz konusu bakım teknolojileri olduğunda şüphesiz ki "Kestirimci Bakım" uygulanabilecek en doğru yöntemlerden biridir [10].

Bir bakım işlemi bir dizi bakım faaliyetini içerebilir: izleme, durum analizi, rutin bakım, revizyon, onarım ve yeniden yapılanma. Avrupa standardına göre, bakım, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca tutması veya gerekli işlevi gerçekleştirebileceği bir durumda geri getirmesi veya eski haline getirmesi amaçlanan tüm teknik, idari ve yönetsel eylemlerin birleşimi olarak tanımlanır [6]. Bakım stratejisindeki ilerleme, uzun bir tarihsel gelişmeden faydalanmaktadır.

**Çizelge 1.** Bakım Stratejilerinin Sınıflandırılması [5].

Çizelge 1'de gösterildiği gibi, bakım stratejilerinin sınıflandırılması Arızı Bakım, Periyodik Bakım ve Kestirimci Bakım olarak üç sınıfa ayrılmaktadır [5]. Arızı Bakım, ekipmanın belirgin bir arızası veya duruş gerçekleştiğinde yapılan onarımdır. Bu nedenle Arızı Bakım aynı zamanda arıza kontrollü bakım veya plansız bakım olarak da adlandırılır. Periyodik Bakım, önceden belirlenmiş aralıklarla veya önceden tanımlanmış kriterlere göre, bazı fonksiyonların başarısızlık veya bozulma olasılığını azaltmak amacıyla gerçekleştirilir. Periyodik Bakım, temeldeki bir kritere göre herhangi bir izleme faaliyeti olmadan planlanmaktadır. Programlama, çalışma saatlerinin veya zamanlarının sayısına bağlı olabilir. Bu iki strateji çoğu sektörde çok iyi bilinmektedir. En popüler ve modern bakım politikalarından biri olan Kestirimci Bakım ise ekipman durumundaki parametreleri, arıza riskini arttırmadan makinelerin ve işlemlerin ömrünü optimize etmek için uygun görevleri yerine getirip getirmedini ölçerek yapılan bakımdır [7].

### 3.1. Arızı Bakım

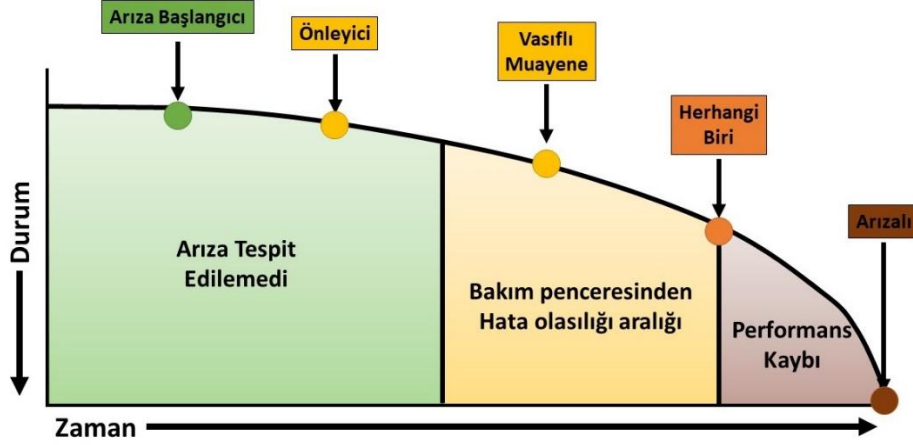
Arızı (Reaktif) bakım temelde “bozulana kadar çalıştırın” mantığıyla uygulanan bakım yöntemidir. Ekipman bozulana kadar kullanılır, bozulduktan sonra teknik personelin bilgi ve becerisi yettiği ölçüde tamir edilir. Teknik elemanın tamir edemeyeceği durumlarda ise ekipman servisi ile görüşülerek arıza giderilmeye çalışılır. Ancak ekipmanların zamansız bozulmaları ürün maliyetlerinde artışa neden olur. Çünkü ekipmanın tamiri için geçen sürede üretim kayıpları meydana gelir. Ayrıca bozulan ekipmanlar birlikte çalıştığı diğer parçalara da zarar verebilir. Üretim hattında makinenin işlem yaptığı andaki parçayada zarar vererek o parçayı kullanılmaz hale getirebilir. Ekipmanlara gerektiği şekilde bakım yapılmadığı için ekipman bozuluncaya kadar geçen sürede daha fazla enerji tüketimi gerçekleşecektir.

### 3.2. Periyodik Bakım

Periyodik bakım, işletmenin varlıklarının işlevselliği ve verimliliği için makine ve ekipmanların geçmiş bakım kayıtlarının ve çalışma şartlarının değerlendirilerek zaman planlarına dayalı olarak durdurulup bakım tariflerine göre bakıma çekilmesi ve değişecek yedek parçadan işçiliğe kadar tüm aşamaların planlanıp hazır bulundurulduğu bakım yönetimidir.

Periyodik bakım; ekipmanın arıza çıkarma ihtimalini azaltmaya yönelik uygulanan, zamanı ya da kullanım alışkanlığını temel alarak yapılan bakım yöntemi olarak tanımlanır. Önleyici bakım olarak da bilinen periyodik bakım işletmelerde en çok kullanılan bakım türüdür [8],[9].

