



## ELEKTRİK MOTORLARINDA UYGULANAN BAKIM YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ, KARŞILAŞTIRILMASI VE UZAKTAN ERİŞİMİN KESTİRİMCİ BAKIMA ETKİSİ

<sup>1</sup>Abdulsamed TABAK , <sup>2</sup>Mehmet ÖZKAYMAK 

<sup>1</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği  
Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE

<sup>1</sup>atabak@erbakan.edu.tr , <sup>2</sup>mozkaymak@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 10.06.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.08.2020)

**ÖZ:** Sanayi devriminden günümüze kadar geline süreçte tüketici talepleri sürekli artmış ve bu talebi karşılamak adına üreticiler yeni arayışlar içerisine girmiştir. Buna bağlı olarak üretimdeki devamlılığın sağlanması için ekipmanlara daha fazla değer verilmiş, ekipmanlardaki arıza ve duruş istenmez hale gelmiş ve bakım yöntemlerine duyulan ilgi artmıştır. Özellikle endüstride üretimin kalbi niteliğindeki elektrik motorlarında uygulanan bakım yöntemleri ilk zamanlardan beri sürekli geliştirilmiş ve en uygun bakım yöntemi her zaman aranmıştır. Çalışmamızda sanayideki elektrik motorları üzerinde yapılan bakımlar ilkelden gelişmişe doğru sınıflandırılmış ve irdelenmiştir. Bu bakım yöntemleri hem maddi açıdan hem de birtakım avantaj/dezavantajları açısından birbirleri ile karşılaştırılarak uygulamada teknik personel için en uygun bakım yönteminin seçimi hakkında bilgi verilmiştir. Ardından, durum bazlı bakım olarak da bilinen kestirimci bakım yönteminin en yaygın kullanılan teknikleri irdelenmiştir. Bunların yanında internet ve uzaktan erişim sistemlerinin kestirimci bakıma olan katkısı incelenmiş ve bakımın önemi her açıdan ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrik motorlarında bakım, Kestirimci bakım, Bakım yöntemlerinin karşılaştırılması, Uzaktan erişim

### The Investigation and Comparison of Maintenance Methods Applied In Electric Motors and The Effect Of Remote Access To Predictive Maintenance

**ABSTRACT:** In the period from the industrial revolution to the present day, consumer demands have continuously increased and manufacturers have been in search of new products to meet this demand. Therefore, more value was given to equipment to ensure continuity in production, fault and downtime in equipment became undesirable, and interest in maintenance methods increased. Especially in the industry, the maintenance methods applied in electric motors, which are the heart of production, have been continuously improved since the early days and the most appropriate maintenance method has always been sought. In our study, the maintenance performed on the electric motors in the industry was classified from primitive to advanced and examined. These maintenance methods were compared with each other both financially and in terms of a number of advantages/disadvantages, and information was given about the selection of the most appropriate maintenance method for technical personnel in practice. The most commonly used techniques of the predictive maintenance method, also known as condition-based maintenance, were discussed. In addition, the contribution of internet and remote access systems to predictive maintenance were examined and the importance of maintenance were demonstrated in every respect.

**Key Words:** Maintenance of electric motors, Predictive maintenance, Comparison of maintenance methods, Remote access

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik motorları endüstriyel tesislerin vazgeçilmez ekipmanlarıdır. TÜİK'in 2018 verilerine göre Türkiye'de elektrik enerjisinin %45.6'sı sanayide tüketilmektedir. Bunun yanında binalarda ve yapılarda tüketilen elektriğin yaklaşık %36'sı, sanayide tüketilen elektriğin ise yaklaşık %70'i elektrik motorları tarafından tüketilmektedir. Sektörel bazda değerlendirildiğinde ise bazı sektörlerdeki elektrik motorlarının elektrik tüketimindeki oranı %80'leri bulmaktadır (Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı,.) (TÜİK, 2019) ( Verimlilik Genel Müdürlüğü, 2015).

Dünya üzerinde çalışır durumdaki elektrik motorlarının sayısı bize günlük yaşantımızın hemen her noktasında bir elektrik motoru kullanıcısı olduğumuzu gösterir niteliktedir. Dünyada yaklaşık 2.23 milyar adet elektrik motoru vardır. Bu motorlar güçlerine göre kategorize edildiğinde; 750 W'a kadar olan motorlar küçük, 0.75-375 kW arasındaki motorlar orta, 375 kW üzerindeki motorlar büyük elektrik motorları olarak sayılmaktadır. Küçük güçteki elektrik motorlarının sayısı 2 milyara yakındır. Bunun yanında orta büyüklükteki motorların sayısı yaklaşık 230 milyon ve harcadığı enerji, elektrik motorlarında harcanan enerjinin %68'ini oluşturmaktadır. Yaklaşık 600 bin adet olan büyük elektrik motorlarının da elektrik tüketimi %23 seviyelerindedir (Waide & Brunner, 2011).

Üç fazlı alternatif akım asenkron motorlar sanayideki elektrik motorlarının yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır (Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı,.). Sanayide asenkron motorların bu kadar çok tercih edilmesinin nedenleri arasında ilk alım ve bakım maliyetlerinin düşük olması, bakımlarının az ve kolay olması, yapılarının dayanıklı olması, çalışma esnasında ark yapmaması, devir sayısı ayarının kolay yapılabilir olması ve yük altındayken devir sayılarının çok değişmemesi sayılabilir (TERZİOĞLU & SELEK, 2017) (Mergen & Zorlu, 2009).

Günlük yaşantıda ister evsel kullanım olsun ister sanayi ya da ticarethaneler olsun elektrik motorlarında meydana gelen arıza ve aksaklıklar hayat kalitesini ve üretimi negatif yönde etkilemektedir (Tabak, 2020). Mesela endüstriyel tesislerde elektrik motorlarının durması, tahrik ettiği ekipmanın çalışamaz hale gelmesine sebep olur ki, bu da üretim prosesinin durması anlamına gelir. Dünya üzerinde endüstriyel tesislerde arızalara bağlı olarak yaşanan plansız duruşların maliyeti 2 trilyon ABD dolarının üzerindedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise bu maliyet 700 milyar ABD dolarının üzerinde olduğu tahmin edilmektedir (Tabak, 2014).

Beklenmedik duruşların azaltılması sonucunda üretim verimliliklerinde yıllık %5-10'luk artış sağlanacağı düşünülmektedir. Çizelge 1'de farklı sektörler için plansız duruşların işletmeye bir saatlik maliyetleri verilmiştir (Tabak, 2014).

**Çizelge 1.** Farklı sektörlerdeki tesislerin saatlik duruş maliyetleri.

*Table 1. Hourly downtime costs of facilities in different sectors.*

600MW'lık bir Enerji Santralinde	> 40.000 USD.
Otomotiv Sektörü Boyahanede	> 100.000 USD
Çimento Sektöründe	> 500.000 USD
Petrokimya – Rafineri	>1.000.000 USD

Tesislerin saatlik duruş maliyetlerinin bu kadar yüksek olması, elektrik motorları ve tahrik ettiği ekipmanlar üzerindeki bakımın ne kadar gerekli olduğunu gözler önüne sermektedir.

Bizim çalışmamızda öncelikle elektrik motorları ve tahrik ettiği ekipmanlar üzerinde uygulanan bakım stratejileri ilkelden gelişmişe doğru sınıflandırılarak incelenmiş ve bu stratejiler birtakım avantaj/dezavantaj açılarından birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Uygulamada bu bakım stratejilerinin seçimi hakkında bilgi verilmiştir. Ardından kestirimci bakımın yaygın olarak kullanılan metotları incelenmiş, bu yöntemlerin çoğunlukla uygulandığı yerler ifade edilmiş ve uzaktan erişimin kestirimci bakıma olan katkısı anlatılmıştır.

## EKİPMAN BAKIMININ KISA TARİHİ (BRIEF HISTORY OF EQUIPMENT MAINTENANCE)

Sanayi devrimiyle birlikte yaygınlaşan üretim tesislerinde, patronların düşündüğü tek şey üretim yapıp para kazanmaktı. Fabrikalarda çalışanlar arasında “işletmeci” ya da “bakımcı” gibi bir ayırım yoktu. İşçiler sadece makinenin nasıl çalıştığını öğrenip işbaşı yapıyordu ve eğer arıza çıkarsa fabrikanın sahibi ya da o dönemde sadece büyük fabrikalarda istihdam edilen ve makinelerden anlayan teknik personel çağırılırdı (Thomas, 2007).

