

**KESTİRİMCİ BAKIM ve UYGULAMALARININ
İYİLEŞTİRİLMESİ**

HASAN BORA DENLİ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
TEMMUZ – 2007**

KESTİRİMCİ BAKIM ve UYGULAMALARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

HASAN BORA DENLİ

**Mersin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makina Mühendisliği
Ana Bilim Dalı**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Yusuf ZEREN**

**MERSİN
Temmuz - 2007**

Bu tezin gerek bilimsel içerik, gerekse elde edilen sonuçlar açısından tüm gerekleri sağladığı kanaatine ulaşan ve aşağıda imzaları bulunan biz jüri üyeleri, sunulan tezi oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul ediyoruz.

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Yusuf ZEREN

Jüri Üyesi
Yrd. Doç. Dr. Aysun Sağbaş

Jüri Üyesi
Yrd. Doç. Dr. Hüseyin MUTLU

Bu tezin Fen Bilimleri Enstitüsü yazım kurallarına uygun olarak yazıldığı Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../.....tarih ve/..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.Mahir TURHAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ÖZ

Kestirimci bakım, sağladığı güvenilirlik, kalite ve hazır bulunma sayesinde, endüstrideki devrim niteliğindeki gelişmelerden biridir. Metot, makinelerin çalışırken yaydığı ses, titreşim ve ısıdan yola çıkarak, yapılan ölçüm ve gözlemler sonucunda, makinenin durumunun anlık fotoğrafını çeker ve öncekilerle karşılaştırılarak alınması gereken önlemlerin ve yapılacak planlamaların çok geç olmadan yapılabilmesi için mühendislere zaman sağlar. Bu sayede tezgah ve ekipmanlar daima hazır durumda olur ve yüksek verimle çalışır. Kestirimci bakımın sağladığı diğer bir olanak da, beklenmeyen arızaları azaltması ve bakım onarım masraflarını daha düşük seviyelere çekmesidir.

Bu çalışmada bakım onarım teknikleri tanıtılmış, kestirimci bakım metotları anlatılmış ve bazı uygulama örnekleri verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kestirimci bakım, Titreşim analizi, Yağ analizi, Ultrasonik testler, Kızılötesi termografi

ABSTRACT

Predictive maintenance is one of the revolutionary developments with its providing reliability, quality and ready to start condition. This method, take an instant picture of the machine by collecting data like vibration, heat and sound while machine is operating and provides time to the engineer for planning the things to be done and for taking the actions before the machine fails by comparing that picture with the previous ones. In this way, the machine or the equipment always be in stand by position and operates with high efficiency, in addition, the number of unexpected failures minimised, stock and maintenance costs decreased.

In this study, maintenance concepts are introduced, predictive maintenance techniques are being explained and some case studies are given.

Key Words: Predictive maintenance, Vibration analysis, Oil analysis, Ultrasound analysis, Thermal imaging.

TEŞEKKÜR

Bu çalıőmayı yaparken benden yardımını esirgemeyen danıőmanım Prof. Dr. Yusuf ZEREN'e, çalıőmanın her aşamasında sonsuz sabırları ve hoőgörüleriyle bana destek olan eőim Eylem ve oğullarım Berk ve Ata'ya, makine parkını kullanmama verdikleri izin sebebiyle Çukurova İnşaat Makineleri Sanayi ve Ticaret A.Ő. ye, test aletleri ve teknik destek konusunda beni yalnız bırakmayan Mehmet YILMAZ'a, tüm imsataő bakım onarım ekibine, sabrı ve yardımları dolayısı ile bakım onarım müdürüm Adolf VİTEL'e ve tezin baőından yaőamının sonuna kadar desteğini daima hissettiğim rahmetli őefim Necmettin OKTAY'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
1. GİRİŞ	1
1.1. BAKIM ONARIM	3
1.2. ARIZA ÇIKTIKÇA BAKIM	4
1.3. KORUYUCU BAKIM (PERİYODİK BAKIM)	6
1.4. KESTİRİMCİ BAKIM	8
1.5. PROAKTİF BAKIM	9
1.6. GÜVENİLİRLİK ESASLI BAKIM	10
1.7. KESTİRİMCİ BAKIM KAVRAM VE TEKNİKLERİ	10
1.8. KESTİRİMCİ BAKIM YÖNTEMLERİ	12
1.8.1. Yağ Analizi	12
1.8.1.1. Motor yağı analizi	13
1.8.1.2. Hidrolik yağ analizi	15
1.8.2. Akışkanları Ayırt Etmede Kullanılan Fiziksel Testler	16
1.8.2.1. Görsel ve fiziksel testler	16
1.8.2.2. Metal aşınma analizi	17
1.8.2.3. Sonuçların yorumlanması	19
1.8.3. Ultrasonik Testler	22
1.8.3.1. Ultrason uygulamaları	23
1.8.4. Kızılötesi Termografi	28
1.8.4.1. Termografi ile tanımlanabilecek arızalar	29
1.8.4.2. Kızılötesi termografinin diğer kestirimci bakım teknikleriyle karşılaştırılması.....	33
1.8.5. Titreşim Ölçümü ve Analizi	34
1.8.5.1. Titreşim sensörleri	37
1.8.5.2. Sensör seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalar	41