Hedefimiz, işletmelerde arızı bakımları minimuma indirerek bakım optimizasyonu sağlamaktır. Tesislerde uygulanan bakım işleri beraberinde birçok tehlikeyi getirmektedir, uygulanacak sistemli bir bakım yönetimi tüm bakım işlerini içeren bir bakım prosedürü ve bakım esnasında yapılması gerekenleri içeren bakım talimatları doğrultusunda uygulanacak periyodik bakım potansiyel tehlikeleri azaltacaktır.



Şekil 1. Bakım döngüsü grafiği [20]

Şekil 1’de makinenin zamana bağlı performans durumunu bakım verileriyle ilişkilendirilmesi gösterilmiştir.

### 3.2.1. Güvenilirlik Tabanlı Periyodik Bakım

Makinenin parçalarının önceki bozulma istatistiklerine bakılarak planlanan bakım uygulamasıdır. Şekil 1’de gösterildiği gibi parçaların Bakım Yaşam Döngülerine bakılarak periyodik bakım optimize edilmektedir [4].

### 3.2.2. Zamana Dayalı Periyodik Bakım

Zamana dayalı olarak yapılan planlı bakım periyodik bakımın en yaygın biçimidir. Makine üreticilerinin belirlediği zaman aralıklarında makinaların bakımları yapılır. Bir problemle karşılaşıldığında arıza bakım uygulanmaktadır.

### 3.3. Kestirimci Bakım

Kestirimci bakım; ekipmanın ve bileşenlerinin sorun çıkarmadan önce durumlarının izlenmesi ve verilerin analitik yöntemlerle analiz edilmesiyle yaşam ömürlerinin öngörülüp arıza çıkarma ihtimallerini değerlendirerek zamanında önlem almaktır. Böylece ekipman belirli parametreler açısından izlenir ve ileriki dönemde “hangi arızaları çıkarma ihtimalini sergiliyor” kontrol edilir. Kestirimci bakımın iki amacı vardır. Bunlardan birincisi ekipmanın çıkarması muhtemel arızayı belirlemek, ikincisi ise bu arızanın büyümesini engellemek adına önceden müdahale etmektir. Temel olarak kestirimci bakımın periyodik bakımdan ayrıldığı nokta bakımın zaman bazlı değil de durum bazlı olmasıdır.

Kestirimci bakımın amacı, ekipmanın çalışma durumunu izleyerek ve ekipman arızasının ne zaman ortaya çıkabileceğini tahmin ederek sıfır arıza üretimi öncülünde arıza süresini ve bakım maliyetini azaltmaktır. Gelecekteki potansiyel arızalar için tahmin yoluyla arıza gerçekleşmeden önce bakımın planlanmasını sağlamaktadır. İdeal olarak, bakım programı bakım maliyetini en aza indirmek ve sıfır hatalı üretime ulaşmak için optimize edilmektedir.

Yapay zekâ teknolojisinin gelişmesiyle beraber mümkün olan önleyici ve kestirimci bakım ile yapılan makine bakım ve performans yönetimi, sadece makinaların arıza, bilgi ve tahminleri değil aynı zamanda akıllı bakım takibiyle daha önce de aynı nedenden bozulduysa nasıl tamir edildiği gibi çok daha geniş çaplı bir vizyon sağlamaktadır. Önleyici ve kestirimci bakım, makine öğrenimi ve veri analitiğini kullanarak makinelerin çalışma değerleri, nasıl üretildiği, bakım bilgileri ve çalışma koşulları gibi geniş yelpazedeki birçok veriyi kullanır. Cihazların ortalama performans değerlerini, potansiyel arızalarını, bakım durumunu ve takvimini, nasıl tamir edileceği gibi bilgileri sunar. Böylece üretim hattını etkileyen kritik cihazların olası arızalarını daha oluşmadan belirleyip, bakım ekibini,

nasıl tamir edileceği bilgisiyle beraber yönlendirerek duruşları önemli miktarda azaltır. Bu da üretimde süreklilik ve verimi arttırarak üretim ve bakım maliyetlerini azaltmaktadır [19].

Bununla birlikte, büyük veri ve bulut bilişim gibi teknikler kullanılmadan kestirimci bakımı tüm avantajlarıyla gerçekleştirmek zordur. Birçok üretim sistemi, veri erişimi ve veri kalitesi konusundaki yüksek talep nedeniyle büyük verileri yönetmeye hazır değildir ve ilgili bilgileri elde etmek için birden fazla veri kaynağı kullanmaktadır.

Diğer bakım stratejileriyle kıyaslandığında, Kestirimci Bakımın birçok avantajları vardır. Bunlardan bazıları:

- I. Bakım gerektiren ekipman yalnızca yakın bir arızadan önce kapatılır. Dolayısıyla duruşlar ve süreleri azalır.
- II. Ekipmanı korumak için harcanan toplam süreyi azaltır.
- III. Yıkıcı zararlardan kaçınarak bakım maliyetlerini azaltır ve bakımları kolaylaştırır.
- IV. Makinelerin kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini arttırarak iş bitim sürelerini optimum hale getirir.
- V. Ekipmanın ve işlem ömrünün uzatılmasını sağlar.