Bakıma gereken önemin verilmemesi durumu II. Dünya Savaşı'na kadar devam etti. Çünkü henüz makinenin plansız duruşlarından kaynaklanan üretim kaybı önemli değil, rekabet ortamı çok kızışmamış, ürün taleplerine yetişememe durumu yok ve kritik ekipman tabiri oluşmamıştı (Brown & Sondalini, 2015).

Ancak II. Dünya Savaşı'nın ardından başta savaştan yenik çıkan Almanya ve Japonya olmak üzere savaşa katılan tüm ülkeler arasında yeni bir rekabet ortamı başlamış ve ülkeler teknoloji üretme yarışına girmişlerdir. Bu zamandan itibaren artık patronlar üretim esnasında gerçekleşecek herhangi bir aksaklığa karşı tolerans gösteremez hale gelmişler ve “bozulana kadar çalıştırın” şeklinde tarif edilen reaktif bakım yönteminden belirli bir plana dayalı önleyici bakım yöntemine geçiş yapmışlardır (Brown & Sondalini, 2015).

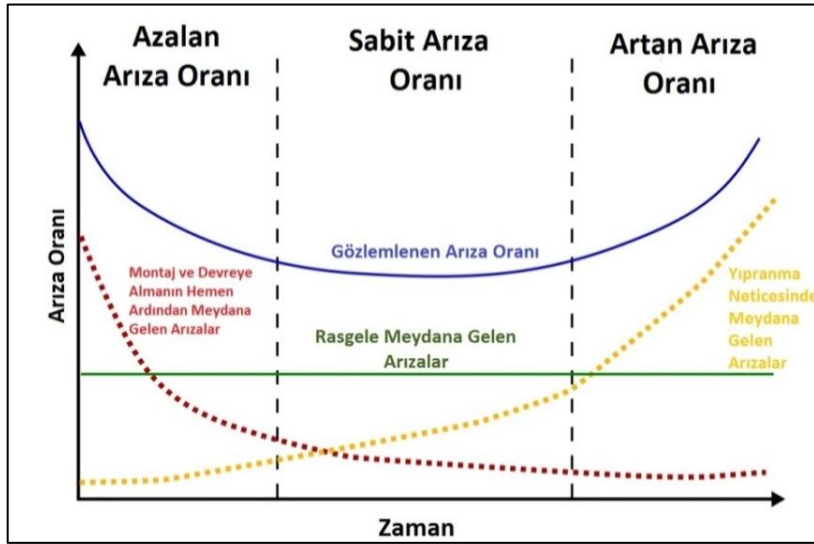
Teknoloji hızla ilerlemeye devam ederken yüksek kalite ve güvenilirlik gereksiniminin artışı ekipmanların daha karmaşık hale gelmesine neden olmuştur. Bu da önleyici bakım maliyetlerinde artışa neden olmuştur. Önleyici bakım yöntemleri endüstri kuruluşları için önemli bir gider haline gelmeye başlamasından dolayı daha sonraları kestirimci bakım olarak da adlandırılacak olan “durum bazlı bakım” (condition based maintenance (CBM)) yaklaşımı gibi daha verimli bakım yöntemleri ele alınmaya başlanmıştır (Martin, 1994). Bu nedenle teknolojinin gelişmesi ile birlikte kestirimci bakım yöntemleri artırılmış ve daha fazla ekipman arızası tespit edilmeye başlanmıştır.

Günümüzde ise birden fazla bakım stratejisini içeren bakım metodolojileri kullanılmaya başlanmıştır.

## ELEKTRİK MOTORLARINDA BAKIM YÖNTEMLERİ (MAINTENANCE METHODS IN ELECTRIC MOTORS)

En basit ifadesiyle bakım; ekipmanın en az tasarım ömrü kadar süre içerisinde arıza çıkarmadan verimli bir şekilde çalışması şeklinde açıklanabilir. Dikkat edilirse, bu ifadede motorun tasarım ömrü içerisinde oluşabilecek arızaların önüne geçilmesi vurgulanmıştır. Şekil 1'de elektrik motorlarında meydana gelen arıza karakteristiği grafiği verilmiştir (Wyrwas, Condra, & Hava, 2011). Şekilden de görüldüğü gibi elektrik motorlarında temel olarak üç farklı arıza karakteristiği bulunmaktadır.

“Montaj ve devreye almanın hemen ardından meydana gelen arızalar” olarak adlandırılan ve kırmızı renkle gösterilen birinci grafik eğrisi, ekipmanın ilk devreye alınmasının hemen ardından ortaya çıkması muhtemel arıza ihtimalini göstermektedir. Ekipmanlardaki bu arızaların temel nedenleri arasında; ekipmanın kötü dizayn edilmesi, montaj hatası/eksiği, birlikte çalışacağı diğer bileşenlerle uyumsuzluğu, kurulum ekibinin yeteri kadar bilgi ve tecrübeye sahip olmaması gibi nedenler sayılabilir. Bu arıza ihtimali başlarda çok yüksek olmasına rağmen zaman geçtikçe azalır (Klutke, Kiessler, & Wortman, 2003).



Şekil 1. Elektrik motorlarında meydana gelen arıza karakteristiği

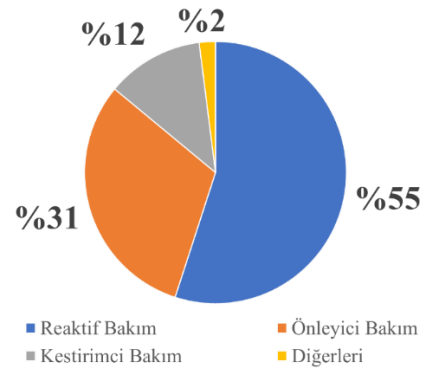
Figure 1. Fault characteristic of electric motors.

“Rastgele meydana gelen arızalar” olarak adlandırılan ve yeşil renk ile gösterilen çizgi sabit bir değer ile ifade edilmektedir. Ekipmanın her an çıkarması muhtemel arızaları temsil ettiği için ekipmandan ekipmana değer olarak farklılık gösterse de her zaman sabit kalmaktadır. Bu arızaların meydana gelmesinin birçok nedeni olabilir; fakat arıza oluşmasının en büyük nedenleri arasında zayıf işletme ve bakım faaliyetleri sayılabilir. “Yıpranma neticesinde meydana gelen arızalar” olarak adlandırılan arızalar ise ekipmanın çalışma süresi uzadıkça artan oranda karşılaşılan arızalardır. Ekipmanların kullanım ömürleri azaldıkça bu arızalar artar. Grafikteki 3 farklı arıza eğrisi birleştirildiğinde ortaya “U” eğrisi şeklinde yeni bir grafik çıkar ve bu grafiğe “gözlemlenen arıza oranı” denir. Gözlemlenen arıza oranı bir ekipmanın zamana karşı arızalanma ihtimalini göstermektedir ve azalan arıza oranı, sabit arıza oranı ile artan arıza oranı şeklinde üç kısımdan oluşmaktadır.

Grafiğe bakıldığında arızaların genellikle ekipmanların ilk kurulumunun ya da bakımının ardından ve ekipmanın kullanım süresi uzadıkça ortaya çıktığı görülmektedir. Devreye alma ve bakım sonrası arızalar atlatıldıktan sonra belirli bir süre arıza ihtimali düşüktür. Ekipmanın yıpranması ve metal yorgunluğu sebebiyle ilerleyen süreçte ekipmanın arızalanma ihtimali yeniden yükselir. Düşük olan sabit haldeki arıza çıkarma oranının süresi çeşitli bakım yöntemleriyle ne kadar uzatılırsa ekipman o kadar uzun süre ve yüksek verimlilikte çalışır. Diğer bir deyişle ekipmanlardaki önleyici ve kestirimci bakım teknolojilerinin uygulanmasındaki temel maksat “U” eğrisinin orta kısmını oluşturan “sabit arıza oranı” kısmının süresini artırarak ekipman ömrünü uzatmaktır (Wyrwas et al., 2011) (Klutke et al., 2003).