1.8.5.3. Sensörlerin montaj şekilleri	42
1.8.5.4. Titreşim analizi ile tespit edilebilen arızalar	44
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	65
3. MATERYAL METOT	68
3.1. MATERYAL	68
3.1.1. OKUMA LU25-2SC x 650 CNC Torna Tezgahı	68
3.1.2. MAZAK FH 6000 CNC işleme Merkezi	69
3.2. METOT	71
3.2.1. SKF microlog GX Ölçüm Cihazı	71
3.2.2. Sensör	72
3.2.3. Fourier, Kesintili Fourier ve Hızlı Fourier Dönüşümü	73
4. UYGULAMA ÖRNEKLERİ	77
4.1. OKUMA LU25-2SC X 650 CNC TORNA TEZGAHI	77
4.2. MAZAK FH 6000 CNC İŞLEME MERKEZİ	84
5. KESTİRİMCİ BAKIMIN İŞLETME VERİMLİLİĞİNE VE EKONOMİYE KATKISI	90
6. SONUÇLAR	93
7. KAYNAKLAR	94
8. ÖZGEÇMİŞ	98

ÇİZELGELAR DİZİNİ

ÇİZELGE	SAYFA
Çizelge 1.1. Titreşim analizi parametrelerinin birbirleri arasındaki dönüşüm çizelgesi	36
Çizelge 1.2. Sensörlerin, bağlantı tiplerine göre kullanılacakları Frekanslar.....	43
Çizelge 4.1. OKUMA LU 25-2SCx650 CNC torna tezgahı fener mili rulmanları titreşim ölçüm raporu	78
Çizelge 4.2. OKUMA LU25-2SC x 650 CNC torna tezgahı elektrik motoru ön rulmanı titreşim ölçüm raporu	82
Çizelge 4.3. MAZAK FH 6000 CNC İşleme merkezi fener mili rulmanları titreşim ölçüm raporu	85
Çizelge 4.4. MAZAK FH 6000 CNC İşleme merkezi elektrik motoru ön rulmanı titreşim ölçüm raporu.....	87

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	SAYFA
Şekil 1.1. Aylık periyotlarla bakım.....	7
Şekil 1.2. Koruyucu bakım arıza olasılığı-zaman grafiği	7
Şekil 1.3. Ölçüm limit sınırına gelince bakım (Kestirimci bakım)	8
Şekil 1.4. Kestirimci bakım akım şeması.....	11
Şekil 1.5. Ultrason ile kaçak tespiti	24
Şekil 1.6. Yağlanmamış rulman	25
Şekil 1.7. Yağlanmış rulman	25
Şekil 1.8. Akustik yağlama adaptörü	26
Şekil 1.9. Korona testi	27
Şekil 1.10. Sızdırmazlık testi.....	28
Şekil 1.11. Elektrik paneli, fazlardan birinde gevşeklik olması durumu	30
Şekil 1.12. Mekanik bir problemin neden olduğu yatak ısınması	31
Şekil 1.13. Kablo kanallarındaki indüksiyon ısınması	32
Şekil 1.14. Fırın kapağından ısı farkı	32
Şekil 1.15. Termografi ile tank seviyesi ölçüsü	33
Şekil 1.16. İki kütle arasında faz farkı a) 0°C fark b)90°C fark	35
Şekil 1.17. Genliği tanımlayan büyüklükler	35
Şekil 1.18. Baskı tipi ivme sensörü	37
Şekil 1.19. Kesme tipi ivme sensörü	37
Şekil 1.20. Sismik hız sensörü	39
Şekil 1.21. Piezo-elektrik hız sensörü	39
Şekil 1.22. Temassız deplasman sensörleri	40
Şekil 1.23. Şaft levyesi	41
Şekil 1.24. Şaft amortisörü	41
Şekil 1.25. Sensörlerin bağlantı şekilleri	43
Şekil 1.26. Statik balanssızlık	45
Şekil 1.27. Kuvvet çifti balanssızlığı	45
Şekil 1.28. Şaft eğikliği	46