Bununla birlikte, Kestirimci Bakım aşağıdaki gibi çeşitli zorluklarla da karşı karşıyadır [18]:

- I. Veri paylaşımı ve veri yayını için birden fazla kaynaktan veri erişimi, veri kalitesi ve veri birleşmesi gibi yüksek talepler. Bu veri kaynakları genellikle heterojen bir ortamda çalıştığından, sistemler arasındaki entegrasyon problemlidir [11].
- II. Endüstriyel büyük verilerle başa çıkma zorluğu. Kestirimci bakım için büyük işletmelerin büyük verilerden yararlanması, farklı türdeki bilgileri destekleme yeteneğine, büyük veri kümelerini saklama altyapısına, toplanıp depolanan bilgiyi kaldırabilme esnekliğine ve verilerin tarihsel analizini gerçek zamanlı işleme yeteneğine sahip olmasını gerektirir [12].

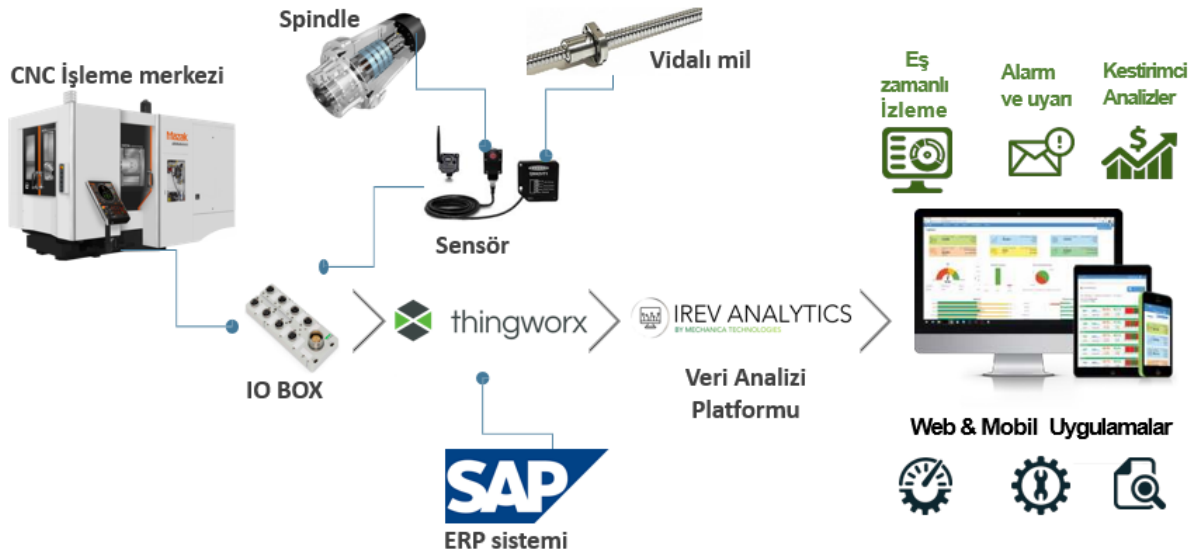
#### **4. DURUM ÇALIŞMASI: VERİMLİLİK ODAKLI KESTİRİMCİ BAKIM PROJESİ**

Bu bölümde, kestirimci bakımın uygulanması ile ilgili bir saha çalışması tanıtılmıştır. Bu örnek olay, sistemin üretim sürecindeki hata, kusur ve bakım maliyetlerini azaltmak için belirti ve izleme yoluyla ekipman sağlığını değerlendirmeye ve tahmin etmeye odaklanılan Verimlilik Odaklı Kestirimci Bakım adlı bir projeden gelmektedir.

Saha çalışması otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir şirkette uygulanmıştır. Otomobil süspansiyonları üreten bir hatta CNC (Computer Numerical Control) makineleri üzerinde kestirimci bakım çalışması yürütülmüştür. Hâlihazırda fabrikada bakım için özel bir yazılım bulunmakta ve duruş bilgileri ile cihazın çalışma düzen verileri toplanmaktadır. Üretim hattı düzenli olup bir IoT platformuyla entegre çalışmaktadır. Ancak bakım zaman bazlıdır, periyodik ve gerektiğinde arızı olarak ilerlemektedir. Var olan bakım stratejisinin önerilerle birlikte sürekli gelişen bir yapı haline gelmesi istenmektedir. Önerilen bakım stratejisi, tahmin veya değerlendirme sonucuna göre bir karar destek sistemi oluşturulacaktır. Bu hedef doğrultusunda, bakım maliyeti, işleme doğruluğu veya hatalı yüzde gibi birkaç faktör arasındaki dengeyi yakalamak ve ardından en uygun kararı almak optimizasyon ve ilişkilendirme teorilerine bağlıdır. Aynı zamanda cihazlar uzun süreli çalıştığından ve yapılan işlemler kısa olduğundan CNC'lerin sürekli çalışması çok önem arz etmektedir. Özellikle de hatta 62 CNC'nin bulunduğu düşünülürse oluşacak herhangi bir plansız duruş ciddi kayıplara sebebiyet vermektedir. Bu yüzden kestirimci bakımın uygulanması ve veri analitiği için altyapı oluşturulması fabrikanın sürekliliği için büyük önem arz etmektedir.