Son 40-50 yılda elektrik motorları ve bileşenlerinde meydana gelen arızaların önüne geçmek, kullanım sürelerini artırmak ve verim kayıplarını azaltmak için birtakım bakım yöntemleri bulunmuş ve geliştirilmiştir. Bunlar reaktif bakımdan farklı olarak; önleyici bakım, kestirimci bakım ve güvenilirlik merkezli bakımdır.

Amerika Birleşik Devletleri’nde yapılan araştırmaya göre yaygın olarak kullanılan bakım yöntemi reaktif bakımdır. Uygulamaya göre tüm bakım yöntemlerinin dağılımı Şekil 2’deki grafikte verilmiştir (G. P. Sullivan, Pugh, Melendez, & Hunt, 2010).



Şekil 2. Bakım yöntemlerinin uygulanma oranları  
Figure 2. Application rates of maintenance methods

### Ekipmanların Kritiklik Durumuna Göre Sınıflandırılması (Classification of Equipments According to Critical Status)

Fabrikalardaki ekipmanlar kullanım yerleri, kullanım amaçları ve arıza esnasında üretime verdiği zararlar açısından fabrikada farklı öneme sahiptirler. Sahip oldukları önem derecesinde sınıflandırılarak uygun bakım yöntemi seçilmektedir. Bu kapsamda ekipmanlar kritik, temel ve genel amaçlı olmak üzere üçe ayrılır. Bu ayrımında kritik ekipmana kestirimci bakım, temel ekipmanlara önleyici bakım, genel amaçlı ekipmanlara da reaktif bakım uygulanması önerilmektedir (Scheffer & Girdhar, 2004).

Bir ekipmanın kritik ekipman sayılabilmesi için aşağıdaki şartları taşıması gerekir (Scheffer & Girdhar, 2004) (Börjesson & Svensson, 2011) (Onawoga & Akinyemi, 2010):

- Ekipman arızası tesis güvenliğini tehlikeye atıyorsa,
- Ekipman arızası üretimi kısıtlıyorsa,
- Ekipmanın gücü büyük, başlangıç yatırım ve onarım maliyeti yüksek, onarım süresi uzunsa,
- Arızaları giderildiğinde yüksek enerji tasarrufu sağlayıp üretimi iyileştiriyorsa.

Bir ekipmanın temel ekipman sayılabilmesi için aşağıdaki şartları taşıması gerekir (Scheffer & Girdhar, 2004) (Börjesson & Svensson, 2011):

- Ekipman arızası tesis güvenliğini tehlikeye atıyorsa,
- Ekipman arızası üretimin bir kısmını engelliyorsa,
- Yüksek güç ve yüksek hızda çalışan ekipmanlar olmasına rağmen sürekli olarak çalıştırılmıyorsa,
- Yapıları gereği zamana dayalı bakıma ihtiyaç duyuluyorsa,
- Orta düzeyde masrafa, bakım uzmanlığına ve tamir süresine sahipse.

Bir ekipmanın genel amaçlı ekipman sayılması için aşağıdaki şartları taşıması gerekir (Scheffer & Girdhar, 2004) (Börjesson & Svensson, 2011):

- Oluşan arıza tesis güvenliğini etkilemiyorsa,
- Tesiste üretim için kritik konumda değilse,
- Ekipman sadece ihtiyaç duyulduğunda çalıştırılıyorsa ya da bir yedeği mevcutsa,
- Ekipmanlar düşük ila orta derecede maliyete, bakım uzmanlığına ve bakım süresine sahipse,
- Ekipmanın arızası diğer ekipmanlara zarar vermiyor ya da vereceği zarar asgari düzeyde ise.

Elektrik motorlarında bakım yöntemleri ilkelden gelişmişe doğru aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

## REAKTİF BAKIM (REACTIVE MAINTENANCE)

Reaktif bakım, bakım türlerinin içerisinde ilk kullanılmaya başlanan ve uygulaması en kolay olan bakımdır. Reaktif bakımda ekipmanların kullanımı "bozulana kadar çalıştırın" esasına dayanır. Bu bakımda ekipman bozulana kadar çalıştırılır ve bozulduktan sonra teknik ekip tarafından tamir edilir. Tamirin mümkün olmadığı durumlarda öncelikle ekipmanın yetkili servisinden yardım istenir yine sonuç alınmazsa ekipmanı değiştirme yoluna gidilir. Reaktif bakım her ne kadar en ilkel bakım yöntemi olsa da birtakım avantajlara sahiptir. Reaktif bakımın avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (Ahmad & Kamaruddin, 2012) (Piotrowski, n.d.) (NASA, 2000) (G. P. Sullivan et al., 2010).

### Avantajları (Advantages):

- Reaktif bakım uygulanan ekipmanlarda herhangi bir yatırıma ihtiyaç duyulmaz.
- Teknik personelin çok sayıda ve kalifiye olmasına gerek yoktur. Bu da işçi maliyetlerini düşürür.
- Diğer bakım programlarındaki gibi plan/program yapmaya ihtiyaç duyulmaz.

### Dezavantajları (Disadvantages):

- Ekipmanların plansız duruşlarından dolayı ürün maliyetleri artar.
- Ekipmanların tamir ya da değiştirme maliyeti yüksektir ve bunu yapan teknik personele ek mesai ücreti ödenir.
- Ekipmanların bozulması, birlikte çalıştığı diğer ekipmanlara da zarar verir.
- Ekipmanın kullanım süresi, üretici firmalarının vermiş olduğu kullanım ömrünün altında kalır.
- Teknik personelin çalışma verimliliği bir hayli düşüktür.
- Ekipmanın tamirinde kullanılacak olan yedek parça/malzeme temini için geçen sürede ekipmanın yapmakta olduğu iş aksar.
- Bozulan ekipman tamir edilirken dikkatsiz ve hızlı iş yapılması sonucunda bakım personeli risk altında çalışır.
- Ekipman arızalarının zamanı bilinmediği için siparişin müşteriye gitme süresi uzayabilir ve firmanın piyasadaki imajı olumsuz yönde etkilenebilir.
- Bakımı yapılmayan ekipmanların verimi düşeceğinden dolayı daha fazla enerji tüketimi olur.

## ÖNLEYİCİ BAKIM (PREVENTIVE MAINTENANCE)

Ekipmanlarda olası arızaları önlemek amacıyla zamana ya da kullanım alışkanlığına bağlı olarak uygulanan bakıma önleyici bakım denir. Bu bakım yönteminde genelde takvime bağlı kalınır ve belirli periyotlarla yağ değişimi, filtre değişimi/temizliği gibi bakım uygulamaları tekrarlanır. Böylece ekipman üreticileri tarafından belirtilen kullanım ömrü yakalanmış, hatta geçilmiş olur.

Örneğin üç fazlı asenkron motorun tahrik ettiği bir pompaya önleyici bakım çerçevesinde yağ bakımı yapıldığı düşünülürse bu sistemin kapalı bir sistem olmasından dolayı çalışma sıcaklığına bağlı olarak 2-3 yılda bir yağ bakımı yapılması önerilmektedir (Kirazlılar, 2007).

Amerika'da yapılan çalışmalara göre önleyici bakım, reaktif bakıma göre ortalama %12-18 daha verimlidir. Önleyici bakımın avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (Ahmad & Kamaruddin, 2012) (G. P. Sullivan et al., 2010) (NASA, 2000) (G. Sullivan, Pugh, Melendez, & Hunt, 2002).

### Avantajları (Advantages) :

- Yüksek maliyetli proseslerde bakım giderleri azalır.
- Ekipmanın çalışma ömrü uzar.
- Ekipmanın çalışma verimi artacağından dolayı enerji tasarrufu sağlanır.
- Ekipman ya da proses arızaları azalır.
- Reaktif bakıma göre yaklaşık %12-%18 arasında daha az bakım gideri olur.

### Dezavantajları (Disadvantages) :

- Ciddi arızaların meydana gelme ihtimali ortadan kalkmaz.
- Diğer bakım yöntemlerine göre daha yoğun iş gücü gerektirir.