Şekil 1.29. Bode diyagramı	51
Şekil 1.30. Rezonans diyagramı	52
Şekil 3.1. OKUMA LU 25-2SCx650 CNC torna tezgahı-1.....	69
Şekil 3.2. OKUMA LU 25-2SCx650 CNC torna tezgahı-2.....	69
Şekil 3.3. MAZAK FH 6000 CNC işleme merkezi-1	70
Şekil 3.4. MAZAK FH 6000 CNC işleme merkezi-2	70
Şekil 3.5. SKF microlog GX serisi vibrasyon analiz cihazı	71
Şekil 3.6. SKF CMSS 2200 Model Titreşim Sensörü	72
Şekil 3.7. CMSS 2200 Sıcaklık tepkisi grafiği	72
Şekil 3.8. CMSS 2200 Frekans Tepkisi Grafiği	73
Şekil 3.9. Fourier dönüşümü	76
Şekil 3.10. Ayrık Fourier dönüşümü	76

1. GİRİŞ

Otomasyonun ve seri üretimle maliyetleri düşürmenin, ürünlerini satabilmek ve ayakta kalabilmek için neredeyse ana koşul olduğu günümüzde otomasyon, müşterinin istediği standartlarda ürün üretmenin temel şartlarından biri haline gelmiş ve bu durum üretim sistemlerinin giderek karmaşıklaşmasına sebep olmuştur. Bir üretim hattında, planlanan üretimin yapılması beklenirken ortaya arızalar çıkabilmekte ve bu arızaların yarattığı kesintiler ile üretim planları etkili bir biçimde uygulanamamaktadır. Bu durum bulunduğumuz yoğun rekabet ortamında, bir işletme için çok büyük kayıplara neden olmaktadır.

Sağlıklı üretim yapılabilmesi ve üretim programlarının aksamadan gerçekleştirilebilmesi için makinelerde oluşabilecek arızaların hızla çözülebilmesi ve hatta beklenmeyen arızaların oluşmasının önüne geçilmesi gerekir.

Kobu'ya göre, bakım-onarım faaliyetlerindeki aksaklıkların üretim akışı, verimlilik ve dolayısıyla maliyetler üzerindeki etkileri şöyle özetlenebilir:

- Makinelerin ve onları çalıştıran operatörlerin boş kalması,
- Dolaylı işçilik ve imalat genel masraflarının artması,
- Müşteri taleplerinin karşılanamaması dolayısıyla müşteri memnuniyetinin düşmesi,
- Aksaklığın meydana geldiği bölümde ve bu bölümle ilgili diğer bölümlerde gecikme ve boş beklemler olması,
- Hatalı ürün oranının artması ve beklenen kalitenin yakalanamaması,
- Zamanında teslim edilemeyen siparişler sebebiyle müşteri kaybı oluşması [1].

İşletmeler bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için farklı metotlar denemiş, periyodik olarak yaptıkları yağ ve parça değişimleri ile belirli seviyede başarılı olmuşlar, fakat beklenmedik arızaların önüne etkin olarak geçememişlerdir.