Uygulanacak olan kestirimci bakım özellikle periyodik bakımın rutinini bozan delici (spindle) ve vidalı mile odaklanması gerekmektedir. Bu yüzden makinanın sadece genel yaşam ömrünün değil spindle ve vidalı milin de gerçek zamanlı olarak yaşam ömrünün bilinmesi gerekmekte ve bakım döngülerinin bağımsız olarak yürütülüp izlenmesi gerekmektedir. Böylece parçaların yaşam ömürlerinin izlenmesi ve duruşlarda bakım modülünün sadece operatörden değil kestirimci bakım için konumlandırılan yapay zekâdan da geri bildirim alması sağlanabilecektir. Bu da hem içerdeki yönetim sistemlerinin (MES: Manufacturing Execution System) hem de bakım departmanının iş yükünü azaltıp süreçlerin daha verimli ve güvenilir ilerlemesini sağlayacaktır. Amaç üretimin sürekliliğini sağlayıp bakımı daha düzenli hale getirerek hem iş yükünün hem de parça ve işçilik olarak maliyetlerin düşürülmesidir. Bu işlem için kurulacak bir kestirimci bakımın altyapısını IIoT (Industrial IoT) oluşturmalıdır. Çünkü IIoT hem cihazlarla hem de ERP sistemi (SAP: Systems Analysis and Program Development) ile birebir iletişimde kalarak kendi veri kanallarını belirleyip, o kanallarla sürekli iletişimde kalıp, verileri depolayıp, aynı zamanda da belirli aralıklarla o cihazın fabrikada bulunduğu bütün dijital iş süreçlerinin bilgisine periyodik olarak erişilebilen bir veri havuzu oluşturabilir. Kestirimci bakım için oluşturulan yapay zekâ bu veri havuzundan asenkron olarak güncellenir. Böylece sürekli olarak geliştirilip daha iyi karar vermesi sağlanmaktadır.

Kestirimci bakım uygulamalarında, cihaz üzerinden alınacak verilere bakıldığında, özellikle spesifik parçalara odaklanılırsa ekstra veri kanallarına ihtiyaç olmaktadır. Çünkü kontrol ünitesi ve duruş bilgileri bize yeteri kadar bilgi sağlayamamaktadır. Bu yüzden odaklanılacak parçaların arıza anında etki ettiği bölgelerin durumuna göre sensörler yerleştirilmelidir. Dolayısıyla geliştirilen uygulamada titreşim, ivme ve sıcaklık gibi parametreleri elde edebilmek için makinanın uzmanı kişiler tarafından özel olarak belirlenmiş bölgelere sensörler yerleştirilmiştir. Böylece sensör verileri, kontrol ünitesi ve duruş bilgileri ile desteklenerek uygulama için ihtiyaç olan cihaza özel veri havuzu elde edilmiştir. Kestirimci bakımda doğru veri havuzunu oluşturmak çok önemlidir. Veri havuzu bütün uygulamanın altyapısını oluşturur ve geri kalan tüm geliştirmeler bu altyapının üzerine inşa edilir.

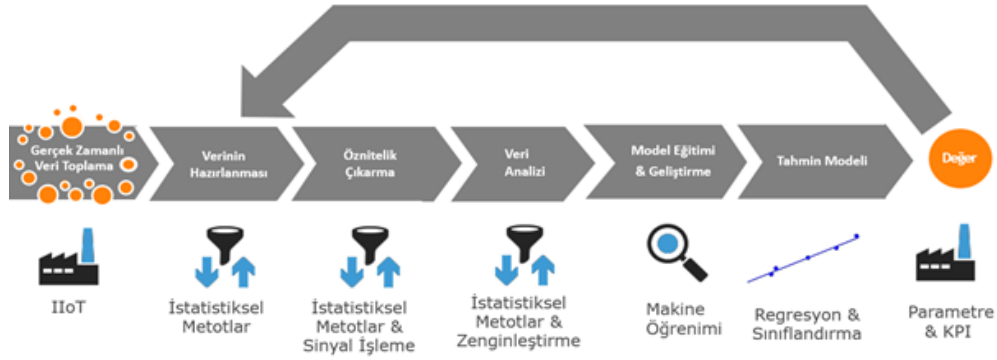


**Şekil 2:** Sistem mimarisi ve bileşenleri  
Kaynak: Tarafımızca geliştirilmiştir.

Şekil 2, sistemin genel yapısını göstermektedir. İlk olarak cihaza ait iç parametreler belirlenmiştir. Bu yapıya göre sensörler ve kontrol ünitesinden gelen tüm veriler IO Box (Input Output Modül Kutusu; IIoT için sensörler ve yazılım arasında köprü görevi görür.) cihazlarında toplanarak periyodik olarak bir OPC (Ole for Process Control) sunucu aracılığı ile IIoT platformuna (PTC ThingWorx) gönderilmektedir. Bu veriler IIoT platformunda hem operasyonel olarak kullanılırken hem de ERP sisteminden (SAP) gelen verilerle birleştirilip veri analiz platformuna (IRev Analytics) iletilmektedir.