- Ekipmanın bakıma ihtiyacı olmasa bile takvime uygun olarak yapılan bakım gereksiz uğraşlara yol açar.
- Gereksiz yere uygulanan bakım nedeniyle ekipmanda rastgele arıza çıkma ihtimali oluşur.

### **KESTİRİMCİ BAKIM (PREDICTIVE MAINTENANCE)**

Kestirimci bakım, ekipmanların durumlarının izlenerek arıza çıkarma ihtimallerinin değerlendirilmesi ve arıza çıkarmadan önce önlem alınması olarak tarif edilebilir. Diğer bir deyişle ekipman takip edilir, izlenir ve ileride hangi arızaları çıkaracağı tahmin edilir. Kestirimci bakımın önleyici bakımdan farkı zamana değil ekipmanın durumuna dayalı bir bakım olmasıdır. Kestirimci bakım en gelişmiş bakım yöntemidir ve birçok sektörde uygulanmaya başlansa da özellikle elektrik santralleri, iletişim sistemleri ve acil servisler gibi arızanın büyük zararlar vereceği sektörlerde daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Selcuk, 2017).

Bir kestirimci bakımda veri toplama, veri işleme ve bakıma karar verme gibi üç temel adım vardır. Bunun sonucunda arızanın kök nedenine inilerek o arızaya neyin neden olduğu, alınan sinyalin birden fazla arızayı işaret edip etmediği, oluşacak arızanın ne kadar zaman sonra olacağı gibi bilgileri derleyerek teşhis ve öngörü oluşturur (Jardine, Lin, & Banjevic, 2006).

Kestirimci bakımda oluşacak arızayı önlemenin yanı sıra ekipmanın verimli çalışması, ürünlerin kalitesinin artırılması, güvenilirlik, sürdürülebilirlik ve enerji maliyetlerinde azalma amaçlanmaktadır (Lin & Tseng, 2005).

Kestirimci bakım ile ilgili yine fabrikadaki asenkron motor tarafından tahrik edilen pompa örneği verilecek olursa pompa yağının 2 yılda bir değiştirilmesi önleyici bakım olarak kabul edilirken yağın gerekli takibi yapılarak değişmesine karar verme işlemi kestirimci bakım olarak kabul edilir. Yani yağ değişiminin kararına yağ analizi yaparak karar verilmelidir, ihtiyaç varsa değiştirilmelidir. Yağ analizi yapılmaksızın zamana bağlı bakım uygulandığı takdirde pompanın yağı gerektiğinden erken ya da geç değiştiriliyor olabilir. Yağın gereğinden erken değiştirilmesi boşuna yağ ve bakım masrafına, bakım nedeniyle üretimin kesilmesine, planlama için gereksiz uğraşa ve çevre kirliliğine yol açarken; geç değiştirilmesi de motorun tamamen arızalanmasına, plansız duruşlara, üretimin aniden kesilmesine ve ekipman ve ekipmana bağlı diğer bileşenlerde gerçekleşen daha büyük arızalara neden olabilir. Kestirimci bakım ile ekipmanlara gereğinden önce ya da sonra bakım yapılmadığı için bu bakım, "tam zamanında bakım" olarak da adlandırılır (Lee & Wang, 1999).

Makine arızalarının %99'u önceden belirti göstermektedir (Geitner & Bloch, 2012). Eğer kestirimci bakım doğru uygulanırsa ciddi ekipman arızalarının önüne geçilebilir ya da en aza indirilebilir. Kestirimci bakım ile ekipman üzerinde fazla ya da eksik bakım yapılmasından kaçınılır. Kestirimci bakımın avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (G. P. Sullivan et al., 2010) (Ahmad & Kamaruddin, 2012) (NASA, 2000) (G. Sullivan et al., 2002).

#### **Avantajları (Advantages):**

- Bileşenin ömrü önemli ölçüde artar.
- Ekipman arızaları azalır.
- Malzeme giderleri ve işletme maliyetleri azalır.
- Üretimin kalitesi artar.
- Bozulan ekipmanın tamirinde acele edilmeyeceğinden dolayı işçi ve çevre güvenliğinin artması sağlanır.
- Personelin iş gücü veriminin artması sağlanır.
- Önleyici bakıma göre yaklaşık %8-%12 arasında daha az bakım gideri olur.
- Enerji tasarrufu sağlanır.

#### **Dezavantajları (Disadvantages) :**

- Durumu izlenen ekipmanın maliyeti artar.
- Teknik personelin eğitim maliyeti artar.
- Fabrika yönetimi tasarruf potansiyelini görmekte zorlanır.

Kestirimci bakımın uygulanmasında gerekli cihaz ve eğitim maliyetinin yüksek olması, bu bakım programının uygulanmasının önündeki en büyük engellerden biridir. Bu bakım stratejisinin uygulanabilmesi için sadece gerekli donanımın satın alınması yetmez, fabrika yönetiminin desteği ve bakım ekibinin kestirimci bakım felsefesine inanması ve içselleştirmesi gerekir. Aşağıda kestirimci bakımın üstünlüklerini gösteren birtakım veriler sunulmuştur (G. Sullivan et al., 2002):

- Yatırım geri dönüş oranı: 10 kat
- Bakım maliyetlerindeki düşüş oranı: %25-30
- Beklenmedik duruşların ortadan kaldırılma oranı: %70-75
- Arıza süresinin azalma oranı: %35-45
- Üretimdeki artış oranı: %20-25

### **GÜVENİLİRLİK MERKEZLİ BAKIM (RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE)**

Güvenilirlik merkezli bakım herhangi bir ekipmanın işletme koşullarında ve tasarım ömrü içerisinde bakım gereksinimlerinin belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Bir tesisin güvenli ve verimli şekilde işletilmesinde ekipmanların hepsi aynı öneme sahip olmadıkları için bunlara uygulanacak bakım yöntemleri de farklılık göstermektedir. GMB ekipmanlara reaktif, önleyici ya da kestirimci bakımdan hangilerinin uygulanması gerektiğini belirleyen bakım metodolojisidir.

Ekipmanlar üzerinde farklı bakım yöntemlerine ihtiyaç duyulmasının nedenleri arasında her ekipmanın tesis için farklı öneme, işleve, özelliğe ve farklı arıza çıkarma eğilimine sahip olması gibi etmenler vardır.

GMB metodolojisinden ilk olarak 1960'ların sonu ile 1970'lerin başında hava yolu endüstrisinde çalışma yapan Nowlan ve Heap'ın yayınında bahsedilmiştir. Bu çalışmada ekipmanlar uzun süre takip edilmiş ve ekipmanın yaşı ile arıza oranlarının arasında güçlü bir ilişki olmadığı, zamana bağlı bakımın ekipmanların çoğu için öncelikli yöntem olduğu düşüncesinin hatalı olduğu ortaya konmuştur (Nowlan & Heap, 1978). GMB'nin avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (G. P. Sullivan et al., 2010) (Ahmad & Kamaruddin, 2012) (NASA, 2000) (G. Sullivan et al., 2002).

#### **Avantajları (Advantages):**

- Verimi en yüksek olan bakım programıdır.
- Gereksiz yere yapılacak olan bakım ve revizyonların ortadan kaldırılmasıyla maddi tasarruf sağlanır.
- Revizyon ve bakım sıklıkları en aza indirilir.
- Ekipmanların aniden arızalanma olasılıkları azalır.
- Kritik ekipmanlar için bakım aktivitelerine odaklanılır.
- Ekipman güvenliği artırılır.
- Arıza nedenlerinin köküne inilir.

#### **Dezavantajları (Disadvantages):**

- Yatırım ve bakım için gerekli ekipman maliyetleri ile personel eğitimlerinin masrafı yüksektir.
- Fabrika yöneticilerinin tasarruf potansiyelini görmesi zordur.

GMB'yi oluşturan bakım yöntemlerinin oranları aşağıdaki gibidir:

- <%10 Reaktif Bakım
- %25 ile %35 Önleyici Bakım
- %45 ile %55 Kestirimci Bakım.