Üretimin sürekli yapıldığı endüstriyel tesislerde, uygulanan bakım türleri özellikle büyük önem taşır. Üretimin aksamasını engellemek isteyen bazı tesisler, erken uyarı niteliği olan kestirimci bakım yöntemlerini tercih etmektedirler. Ani arızalarla karşılaşmamak, beklenmeyen üretim kayıplarını engellemek ve bakım onarım işlerini planlanabilir hale getirmek, kestirimci bakımın hedeflerini oluşturur.

Erken uyarı özelliği olan kestirimci bakım yöntemleri, kritik süreçler için idealdir. Bu bakım yöntemleri, makinelerin durumlarının düzenli olarak izlenmesine ve önemli değişikliklerin görülmesi durumunda, arıza meydana gelmeden müdahale

edilmesine olanak sağlar. Böylece onarımlar arası maksimum süreyi sağlayacak veriler elde edilmiş olur[2].

Günümüzde, imalat sektöründeki yöneticilerin büyük bir kısmı halen üretim maliyetlerini düşürebilmek için uzun mesailer harcarken, bakım onarım harcamalarının neredeyse üçte birinin boşa gittiğini görememektedirler. Bir ürünün maliyetinin ortalama %14'ünün bakım onarım kaynaklı olduğu birçok endüstride, maliyetlerin kısılması için bakım onarımda sadece güvende olmak adına yapılan stok harcaması, temel hedef olarak alınabilir. DuPont'un raporuna göre, günümüzde kontrol edilebilir en büyük harcama kalemi bakım onarım bölümüne aittir ve birçok işletmede bakım onarım bütçesi, yıllık net kârdan daha fazladır[3].

Kestirimci bakım stratejisini benimseyerek kullanmanın bir işletmeye temel faydaları şu şekilde sıralanabilir:

- Ekipmanın hazır bulunma süresi ve sağlıklı olarak çalıştığı zaman artacağından, ekipmanın kendini amorti etme süresi kısalacak ve yatırım daha hızlı geri dönecektir.
- Hangi parçanın arızalanacağı doğru olarak tespit edilebileceğinden, değişmesi gerekmeyen, kullanım ömrü dolmamış parçaların değiştirilmesi sonucunda ortaya çıkan gereksiz maliyet artışlarının önüne geçilecektir.
- Duruşlar planlı olacağından, sürpriz arızaların giderilmesi için ortaya çıkan ekstra maliyetler ortadan kalkacak, bakım maliyetleri azalacak, bununla birlikte üretim ve verimliliğin artması sağlanacaktır.
- Yapılan bakımın faydası kontrol edilebileceğinden, bakım verimliliği yükselecektir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, ambalajından çıkarılan her 10 parçadan biri arızalıdır. Yapılan bakımın kontrolüyle arızalı parça takılmış olsa bile ekipman devreye alınmadan kontrol edileceğinden, kısa sürede ikinci bir bakıma ihtiyaç duymadan parça tespit edilerek değiştirilebilecektir.
- Arıza trendine giren parçanın bozulma zamanı tahmin edilebileceğinden, bakım malzemelerinin stokları azaltılabilecek buna bağlı olarak riske girmeden stok maliyetinden tasarruf edilebilecektir.

- Ekipman, kritik noktaya gelip bozulmadan önce tamir edileceğinden, çalışanlar için iş sağlığı ve iş güvenliği standartları çerçevesinde daha güvenli çalışma ortamları oluşturulabilecektir.
- Sıkıştırılmış havanın endüstrideki en pahalı enerji türlerinden biri olduğu göz önüne alındığında, iletim sistemdeki kaçakların önlenmesi önemli bir görünmez gider kalemini ortadan kaldıracaktır. Zira, etkin olarak kontrol edilmeyen bir sistemdeki kaçaklar toplam basınçlı hava üretiminin %35'ine denk gelebilmektedir.

Mobley'e göre[4] yenilikçi bakım sistemleri, klasik bakım ve önleyici bakım sistemlerinde olmayan birçok avantajı da beraberinde getirir. Bu yöntemleri kullanan endüstriyel tesislerde makine arıza oranlarında ortalama %55, bakım maliyetlerinde ise %50'leri aşan bir düşüş gözlenmiştir. Makine ömrü %20 ile %40 arasında artmıştır. Bununla beraber verimlilikte %30, kârda ise %60'lara varan bir artış kaydedilmiştir. Bu artışlar bir tesis için azımsanamayacak kazançlar anlamına gelir.