Analiz platformunda veri sürekli olarak işlemde geçerek kullanıcıya değer olarak döndürülecek olan KPI'ları (Key Performance Indicators: Anahtar Performans Parametresi) üretmektedir. Bu parametreler, yaşam ömrü ya da anomali grafikleri ile IIoT platformunda ekranlarla izlenebileceği gibi, ERP sisteminde de üretim ve bakım modülü içerisinde tablolarla izlenerek rapor halinde incelenebilmektedir. Böylece bakım ve üretim planlamasını yaparken ihtiyaç duyulacak parametrelerin sürece entegre edilmesi sağlanmış olur. Sistemler arası bir kapalı döngü oluşturularak tüm süreçlerin insandan bağımsız dijital olarak yönetilebilir hale getirilmesi için gerekli altyapı sağlanmakta ve konumlandırılan yapay zekâ, sistemi sürekli hatalarından öğrenip daha az hata yaparak izlenebilirliği ve güvenilirliği arttırmaktadır.

Yukarıdaki paragrafta, gelen veriler düzenlenip tek bir paket halinde veri analiz platformuna iletiğinden ve burada işlemlerden geçtiğinden bahsedilmiştir. Bu işlemler veri madenciliği adımlarıdır. Bu adımlar istenilen uygulama ve kullanılan verilerin tipine göre değişiklik gösterebildiği gibi donanımına bağlı olarak da değişiklik gösterebilir. Bu yüzden kestirimci bakım sisteminin paket program olarak sunulması ancak dar kapsamlı tek bir amaca hizmet ettiğinde mümkün olabilir. Bu nedenle sürekli olarak veri bilimcilerin güncelleme yapması ve gelen verileri sürekli analiz ederek var olan modellerin güncellenmesi gerekmektedir.