Yukarıdaki dağılımdan da görüleceği gibi GMB'de en fazla tercih edilen bakım yöntemi kestirimci bakımdır. Burada asıl amaç, ekipmanlara en uygun bakım yöntemini en düşük maliyetle uygulayarak arızaların önüne geçebilmek ve prosesin sürekliliğini sağlamaktır. Kestirimci bakımın tüm ekipmanlara



uygulanması maddi açıdan fazla yük sağlayacağından dolayı diğer bakım yöntemlerinden de faydalanılmaktadır. Her bir arıza ve ekipman için optimum bakım yöntemi seçilerek tesisin güvenliği maksimum seviyeye çıkarılabilir. Çizelge 2’de GMB içerisindeki bakım uygulamaları görülmektedir (NASA, 2000).

**Çizelge 2. Güvenilirlik merkezli bakım uygulamaları**

*Table 2. Reliability-centered maintenance applications.*

<b>Güvenilirlik Merkezli Bakım Hiyerarşisi</b>		
<b>Reaktif Bakım Uygulaması</b>	<b>Önleyici Bakım Uygulaması</b>	<b>Kestirimci Bakım Uygulaması</b>
Küçük parça ve ekipmanlar	Aşınmaya maruz kalan ekipmanlar	Rastgele arıza çıkaran ekipmanlar
Kritik olmayan ekipmanlar	Sarf ekipmanlar	Kritik ekipmanlar
Bozulma ihtimali çok düşük olan ekipmanlar	Arızaları bilinen ekipmanlar	Aşınmaya maruz kalmayan ekipmanlar
Yedekli ekipmanlar	Üretici önerileri bu bakım yöntemi doğrultusunda olan ekipmanlar	Yanlış önleyici bakım uygulanmasıyla arıza oluşması muhtemel durumlar

#### **KESTİRİMCİ BAKIM YÖNTEMLERİ (PREDICTIVE MAINTENANCE METHODS)**

Teknolojinin gelişmesi ve bakım konusundaki ihtiyaçların artması, farklı kestirimci bakım yöntemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Çalışmada, endüstride yaygın olarak kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Bunlar; yağ ve parçacık testi, titreşim (vibrasyon) testi, termal kamera ile ısı görüntüleme testi, ultrasonik test, motor akımı imza analizi, model bazlı arıza analizi ve performans izleme yöntemleridir.

#### **YAĞ VE PARÇACIK TESTİ (OIL AND PARTICLE TEST)**

Yaygın olarak kullanılan kestirimci bakım yöntemlerinden biri yağ ve parçacık testidir. Yağ ve parçacık testi ile ulaşılmak istenen iki temel hedef vardır. Bunlardan ilki ekipmanın yağında biriken kirleticilerin tespit edilmesi, ikincisi ise yağ içerisinde aşınmalardan kaynaklı oluşan parçacıkların bulunmasıdır. Yağ ve parçacık analizi amaca bağlı olarak farklı şekillerde yapılmaktadır. Bunlardan Karl Fischer Water test; yağın içerisindeki su miktarının tespitinde kullanılır, ICP spektroskopisinde yağ içerisindeki metal parçacıkların yoğunluğu belirlenir, partikül sayımı testi ile yağdaki parçacıkların miktarı ve boyutu hakkında bilgi edinilir, viskozite testi ile yağın viskozitesi ölçülür. Bu sayılanların haricinde başka yağ ve parçacık test yöntemleri de mevcuttur. İçerisinde yağın kullanıldığı neredeyse tüm ekipmanlar için yağ ve parçacık testleri uygulanabilir (Wakiru, Pintelon, Muchiri, & Chemweno, 2019) (Levitt, 2011).

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde de yağ analizi önem arz etmektedir. Çünkü dünyadaki toplam kimyasal üretimin %8.5’ini endüstriyel yağlamada kullanılan yağlar oluşturmaktadır. Yağ analizi sayesinde gereksiz yağ değişimlerinin önüne geçilerek toprak ve su kirliliği engellenmiş olur. Yağ ve parçacık testinin uygulama alanları arasında türbinler, dişli kutular, servo valfler, hidrolik sistemler, pompalar, elektro-hidrolik sistemler ve rulman yatakları vardır (Gresham & Totten, 2009). Şekil 3’te yağ ve parçacık testinde kullanılan ekipmanlar görülmektedir.



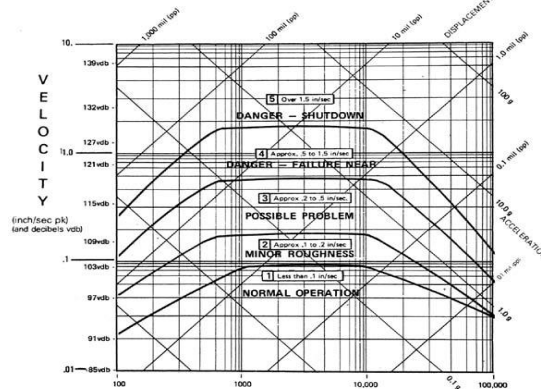
Şekil 3. RM100L endüstriyel vizkozimetre ve BT-9300ST lazer parçacık boyutu analiz cihazı  
Figure 3. RM100L industrial viscometer and BT-9300ST laser particle size analyser.

### TİTREŞİM ANALİZİ (VIBRATION ANALYSIS)

Titreşim analizi kestirimci bakım yöntemlerinin içerisinde en yaygın olarak kullanılan bakım yöntemidir. Ekipmanlar çalışma esnasında arızalı olmasa dahi belirli titreşim seviyesine sahiptirler. Ancak belirli bir arızası olan ekipmanlar tarafından normal titreşim seviyelerinin üzerinde bir titreşim sergilenir. Bu gerçekleşen anormal titreşim miktarı ekipman arızalarının tespit edilmesinde teknik personele yardımcı olur (Bauer, Geropp, & Seeliger, 1997).

Titreşim analizinin en başarılı uygulamaları döner ve pistonlu ekipmanlar üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu ekipmanlar üzerinde ya belirli aralıklarla ya da sürekli olarak titreşim analizi uygulanır (Goyal & Pabla, 2015). Titreşim analizi uygulanırken ölçümlerin ekipman üzerindeki hep aynı noktalardan alınması önerilmektedir. Böylece ölçümler kendi aralarında karşılaştırılıp ekipmanın durumu değerlendirilebilir. Uygulamada alınan her ölçümün direk yorumlanmasından ziyade genel bir titreşim seviyesi belirlenir ve bu seviyenin üzerindeki titreşime sahip ekipmanların titreşim grafikleri yorumlanır. Bu sonuçları yorumlamak için uzman personele ihtiyaç vardır ve iyi bir yorumlama için yapay sinir ağları gibi sınıflandırma ve tahmin yöntemlerinden yardım alınır (UGECHI, OGBONNAYA, LILLY, OGAJI, & PROBERT, 2009).

Ekipmanların arızalarını yorumlayabilmek için Şekil 4'teki gibi bir uyarı spektrumunun hazırlanması gerekir. Ekipmanın arıza durumu değerlendirilirken titreşim bu grafiklerde belirtilen üst sınırları aştığı zaman kesinlikle arıza çıkaracaktır ya da grafikte belirlenen değerler arasında ise kesinlikle verimli ve sorunsuz şekilde çalışacaktır yorumunu yapmak mümkün değildir. Diğer bir deyişle arızanın olup olmayacağı ile ilgili kesinlikten söz edilemez. Ancak her tesisin titreşim artışlarında müdahalede bulunabilmesi için kendi üst sınırını belirlemesi gerekmektedir (Tabak, 2014).



Şekil 4. Titreşim uyarı spektrumu  
Figure 4. Vibration warning spectrum

Sanayide titreşim ölçümleri için anlık ölçümler alan portatif ölçüm cihazları ve sürekli ölçüm alan yerleşik cihazlar kullanılmaktadır. Sürekli ölçüm alan yerleşik cihazlar verileri anlık kaydedip teknik personele iletirler. Fabrikalardaki idare kendi mali gücüne ve ekipmanların kritikliğine göre hangi

yöntemle ölçüm alacaklarına kendileri karar verir. Şekil 5'te hem belirli aralıklarla ölçüm almak için tasarlanan portatif cihaz hem de sürekli ölçüm alan yerleşik cihaz görülmektedir.