1.1. BAKIM ONARIM

Bakım onarım, bir işletmedeki tüm makine, donanım ve sistemlerin işlevlerini tam olarak ve en yüksek performansla yerine getirebilmeleri ve bu hallerini sürdürebilmeleri için gerçekleştirilen faaliyetlerin bütünüdür. Her ne kadar gereken önem verilmesede bir işletmedeki en kritik bölümlerden biri bakım onarım bölümüdür. Üretimin sürekli olarak devam ettirilebilmesi, makine ve donanımlarda meydana gelen beklenmedik arızaların giderilmesi ve arızaların önüne geçilmesi için periyodik bakımlarının yapılması, işletmenin bina ve yardımcı tesislerin bakımı ve işletilmesi ile tezgâhların montajı ve yer değiştirmesi gibi temel görevleri olan bu bölüm, çoğu zaman tezgâhların işleyişini geliştirecek yada etkinliğini ve verimliliğini arttıracak yeni tasarımlar yapılması, imalatı ve montajı, çevre kirliliğine karşı önlemler alınması, iş güvenliği önlemlerinin uygulanması, hurda ve atık malzemelerin yönetimi, bina ve tesislerin yangından korunması gibi işlerden de sorumlu tutulur.

İşletmeler büyüyüp karmaşıklaştıkça, bakım onarım bölümünün önemi de artar. Sipariş üzerine imalat yapan işletmelerde meydana gelen arızalarda üretimin diğer tezgâhlara kaydırılması ile ekonomik kayıplar en aza indirilse de, seri imalat yapan işletmelerde böyle bir çözüm söz konusu olamayacağından, arızanın bir an önce giderilmemesi çok büyük ekonomik kayıplara sebep olabilir. Bir arıza sonucunda oluşan durumun işletmenin verimliliği ve maliyetleri üzerindeki etkileri şu şekilde sıralanabilir: arızalı tezgâhın ve bu tezgâhla ilişkili diğer tezgâhların operatörler boş kalır, dolaylı işçilik ve imalat genel masraflarının artar, arızalı tezgâhtan önceki üretim hattında stoklar artar, sonraki tezgâhlar çalışamaz, zamanında teslim edilemeyen ürün sebebiyle müşteri memnuniyetsizliği oluşur. Görüldüğü gibi üretimin bir noktasında meydana gelen arıza tüm hatta yayılarak işletmeyi zor durumda bırakabilmektedir.

Meydana gelen arızaların en kısa sürede çözümlenebilmesi için gereken ilk şart, yetkin ve eğitimli bakım onarım ekibidir. Bakım onarım personelinin sürekli olarak eğitimine önem verilmelidir. Bunun yanında teknolojik tamir ve ayar donanımlarının da bakım onarım bölümünün demirbaşına katılması gerekir. Herhangi bir arızada, tam donanımlı ve teknik yeterliliğe sahip personel doğru çözümün tek anahtarıdır.

İşletmeler günümüze kadar çok çeşitli bakım onarım metotları kullanarak üretimlerinin sürekliliğini devam ettirmeye çalışmışlardır, tabî ki bu metotların çoğu temel dört adet bakım onarım türünün –arıza çıktıkça bakım, koruyucu bakım, kestirimci bakım ve proaktif bakım– farklı yorumlanmasıdır. Bunun yanı sıra, son yıllarda bunların kombinasyonu olan güvenilirlik esaslı bakım, bir bakım sistemi olarak endüstride kabul görmektedir.

1.2. ARIZA ÇIKTIKÇA BAKIM

Albayrak'a göre, kolay temin edilebilen, ucuz ve/veya yedekli tezgâh ve teçhizatlar için kullanılan bir tekniktir. Tezgâhın yapması gereken üretimin ertelenebildiği yada farklı bir tezgâha aktarılabilirdiği durumlarda, modern bakım onarım tekniklerinin kullanımının getireceği ekonomik kazanımlar ve güvenilirlik avantajları ortadan kalkacağından, arıza çıktıkça bakım tekniği daha ekonomik bir teknik olarak tercih edilebilir.