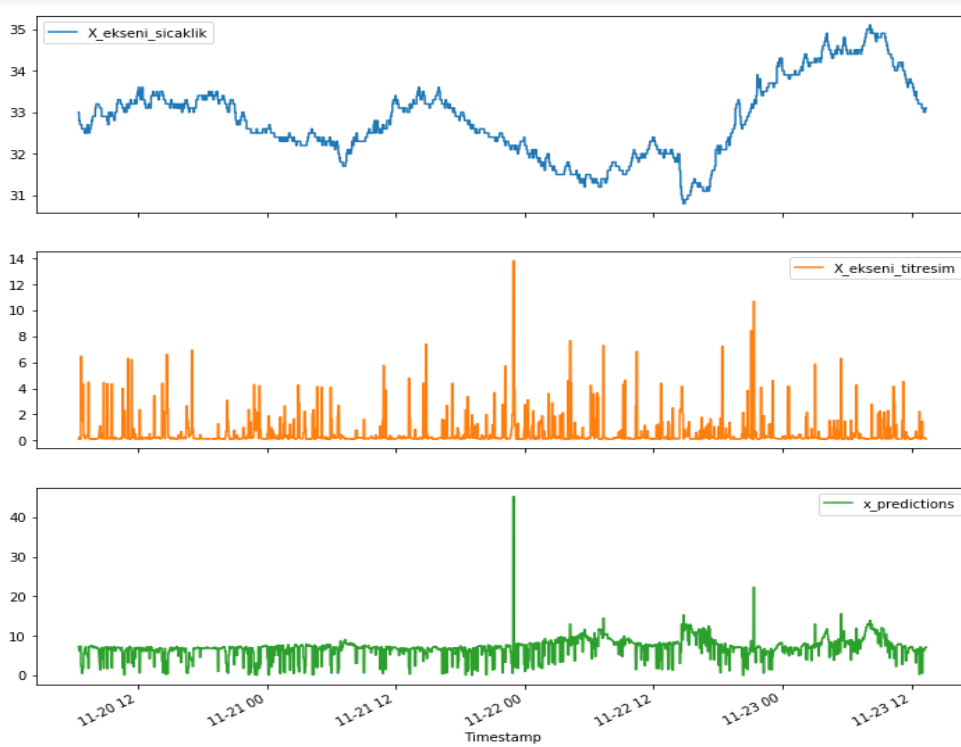


**Şekil 3:** Verinin öngörüye dönme aşamaları

Kaynak: Tarafımızca geliştirilmiştir

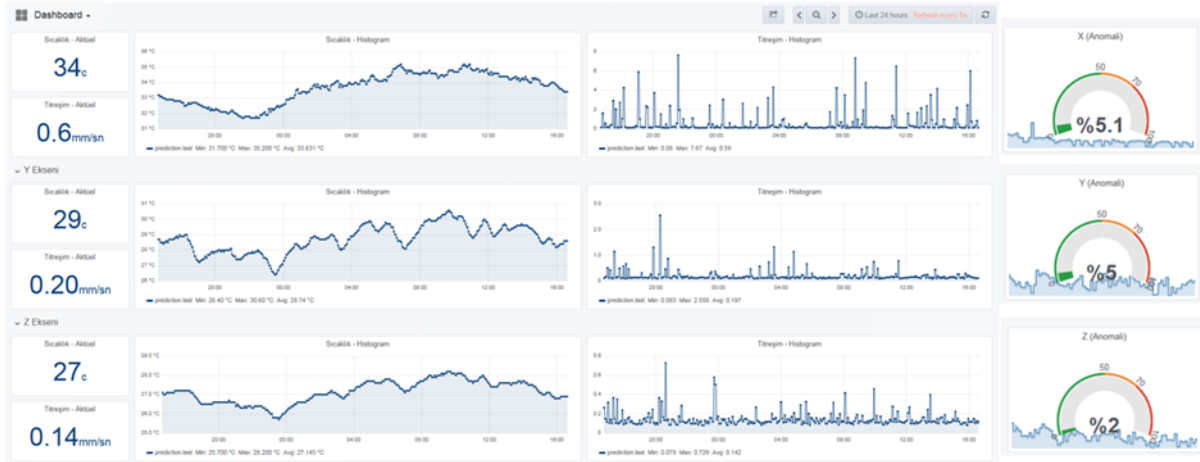
Şekil 3’de bu uygulamadaki iki parça ve makinanın yaşam ömrü ile döngüsünün belirlenip önceden tahmin edilebilmesi için geçtiği adımlar gösterilmiştir. Bu adımlardan ilki verilerin toplanıp analiz edilebilmesi için ölçeklenmesi ve düzenli bir hale getirilmesidir. Daha sonra yapılandırılan veriden tahminleme modelini oluşturabilmek için öznitelikler (features) çıkarılması gerekmektedir. Bu adımın, uygulama çeşidine, modeline ve amacına göre değiştiğini unutmamak gerekir. Bu uygulamada hem istatistiksel birtakım metotlar kullanılmıştır hem de frekans ve ona bağlı öznitelikleri çıkaracak birtakım sinyal işleme metotları kullanılmıştır. Böylece veri her boyuttan incelenip anormal bir durum olup olmadığını tespit edilebilir hale gelmiş ve öznitelik olarak sisteme eklenir hale gelmiştir. Daha sonra veri tekrar ölçeklenip analiz edilerek model oluşturulmaya hazır hale getirilmiştir. Modeller çeşitli makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak tekrar tekrar oluşturulup test edilerek sonuçlar değerlendirilir ve en uygun model bulunarak uygulama haline getirilip elde edilen KPI’lar sisteme eklenmektedir. Böylece gelen veriler gerçek zamanlı olarak izlenebilir ve istenen parametreler periyodik olarak elde edilebilir hale gelmektedir. Elde edilen parametreler ERP ve benzeri yönetim sistemlerine IIoT aracılığı ile entegre edilerek değer elde edilmesi sağlanmış olur. Son olarak sistemden gelen verinin doğruluğu ile ilgi geri bildirimler yeni verilerle birlikte sistemin bütün adımlarını tekrar edip kendini güncelleyerek yeniden doğruluğu daha yüksek parametreler elde edilir ve kapalı bir döngü oluşturulmuş olur.





**Şekil 4:** Verilerden edilen örnek bir öznelik  
Kaynak: Tarafımızca geliştirilmiştir

Şekil 4’te yukarıdaki paragrafta bahsedilen öznelik ve parametre çıkarma işlemine örnek verilmiştir. Bu parametre çıkarma işlemi istatistiksel olup anomali değerini yüzde olarak vermektedir. Böylece sensörün etki ettiği bölgede oluşan anomaliler hakkında bilgi verip o bölgeye ait bir tahminleme modeli oluşturulmasına izin vermektedir. Ayrıca Şekil 4’te bulunan örnekteki gibi, elde edilen bazı öznelikler direk parametre olarak da kullanılabilir olduğundan IIoT platformu aracılığı ile kullanıcılara ve sistemlere sunulabilmektedir.



**Şekil 5:** Örnek anomali ekranı  
Kaynak: Tarafımızca geliştirilmiştir

Şekil 5’te bir önceki paragrafta bahsedilen anomali parametresinin ekran örneği verilmiştir. Ekranda titreşim, sıcaklık parametreleri ile anomali bir ekranda kontrol edilip karar verme mekanizmalarına yardım etmektedir.

Bu çalışmada anlatılan Verimlilik tabanlı kestirimci bakım projesi kestirimci bakım sistemine uygun olarak hayata geçirilmiş ve yaygınlaştırılabilmesi için ölçeklenebilir olmasına özen gösterilmiştir. Kestirimci bakım projeleri alışlagelmiş yazılım mimarilerinden farklı olarak, inşa edilebilmesi ve gerekli veri havuzunun oluşturulabilmesi için zaman ve belirlenen amaç için kaliteli ve doğru veri gereksinimi duymaktadır. Aynı zamanda yeterli, kaliteli ve doğru veri alınabilmesi için kestirimci bakım uygulanan firmaların süreçlerinin dijitalleşme anlamında belli bir olgunluğa ulaşmış olması gerekmektedir. Tüm süreçler dijital olarak ilerleyeceğinden uygulamayı besleyecek her farklı veri

kanalı ve bu kanalların güvenilirliği başarıyı ve firma içinde ölçeklendirilebilmesini ciddi oranda arttıracaktır.