**Şekil 5.** SKF portatif titreşim cihazı ve GE Bently Nevada 3500 Encore serisi sürekli ölçüm cihazı

*Figure 5. SKF portable vibration equipment and GE Bently Nevada 3500 Encore series continuous measuring equipment*

Sürekli ölçüm alan titreşim cihazlarının bazıları, titreşim değeri belirli bir sınır değerinin üzerine çıktığında ekipmanı devreden çıkarma özelliğine sahiptir. Titreşim analizi ile tespit edilen başlıca arıza çeşitleri aşağıda verilmiştir (Scheffer & Girdhar, 2004):

- Dengesizlik,
- Merkezi kaymış rotorlar,
- Kayma,
- Rezonans sorunları,
- Mekanik gevşeklik/zayıflık,
- Rulman problemleri,
- Rulman yatağı problemleri,
- Akış kaynaklı titreşim problemleri,
- Dişli sorunları,
- Kayış tahrikli sorunlar.

### TERMAL KAMERA İLE ISIL GÖRÜNTÜLEME TESTİ (THERMAL IMAGING TEST WITH THERMAL CAMERA)

Farklı amaçlar doğrultusunda yaygın olarak kullanılan termal kameraların uygulama alanlarından biri de kestirimci bakımdır. İnsan gözünün görebildiği dalga boyu 400 nm-700 nm aralığındadır. Elektromanyetik spektrumda dalga boyu açısından görünür ışığın hemen üzerinde yer alan kızılötesi ışıklardan yararlanarak ısı görüntüleme işlemi yapan termal kameralar, ekipmanların arızalarının tespit edilmesine yardımcı olur. Sürtünen parçalarda, gevşek yapılmış elektrik bağlantılarında ya da arızalı elektrik motorlarında çalışma esnasında ısı ve sıcaklık artışı meydana gelir. Termal kameralar içerisindeki sensörler vasıtasıyla bu sıcaklık değerleri tespit edilir ve arıza noktası belirlenerek arızanın boyutu tahmin edilir (Huda & Taib, 2013). Çizelge 3'te termal kamera yardımı ile elektriksel ve mekanik arızaların tespit edildiği bölgeler gösterilmiştir (Jadin & Taib, 2012).

**Çizelge 3.** Termal kamera ile elektriksel ve mekanik arızaların tespit edildiği bölgeler

*Table 3. Regions where electrical and mechanical faults are detected by thermal camera.*

<b>Elektriksel Arızalar</b>	<b>Mekanik Arızalar</b>
İletim hatları	Buhar Sistemleri
Dağıtım hatları/sistemleri	Isıtıcılar ve fırınlar
Trafo Odaları	Akışkanlar
Jeneratör Tesisleri	Motorlar ve döner ekipmanlar
Fabrikalardaki Elektrik Sistemleri	

Şekil 6'da noktasal olarak ölçüm alabilen termal kamera ile yüzey sıcaklığını görüntüleyen termal kamera görülmektedir.



Şekil 6. Nokta ve yüzey sıcaklığını ölçebilen termal kameralar  
Figure 6. Thermal cameras that can measure point and surface temperature

#### ULTRASONİK TEST (ULTRASONIC TEST)

Ultrasonik test, kestirimci bakım yöntemlerinin içerisinde uygulanması en kolay olan test olup bu testte kullanılan cihazın kullanımı ile ilgili teknik personelin herhangi bir eğitim almasına gerek yoktur (Tabak, 2014).

İnsan kulağı 20 Hz ile 20 kHz arasındaki frekanslara sahip sesleri duyabilir. 20 kHz-100 kHz frekans aralığındaki seslere ultrasonik ses denir. Döner ekipmanlar ve akışkan taşıyan sistemler tarafından belirli miktarlarda ultrasonik ses dalgaları yayılır. Eğer ekipmanlarda arıza ya da kayıp/kaçak şeklinde olumsuz bir durum varsa bu ses dalgalarında artış gözlenir. Bu ses farkı ultrasonik dedektörler vasıtasıyla tespit edilerek arızanın yeri, cinsi, boyutu tahmin edilir. Ultrasonik test cihazlarının dezavantajlarından biri ses dalgalarının hava içerisinde yayılarak ilerlemesinden dolayı termal kameralar gibi uzak mesafelerden arıza tespitini gerçekleştirememeleridir. Mesafe uzadıkça algılanan ses azalır ve uzak mesafelerden alınan ölçümlerde arıza tespit edilemez (Buckley, 2007). Şekil 7’de tipik bir ultrasonik test cihazı ile parabolik tabaka yardımıyla ölçüm yapan ultrasonik test cihazı görülmektedir.



Şekil 7. Tipik ultrasonik test cihazı ve parabolik tabaka yardımıyla ölçüm yapan ultrasonik test cihazı  
Figure 7. Typical ultrasonic test equipment and ultrasonic test equipment measuring with the help of parabolic layer

Ultrasonik ses detektörü vasıtasıyla kayıp/arıza noktalarının tespit edildiği bölgeler Çizelge 4’te verilmiştir (G. P. Sullivan et al., 2010) (Scheffer & Girdhar, 2004).

#### Çizelge 4. Ultrasonik test cihazı vasıtasıyla tespit edilen başlıca kayıp/arıza noktaları.

Table 4. Loss/fault points detected by ultrasonic test equipment

Elektriksel Uygulamalar	Mekanik Uygulamalar	Basınç ve Vakum Kaynaklı Sızıntılar
Ark oluşumu/elektrik deşarjları	Mil yatakları	Basınçlı hava
Kesiciler/Anahtarlar	Motorlar	Oksijen, Hidrojen
Transformatörler	Kompresörler	Buhar Kapanları
İzolatörler	Pompalar, Fanlar	Isı deęiřtiriciler
Bağlantı kutuları	Yaęlama eksiklięi	Kazanlar, Tanklar
Sigortalar	Diřliler ve dişli kutusu	Boru hatları, Vanalar

## MOTOR AKIMI İMZA ANALİZİ (MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS)

Ölçüm için fiziksel erişimin ihtiyaç duyulmadığı kestirimci bakım yöntemlerinden biri de motor akımı imza analizi (MAİA) yöntemidir. Motorun akım sinyalinden yola çıkarak arıza tespiti yapabilen MAİA yöntemi, ulaşılması güç olan ekipmanların arızalarını tespit etmede kolaylık sağlamaktadır (S. Singh, Kumar, & Kumar, 2014). MAİA yönteminde arızalar, ölçüm esnasında motorun durdurulmasına ihtiyaç duyulmadan motorun akım sinyalinin frekans spektrumundan her bir frekans bileşeninin pik değerleri incelenerek tespit edilir (Barnish, Muller, & Kasten, 1997).

MAİA'da arızaların tespit edilebilmesi için akım imza spektrumlarına ihtiyaç duyulması, bu yöntemi diğer kestirimci bakım yöntemlerinden biraz daha karmaşık hale getirmektedir. Ayrıca şebeke gerilimlerinde oluşan rastgele gürültüler de akım sinyalinin yorumlanmasını zorlaştırabilir. Şekil 8'de MAİA yöntemini kullanan kestirimci bakım cihazları görülmektedir.



Şekil 8. Iris Power kestirimci bakım cihazı ve Empath portatif kestirimci bakım cihazı

*Figure 8. Iris Power predictive maintenance device and Empath portable predictive maintenance device*

MAİA yönteminde arızaların elektrik motorlarının elektrik akım bilgisinden yola çıkılarak tespit edilmesine rağmen sadece elektriksel arızalar değil mekanik arızalar da bulunur. MAİA ile tesislerdeki fan, pompa, kompresör, pres makinesi ve konveyörler üzerinde çeşitli elektriksel veya mekanik arızaların tespiti mümkündür. MAİA yöntemi ile tespit edilen arıza çeşitleri aşağıda verilmiştir (Mehala & Dahiya, 2007):

- Stator arızaları,
- Rotor arızaları,
- Sargı gevşekliği,
- Kısa devre,
- Dişli aşınması,
- Balanssızlık,
- Eksenel kaçıklık,
- Aktarma elemanı,
- Rulman aşınmaları.