Köse'ye göre, arızı bakım sisteminde, bakım onarım personeli, sürekli arızaların peşinde koşmaktan durum değerlendirmesine fırsat bulamaz. Gerekli parçanın temin telaşı ve tezgâhın bir an önce devreye alınma baskısı anlık olarak ihtiyacı karşılıyor gibi görünse de, arızanın tekrarlanması yada makine devreye tekrar alındığında yapılan onarımın gerçek çözüm sağlamaması riski, teknik personel üzerinde yüksek stres yaratır. Bakım onarım personelinin üzerindeki baskı, tezgâhın hızla üretime katılmasını sağlamakta, ancak etraflı bir inceleme yapılamadığından tezgâhın arka arkaya aynı yerde yada yakın bölgelerde arıza çıkarma riskini de yükseltmektedir. Beklenmedik zamanlarda arızanın çıkması planlama yapmaya fırsat vermez. Bununla birlikte arızaların herhangi bir işaret vermeden birden bire oluşması, ekipmanda çalışan personeli risk altına sokar. Arıza durumu sürecinde yaşanan üretim kaybı ve acil malzeme temini için kullanılan olağan üstü kargo ve taşıma talepleri sebebi ile maliyeti en yüksek bakım uygulamasıdır[5].

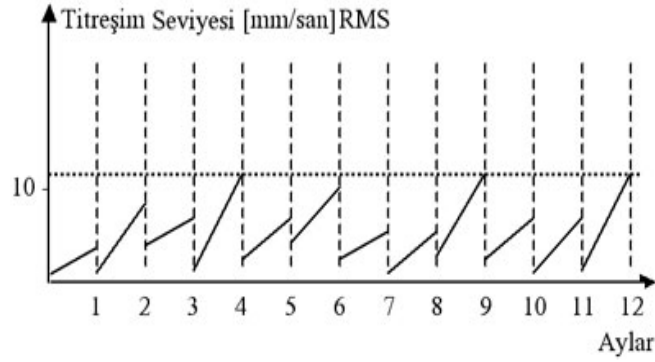
Dünya genelinde halen en yaygın olarak kullanılan bakım onarım metodu olarak görünse de, gelişen şartlara uyum sağlamanın gerekliliğini fark eden ve bakım yönetim sistemlerini kurmaya başlayan işletmelerin hızla terk ettiği bu metodun temel avantajları, daha az bakım personeli gerektirmesi ve görünen maliyetinin düşük olmasıdır. Bunun yanında bakım onarım personelinin verimsiz kullanılması, tezgâhın bozulması sonucunda başka bir arızanın ortaya çıkma olasılığı, parça değişimi ve/veya tamiri maliyeti, çoğunlukla fazla mesai yapılması gereği ile ortaya çıkan fazladan işçilik ücreti ve beklenmedik zamanlarda meydana gelen arızalar sebebi ile oluşan plansız duruşlar sonucu artan maliyetler gibi dezavantajları vardır. Yinede kritik olmayan, ucuz ve/veya bozulması halinde tamir edilene kadar üretimi çok fazla etkilemeyecek ekipmanlar için en uygun bakım metodu olarak kullanılabilir, örnek olarak işletmedeki aydınlatma lambalarının belirli aralıklarla değişiminin planlanmaması, bozulunca değiştirilmesi verilebilir. Tabii ki bozulunca değiştirilecek ekipmanın kritik ekipmanlar için zincirleme reaksiyon başlatmadığından emin olunmalıdır.