## 5. KESTİRİMCİ BAKIMIN İŞLETMEĞE SAĞLADIĞI KAZANÇLAR

Sanayi Devrimi'nin ilk günlerinde, makineler bugünkü gibi çok karmaşık yapılar halinde değildi ve bu durum da makineler için daha az arıza anlamına geliyordu. Endüstri Devrimi'nin 2. ve 3. evresine girdiğimizde, montaj hatları ile birlikte Programlanabilir Mantık Kontrolörleri (PLC: Programmable Logic Controller) aracılığıyla hızlı otomasyon senaryoları endüstri operasyonlarında yerini aldı. Karmaşık makinelerle daha az el emeği ile daha fazla, etkin ve verimli üretim operasyonları gerçekleştirilmektedir. Bu durum pazar koşullarının daha zor ve çetin olmasına neden olmaktadır. Rekabet gücünü korumak için, fabrikalar ve üretim firmaları, üretim çıktısı, genel ekipman etkinliği, personel verimliliği gibi çeşitli performans ölçütlerini ölçmeye ve yakından takip etmeye başladı. Ancak bir arıza olduğunda gerçekleştirilecek bir faaliyet olarak görülen bakım çok daha önemli hale geldi. Bu sayede, düzenli olarak planlanan periyodik bakım stratejileri popüler hale geldi. Makinelerin bu periyodik muayenesi, sorunların erken tespit edilmesine yardımcı olarak, arızaların en aza indirgenmesine ve üretimin durmasına neden olan etmenlerin azaltılmasında etkili olmaktadır.

Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT) veya Endüstri 4.0 olarak da bilinen Sanayi Devrimi'nin 4. dalgasına girdiğimizde, ekipman kullanımı, işletme maliyeti, işçi verimliliği konularına daha fazla odaklanılmaktadır. Endüstriyel IoT, düşük maliyetli sensörleri etkin bir biçimde operasyona entegre edilmesi ile ilgilidir. Makine verilerini toplamak ve anlamlı çıkarımlar elde etmek için ileri analitik yapılar kullanılmaktadır. Endüstriyel IoT'nin üreticilerin üretkenliklerini %30 artırmalarına izin vereceği öngörülmektedir. Makine arızalarını tahmin etmek için gelişmiş analitik kullanan bakım stratejisi, Kestirimci Bakım Uygulamaları olarak bilinir.

Yakın zamanda Endüstriyel IoT'nin en çok atıfta bulunulan uygulaması olarak kestirimci bakım vurgulanmaktadır. Kestirimci bakım, üreticilerin bakım maliyetlerini düşürmelerini, ekipman ömrünü uzatmalarını, arıza sürelerini azaltmalarını ve ekipman arızalarına neden olmadan önce sorunları ele alarak üretim kalitesini ve çıktıları artırmasını sağlar. Bununla birlikte, bu faydaları gerçekleştirmek için, gelişmiş bir dijital altyapının kurulması ve bir IoT platformunun konuşlandırılması gereklidir. Ayrıca makine verilerini analiz etmek için makine öğrenmesi ve tahmine dayalı modelleme gibi istatistiksel tekniklerin kullanılması zorunluluk haline gelmiştir.

Kestirimci bakım bir bakım stratejisi olarak etkili bir şekilde çalışırken, bakım yalnızca makinalara gerektiğinde uygulanır. Makinada arıza oluşmadan önce analitik veriler ışığında kestirimci bakım gerçekleştirilir. Bu bakım stratejisi birkaç maliyet tasarrufu sağlar. Bunlar:

- I. Ekipmanın bakım için alıkondduğu süreyi minimize etmek.
- II. Ekipmanın bakımı nedeniyle kaybedilen zaman, etkili üretim zamanına çevrilmiş olur.
- III. Kestirimci Bakım, acil kullanılmak için gerekli yedek parçaların bekleme zamanını azaltır. Ayrıca bir ekipmanın sadece arızadan hemen önce çözümünü sağladığı için, arızalı ekipmanın bakımı için harcanan toplam zamanı ve maliyeti azaltır.

Kestirimci bakım programları, yatırımın ekonomik olarak geri dönüşünde on katlık bir artışa neden olur. Bunun ile birlikte, bakım maliyetlerinde %25-%30 arası düşüşe, arızalarda %70-%75 düşüşe ve arıza süresinde %35-%45 aralıklarında düşüşe yol açtığı gözlemlenmiştir. Ancak bu tasarruflar belirli bir oranda maliyeti de beraberinde getirir. Bazı kestirimci bakım makine arıza izleme teknikleri pahalıdır ve veri analizinin etkili olması için uzman ve deneyimli personel gerektirmektedir.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada Endüstri 4.0 ortamındaki sanayilerin bakım modelleri ve özellikle kestirimci bakımın gelişimi ile potansiyelleri araştırılmıştır. 4. Sanayi devrimi, gelecekte yönetilen endüstrilerde kestirimci ve akıllı üretimi teşvik etmektedir. Endüstri 4.0'ın sağlıklı uygulandığı bir fabrikada, makineler kestirimci bakım için büyük bir potansiyel oluşturan ortak bir topluluk olarak birbirine bağlıdır. Bu yüzden, kestirimci bakımın temelini oluşturan bulut bilişim, endüstriyel büyük veri ve

akıllı fabrika ortamı hızlandırılmış ve teşvik edilmiştir. Böylece fabrikaların kestirimci bakımın en önemli koşulu olan veri depolama ve analiz etme altyapısına ulaşması hız kazanmıştır.