## MODEL BAZLI ARIZA ANALİZİ (MODEL BASED FAULT ANALYSIS)

Model bazlı arıza analiz (MBAA) yöntemi diğer kestirimci bakım yöntemlerinin birtakım dezavantajlarını yok etmek üzere geliştirilen bir kestirimci bakım yöntemidir. Çalışma prensibine bakıldığında üç fazlı bir sistemin modeli ile bu sistemin ölçülen değerleri karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonrasında beklenmedik bir farklılık görülürse arıza oluşmaya başlamış demektir. MBAA cihazı ilk etapta sistemden bir süre gerçek zamanlı veri alır ve bu veriyi işleyerek öğrenme sürecini gerçekleştirir. Model parametrelerinin elde edilebilmesi için birtakım sistem tanıma algoritmaları vasıtası ile bu veriler işlenir. Sistem parametrelerinde gerçekleşen değişimler oluşan arızayı bildirir (Duyar, 2009). Şekil 9'da Artesis AMT portatif kestirimci bakım cihazı ve Artesis MCM sürekli ölçüm alan kestirimci bakım cihazı görülmektedir.



**Şekil 9.** Artesis AMT portatif kestirimci bakım cihazı ve Artesis MCM sürekli ölçüm kestirimci bakım cihazı

*Figure 9.* Artesis AMT portable predictive maintenance device and Artesis MCM continuous measurement predictive maintenance device

MBAA yöntemi ile tespit edilen arıza çeşitleri aşağıda verilmiştir (Duyar, Önel, & Özdemir, 2016) :

- Gevşek zemin ve komponentler,
- Balanssızlık ve eksenel kaçıklık,
- Aktarma elemanları ve sürülen ekipman arızaları,
- Rulman arızaları,
- Rotor arızaları,
- Stator ve izolasyon arızaları,
- Akım ve gerilim dengesizliği,
- Dahili ve harici elektriksel arızalar.

#### PERFORMANS İZLEME (PERFORMANCE MONITORING)

Prosesin sıcaklığı, nemi, basıncı, verimliliği ya da motorların elektriksel ölçüm verileri sistemin durumu hakkında bilgi vermektedir. Bu parametrelerdeki değişiklik, üretim hızındaki azalma ya da ürün kalitesindeki düşüş bize negatif yönlü bir geri bildirim sağlar. Böylece performansı izlenen sistem ile ilgili yorum yapabiliriz. Performans izleme yönteminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, anormal ölçüm değerlerinin arızayı işaret etme garantisinin olmamasıdır (Selcuk, 2017).

#### İNTERNET VE UZAKTAN ERİŞİMİN KESTİRİMCİ BAKIMA ENTEGRASYONU (INTEGRATION OF INTERNET AND REMOTE ACCESS TO PREDICTIVE MAINTENANCE)

Bilginin sensörler vasıtasıyla toplanması, mesafe sınırı olmaksızın iletilmesi, boyutu göz ardı edilerek işlenmesi, depolanması ve değerlendirilmesi gibi işlemler vasıtasıyla kestirimci bakım uygulaması kolaylaşmaktadır. Bu kolaylık, kestirimci bakımın uygulamasına katkı yapmasının yanında maddi getiri açısından da avantaj sağlamaktadır. Çünkü ölçüm değerlerinin uzaktan erişim yapılarak alınması ile uygulanan kestirimci bakımda fabrikada eğitimli personel istihdam edilmesine gerek duyulmaz. Böylece fabrikadaki ekipmanlar üzerinde gerekli ölçüm değerleri alınarak gerekli durum değerlendirmesi yapılır. Bu bilgiler, uzaktan erişim sayesinde başka bölgelerde istihdam edilmiş uzman teknik personel tarafından alınıp incelenerek buna göre bir bakım hamlesine karar verilebilir (Crespo Márquez, 2007).

Son yıllarda “e-bakım”, “uzaktan bakım ve yönetim sistemleri”, “tele-bakım”, “nesnelerin interneti” ve “radyo frekansı ile tanımlama” gibi kavramlar kestirimci bakım üzerinde uygulanmaktadır. Bunlardan e-bakım; internet üzerinden ekipmanların izlendiği ve yönetildiği bakım yönetim konsepti olarak tanımlanmakta ve kavram olarak 2000’lerin başından beri kullanılmaktadır. Uzaktan bakım ve yönetim sistemleri tehlikeli ve uzak lokasyonlardaki ekipmanlar için önerilmiştir. Tele-bakım; bilişim ve iletişim teknolojileri vasıtasıyla sistemdeki verilerin uzaktan alınarak arızaların algılanmasını ve onarımın sınırlı bir şekilde uygulanmasını sağlayan bakım konseptidir. Nesnelerin interneti, kestirimci bakımda kullanılan henüz çok yeni bir teknolojidir. İnternet vasıtasıyla ekipmanların birbirine bağlı olma durumundan yola çıkarak tüm ekipmanların oluşturduğu ortak etki ile arızalar tespit edilmekte ve bakımı yapılmaktadır. Radyo frekansı ile tanımlamanın geniş uygulama alanlarından bir tanesi de kestirimci

bakım üzerinedir. Böylece ekipmanın tanınması ve takibi gibi özelliklerinin yanı sıra bakımla ilgili arıza kayıtlarının tutulması da sağlanır (Selcuk, 2017). Bunların yanında, arıza belirtilerinin bulut tabanlı durum izleme sistemleri vasıtasıyla sürekli değerlendirildiği (Gun et al., 2020) ve enerji tüketimi ile karbon emisyonunu minimuma indirme amacıyla yapay zekanın kullanıldığı bakım stratejileri (G. Singh, Anil Kumar, & Naikan, 2019) de yapılan çalışmalar arasında kendine yer bulmaktadır. İleriki zamanlarda kestirimci bakımda uzaktan izleme, değerlendirme ve bakıma karar verme yöntemlerinin çeşitlendirileceği ve daha fazla kullanılacağı öngörülmektedir.

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada sanayide uygulanan bakım stratejileri sınıflandırılmış, bu stratejilerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiş, ekipmanlar üzerinde hangi bakım tekniklerinin uygulanacağı ile ilgili bilgi verilmiş ve uzaktan erişimin kestirimci bakım ile olan etkileşimi anlatılmıştır.

Bakımın ürün maliyetleri üzerindeki etkisi, birbirlerine yakın lokasyonlarda bulunan ve aynı ürünü üreten tesislerin karşılaştırılması ile daha iyi anlaşılmaktadır. Çünkü rekabetçi piyasada bir ürünün maliyeti üretim tesisleri arasında birbirine çok yakın seyretmektedir ve eğer bir tesis diğerinden daha uygun maliyetle üretim yapmak istiyorsa mutlaka elektrik motorları gibi yüksek ve yoğun elektrik enerjisi tüketen ekipmanların bakımlarını zamanında yapması, arızaların daha oluşmadan önüne geçmesi ve ekipmanların arızalı şekilde çalışmasından dolayı gerçekleşen enerji kaybını engellemesi gerekmektedir. Bu nedenle kestirimci bakım ya da GMB gibi gelişmiş yöntemlerin uygulanması kaçınılmaz bir hal almıştır.

Günümüzde kestirimci bakımın ve GMB'nin uygulanmasının önünde hala birtakım engeller bulunmaktadır. Kestirimci bakım ve GMB'nin uygulanmasının önündeki en büyük engeller gerekli donanım ve personel eğitimlerinin sağlanmasının güçlüğü olarak ifade edilse de arızanın kök nedeninin tespit edilmesinin teknik personelin hatasını ortaya çıkaracağı korkusu ve kestirimci bakımın getirdiği maddi avantajların idare tarafından görülmesinin zor olması gibi nedenler de sayılmalıdır.