1.3. KORUYUCU BAKIM (PERİYODİK BAKIM)

Günümüzde, işletmelerde yaygın olarak kullanılan bu bakım yöntemi bir periyodik bakım uygulamasıdır. Planlı bakım yada zamana dayalı bakım olarak ta adlandırılan bu bakım türü, özellikle arızalanması halinde üretimi sekteye uğratabilecek, arızalanmasının maliyeti çok yüksek olabilecek kritik ekipman ve tezgâhlara uygulanır. Bu yüksek maliyetle karşılaşmamak için, periyodik olarak yağlama, ayar, parça değişimi ve temizlik yapılır. Böylece bakım uygulamalarında beklenmeyen arızalar azalır, düzenli olarak bakım ve ayar yapıldığından makinelerin kullanım ömürleri ve verimlilikleri artar, enerji tüketimleri düşer. Bununla birlikte, arızanın önüne geçebilmek için bakım periyotlarının kısa tutulması, bu nedenle bakım ve işletme maliyetlerinin yükselmesi, ekonomik ömrünü tamamlamamış, daha uzun süre hizmet verebilecek parçaların değişimi gibi gereksiz bakım uygulamalarının yapılabilmesi, yapılan bakım sırasında istenmeden de olsa bazı ayarlar ve parçaların bozulması yada hatalı yapılan bir ayar veya montajın bir sonraki bakım periyodundan önce arızaya neden olması gibi dezavantajları bulunur. Ayrıca öngörülen bakım periyodundan önce beklenmeyen bir arıza çıkması da mümkündür.

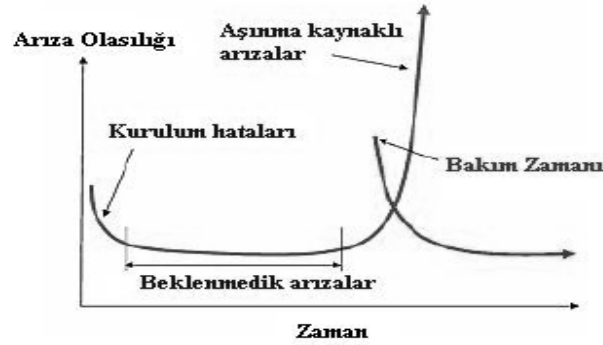
Periyodik bakımda, aşınmanın zamanla hızlanan yavaş ve sürekli bir süreç olduğu ve önleyici bakımın aşınma hızını yavaşlatarak aşınmayı düşük bir seviyeye indirdiği kabul edilir, ancak aşınmanın doğası biraz daha farklıdır. Ekipman normal olarak çalışırken bir dış etken olmazsa, yağda bozulma yada tezgâhın sınırlarının aşırı zorlanması gibi, parçalarında neredeyse hiçbir aşınma belirtisi görülmez. Bu tip bir dış etkenin olmadığı durumlarda yapılan bakım gereksizdir. Bu dış etkilerin oluşup hızla aşınmaya neden olarak tezgâhın ömrünü kısaltmaya başladığı sırada yapılan bakım ise geç kalmış bir uygulama olacaktır. Birçok periyodik bakım uygulamasında yapılan ise maalesef ya gereksiz yada çok geç kalınmış bakım uygulamalarıdır[7].

Şekil 1.1'de aylık periyotlarla bakım yapılmış bir makine görülmektedir. Bu makinede yılda 12 duruş ile koruyucu bakım uygulanmıştır. Aynı süreçte, titreşim ölçümleri de bilgi için alınmıştır. Ölçümler, her bakım periyodunda titreşimin farklı olduğunu, bakım sonrası titreşim seviyelerinin her zaman istenilen seviyeye düşürülemediğini göstermektedir.



Şekil 1.1. Aylık periyotlarda bakım

Şekil 1.2'deki arıza olasılığı-zaman grafiğine bakıldığında, döngünün nispeten yüksek bir arıza olasılığı değeri ile başladığı görülür, bunun sebebi tezgâhın imalatı ve kurulumu aşamasında meydana gelen hatalardır. Bundan sonra arıza olasılığı, tezgâhta aşınma baş gösterene kadar göreceli olarak düşük seyrederek. Periyodik bakım, artış tam olarak başlamadan önce yapılması gereken bir bakım türüdür. Bu genelde tam olarak belirlenemediğinden ya zamanından çok önce yapılarak maliyet artışına ve güvenilirlik azalmasına (her bakımdan sonra, bir takım bakım hataları sebebi ile arıza olasılığı başlangıçta biraz daha yüksektir) ya da geç yapılarak tezgâhın parçalarının aşınmasına neden olur.