Kestirimci bakım uygulamaları, geçmiş verileri kullanarak gelecekteki sonuçları tahmin etmemizi sağlar. Geçmiş verinin kalitesi ve güvenilirliği ise kestirimci bakımın başarısının en önemli anahtarıdır. Bu yolda yapılacak en doğru şey amaçların ve veri noktalarının doğru belirlenmesidir. Doğru veri noktalarının belirlenmesi, makineye gerçek zamanlı veri alımı için doğru sensörlerin entegre edilmesi ile birlikte makine arızalarının canlı takibi için veri kalitesinin iyileştirmesini sağlar. Veri hazırlama ve veri kalitesi, herhangi bir tahmine dayalı model için anahtar girdilerdir. Kestirimci bakımın tahminleme modelini sahip olduğu daha kaliteli veriler bu sistemin doğruluğunu artırır. Bu da kestirimci bakımın başarısını artırır. Böylelikle işletmeler kendi varlıklarını rekabetçi bir şekilde geleceğe taşıyabiliyorlar.

Sonuç olarak, kestirimci bakım uygulamaları bir varış noktası değil, bir yolculuk olarak görülmeli ve her alanda geliştirilmeye devam edilmelidir.

## KAYNAKLAR

1. Haller S, Karnouskos S, Schroth C. The Internet of Things in an Enterprise Context. Springer, 2009.
2. Meyer S, Ruppen A, Magerkurth C. Internet of Things-aware Process Modeling: Integrating IoT Devices as Business Process Resources. In: Advanced Information Systems Engineering, pp. 84–98, 2013.
3. Wang C, Vo HT, Ni P. An IoT Application for Fault Diagnosis and Prediction. IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems, 2015.
4. Lee J, Kao HA, Yang S. Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. Procedia CIRP, vol. 16, pp. 3-8, 2014.
5. Li Z, Wang K. Industry 4.0 – Potentials for Predictive Maintenance. International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation (IWAMA), 2016.
6. Standard E. Maintenance terminology. In: European Committee for Standardization 13306, ed. Brussels, 2001.
7. Wang KS, Li Z, Braaten J, Yu Q. Interpretation and compensation of backlash error data in machine centers for intelligent predictive maintenance using ANNs. Advances in Manufacturing, vol. 3, pp. 97-104, 2015.
8. Garcia M, Sanz-Bobi MA, del Pico J. SIMAP: Intelligent System for Predictive Maintenance: Application to the health condition monitoring of a windturbine gearbox. Computers in Industry, vol. 57, pp. 552-568, 2006.
9. Liu J, Djurdjanovic D, Ni J, Casotto N, Lee J. Similarity based method for manufacturing process performance prediction and diagnosis. Computers in Industry, vol. 58, pp. 558-566, 2007.
10. İnce M, Bekiroğlu N, Ayçiçek E. Kestirimci Bakım Teknolojilerinin Araştırılması ve Endüstriyel Bir Motorun Amt Sistemi ile Arıza Analizlerinin Çıkarılması. Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Makinaları Anabilim Dalı, 2017.
11. Aljumaili M, Wandt K, Karim R, Tretten P. eMaintenance ontologies for data quality support. Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 21, pp. 358-374, 2015.
12. Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems. The impact of control technology, vol. 12, pp. 161-166, 2011.
13. Chaves LW, Nocht Z. Breakthrough towards the internet of things. In: Unique Radio Innovation for the 21st Century, ed: Springer, 2011, pp. 25-38.
14. Bughin J, Chui M, Manyika J. Clouds, big data, and smart assets: Ten tech-enabled business trends to watch. McKinsey Quarterly, vol. 56, pp. 75-86, 2010.
15. Li L, Xinrui L, Xinyu L. Cloud-Based Service Composition Architecture for Internet of Things. Communications in Computer and Information Science, Springer, vol. 312, pp. 559-564, 2012.
16. O'Donovan P, Leahy K, Bruton K, O'Sullivan DT. Big data in manufacturing: a systematic mapping study. Journal of Big Data, vol. 2, pp. 1-22, 2015.
17. Hermann M, Pentek T, Otto B. Design principles for Industrie 4.0 scenarios: a literature review. Technische Universität Dortmund, Dortmund, 2015.
18. Wang K. Intelligent predictive maintenance (IPdM) system – Industry 4.0 scenario. Editors: K. Wang, Y. Wang, J. O. Strandhagen and T. Yu, Proceedings of Advanced Manufacturing and Automation V, WIT Transaction on Engineering Science, Vol 113, pp. 259-268, 2016.
19. Ötleş S, Çolak, UC, Ötleş O. Endüstri için Yapay Zekâ. Plastik Ambalaj Dergisi, syf. 46-50, 2018.
20. <https://www.lce.com/Involving-Operators-in-Your-Equipment-Maintenance-Plans-1882.html>