Son zamanlarda kestirimci bakıma uzaktan erişim ve internet altyapısının eklenmesi bakımın daha profesyonelce ve daha uygun maliyetle yapılmasını mümkün hale getirmekle beraber pandemi gibi tüm dünyayı etkileyen olaylar karşısında üretimin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Böylece kestirimci bakımın dezavantajlarından olan personel eğitimlerinin yüksek maliyetli olması gibi durumlar artık söz konusu olmaktan çıkacaktır. Görünen o ki piyasa şartları zorlaştıkça sadece bakıma yeteri kadar önem vererek gerekli bakım hamlelerini zamanında yapan tesisler ayakta kalabilecektir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers and Industrial Engineering*, 63(1), 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002>
- Barnish, T. J., Muller, M. R., & Kasten, D. J. (1997). Motor maintenance: A survey of techniques and results. *Proceedings ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, 287–297.
- Bauer, B., Geropp, B., & Seeliger, A. (1997). Condition Monitoring and Predictive Maintenance in Mining Industry Using Vibration Analysis for Diagnosis of Gear Boxes. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(18), 989–992. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)42529-8](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)42529-8)
- Börjesson, A., & Svensson, A. (2011). *Critical equipment classification and cost reduction within professional maintenance*. 1–115.
- Brown, P., & Sondalini, M. (2015). Asset maintenance management - The path toward defect elimination. *Lifetime Reliability Solutions*, 3.
- Buckley, J. M. (2007). AN OVERVIEW OF THE PREDICTIVE MAINTENANCE APPLICATIONS OF AIRBORNE ULTRASOUND TESTING . INTRODUCTION A Note on Terminology Principles of Operation. *4th International Conference on NDT*.
- Crespo Márquez, A. (2007). The Maintenance Management Framework. *The Maintenance Management*

- Framework. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-821-0>
- Duyar, A. (2009). Model Bazlı Arıza Analizi ve Kestirimci Bakım. *Mühendis ve Makina*, 50(598), 1–9.
- Duyar, A., Önel, İ. Y., & Özdemir, H. (2016). İnovatif Model Bazlı Arıza Erken Uyarı Yazılımıyla Beklenmedik Duruşlara Son Verme. *Mühendis ve Makina*, 57(672), 44–48.
- Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı, “EnVer Motor Hareketi,” TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. [Online]. Available: [http://www.yegm.gov.tr/verimlilik/b\\_en\\_mot\\_hareketi.aspx](http://www.yegm.gov.tr/verimlilik/b_en_mot_hareketi.aspx). [Accessed: 08-Apr-2020].
- Geitner, F. K., & Bloch, H. P. (2012). *Machinery Failure Analysis And Troubleshooting, Practical Machinery Management for Process Plants*. TX, USA: Butterworth-Heinemann.
- Goyal, D., & Pabla, B. S. (2015). Condition based maintenance of machine tools-A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 10, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.05.004>
- Gresham, R. M., & Totten, G. E. (2009). *Lubrication and Maintenance of Industrial Machinery: Best Practices and Reliability*. London: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Gun, B., Jae, W., Huang, A., Sutherland, J. W., Jae, W., & Sutherland, W. (2020). Development and Application of a Method for Real Time Motor Fault Detection. *Procedia Manufacturing*, 49, 94–98. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.07.002>
- Huda, A. S. N., & Taib, S. (2013). Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.028>
- Jadin, M. S., & Taib, S. (2012). Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. *Infrared Physics and Technology*, 55(4), 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.03.002>
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
- Kirazlılar, B. (2007). *Endüstriyel Bakım: Kestirimci Bakım ve Önleyici Bakımın Temelleri ve Ustalarına Pratik Metotları*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Klutke, G. A., Kiessler, P. C., & Wortman, M. A. (2003). A critical look at the bathtub curve. *IEEE Transactions on Reliability*, 52(1), 125–129. <https://doi.org/10.1109/TR.2002.804492>
- Lee, J., & Wang, B. (1999). *Computer Aided Maintenance* (p. 7). p. 7. New York: Springer.
- Levitt, J. (2011). *Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance*. New York: Industrial Press Inc.
- Lin, C. C., & Tseng, H. Y. (2005). A neural network application for reliability modelling and condition-based predictive maintenance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(1–2), 174–179. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1835-3>
- Martin, K. F. (1994). A review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 34(4), 527–551. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)90083-3)
- Mehala, N., & Dahiya, R. (2007). Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction. *International Journal*, 2(1), 29–35.
- Mergen, F., & Zorlu, S. (2009). *Elektrik Makineleri 2 Asenkron Makineler*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- NASA. (2000). *Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment*. Washington, D.C.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. United Airlines and Dolby Press, sponsored and published by the Office of Assistant Secretary of Defense.
- Onawoga, D. T., & Akinyemi, O. O. (2010). Development of Equipment Maintenance Strategy for Critical Equipment. *Pacific Journal of Science and Technology*, 11(1), 328–342.
- Piotrowski, J. (n.d.). Effective Predictive and Pro-Active Maintenance for Pumps. Retrieved April 8, 2020, from <http://www.maintenanceworld.com/effective-predictive-and-pro-active-maintenance-for-pumps/>
- Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*.



- <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-075066275-8/50001-1>
- Selcuk, S. (2017). Predictive maintenance, its implementation and latest trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(9), 1670–1679. <https://doi.org/10.1177/0954405415601640>
- Singh, G., Anil Kumar, T. C., & Naikan, V. N. A. (2019). Efficiency monitoring as a strategy for cost effective maintenance of induction motors for minimizing carbon emission and energy consumption. *Reliability Engineering and System Safety*, 184(February 2018), 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.02.015>
- Singh, S., Kumar, A., & Kumar, N. (2014). Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems. *Procedia Materials Science*, 6(Icmpec), 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.021>
- Sullivan, G. P., Pugh, R., Melendez, A. P., & Hunt, W. D. (2010). Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency. *Federal Energy Management Program*, (August 2010), 321. <https://doi.org/10.2172/1034595>
- Sullivan, G., Pugh, R., Melendez, A., & Hunt, W. (2002). *Best Practices A Guide to Achieving Operational Efficiency*.
- Tabak, A. (2014). *Ekipmanlarda Kestirimci Bakım Teknolojilerinin Araştırılması Ve Seçilen Bir Yöntemin Uygulandığı Sanayi Tesisinde Elde Edilen Neticelerin İrdelenmesi*. Karabük Üniversitesi.
- Tabak, A. (2020). Fırçasız Doğru Akım Motor larının Hız Kontrolünü Gerçekleştirmek İçin PID / PD Kontrolcü Tasarımı ve Performans İncelemesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 145–155. <https://doi.org/10.31590/ejosat.707004>
- TERZİOĞLU, H., & SELEK, M. (2017). Determination of Equivalent Circuit Parameters of Induction Motors By Using Heuristic Algorithms. *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, 5(2), 170–182. <https://doi.org/10.15317/scitech.2017.80>
- Thomas, J. (2007). *A History of Maintenance: Implementing MP2* (Western Kentucky University). Retrieved from [http://digitalcommons.wku.edu/stu\\_hon\\_theseshttp://digitalcommons.wku.edu/stu\\_hon\\_theses/141%0Ahttp://digitalcommons.wku.edu/stu\\_hon\\_theses/141/](http://digitalcommons.wku.edu/stu_hon_theseshttp://digitalcommons.wku.edu/stu_hon_theses/141%0Ahttp://digitalcommons.wku.edu/stu_hon_theses/141/)
- TÜİK. (2019). *Net Elektrik Tüketiminin Sektörlere Göre Dağılımı*, Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara.
- UGECHI, C. I., OGBONNAYA, E. A., LILLY, M. T., OGAJI, S. O. T., & PROBERT, S. D. (2009). Condition-Based Diagnostic Approach for Predicting the Maintenance Requirements of Machinery. *Engineering*, 01(03), 177–187. <https://doi.org/10.4236/eng.2009.13021>
- Verimlilik Genel Müdürlüğü (2015). *Elektrik Motorlarında Enerji Verimliliği*, T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Ankara.
- Waide, P., & Brunner, C. U. (2011). *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*. Paris, France.
- Wakiru, J. M., Pintelon, L., Muchiri, P. N., & Chemweno, P. K. (2019). A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 108–132. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.08.039>
- Wyrwas, E., Condra, L., & Hava, A. (2011). Accurate quantitative physics-of-failure approach to integrated circuit reliability. *IPC APEX EXPO Technical Conference 2011*, 3(August), 1776–1815.