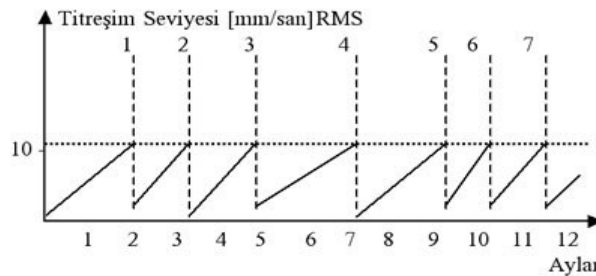
Şekil 1.2. Koruyucu bakımda arıza olasılığı-zaman grafiği

Buradan da anlaşılacağı gibi, periyodik bakımla bir takım arızaların önüne geçebilmek mümkün olmakla birlikte, hem her zaman arızaların kesin olarak giderilememesi, hem de gereksiz maliyet artışlarına sebep olabilmesi nedeniyle bakım sorununa kesin bir çözüm değildir.

1.4. KESTİRİMCİ BAKIM

Makineler çalışırken, durumlarını titreşimler yoluyla ortaya koyarlar. Kestirimci bakım, makinelerin üzerlerinden tahribatsız şekilde ve periyodik olarak alınacak titreşim verilerinin eğilimlerinin izlenmesi, artış belirlenenlerde FFT (Fast Fourier Transition-Hızlı Fourier Dönüşümü, metot bölümünde verilmiştir) spektrumu ve dalga formu grafikleri ile detaylı analizlerle arıza teşhisinin önceden yapılmasıdır. Arıza ortaya çıkmadan önce, planlı onarım faaliyetleri ile olası arızanın giderilmesini sağlayan bir metottur. Bu yaklaşım ile koruyucu bakım kapsamında yapılan gereksiz bakım ve değişimlerin önüne geçilmekte, aynı zamanda beklenmedik arızalar önceden belirlenebilmektedir. Artan ürün kalitesinin yanı sıra uzayan arızasız çalışma süreleri ile üretim miktarında artış, maliyetlerde ise düşüş görülür. İş güvenliği açısından daha uygun bir çalışma ortamı yaratılır ve makinelerin ayarları daha düzenli yapılacağından enerji tüketimi oldukça azalır. Gerekli parçalar ve eleman, arıza çıkmadan önce temin edilebileceğinden, stok ve malzeme temini ile eleman maliyetleri aşağı çekilebilmektedir. Bu nedenle, makine arızasının ölçülerek izlenebildiği her ortamda kestirimci bakımın uygulanması, maliyetleri düşürme imkânı vermektedir. Bununla beraber, kullanılacak ekipmanın pahalı oluşu ve eleman eğitimlerinin maliyeti, bu metodun dezavantajı olarak kabul edilebilir.

Şekil 1.3'te, Şekil 01'de gösterilen makineye kestirimci bakım uygulanması durumunda elde edilen titreşim verileri gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, yılda 12 kez periyodik olarak bakıma alınan makinenin gerçekte 7 kez bakıma alınması yeterli olmakta ve yapılan bakımın sonucunda elde edilen titreşim seviyelerinin istenilen düzeye inmektedir. Başka bir anlatımla, yapılan bakımlar verimli olmaktadır.



Şekil 1.3. Ölçüm limit sınırına gelince yapılan bakım (Kestirimci Bakım.)

1.5. PROAKTİF BAKIM

Kestirimci bakımda durum izlemesi yapılarak arızanın meydana gelebileceği zamanın tahmini yapılsa da, arızanın temel nedenini her zaman tam olarak tespit edilemeyebilir. Bu noktada proaktif bakım devreye girer. Proaktif bakım, bakım metotları ile elde edilen bilgileri, problemi tanımlamak ve arıza kaynağını izole etmek için kullanır. Periyodik olarak rulman dağıtan bir pompa örneğini ele alacak olursak, öncelikle duruma dayalı bir izleme programı kullanarak, rulmanlara titreşim sensörleri yerleştirilir, rulmanların sıcaklıkları gözlemlenir ve yağlama yağı periyodik olarak analiz edilir. Bu adımlar bize rulmanın ne zaman arızalanacağını tespitinde yardımcı olur ancak niye arızalanacağı sorusuna cevap veremez. Proaktif bakım uygulamaları, tüm bunlara montaj aşamasında lazerli kaplin ayarı ve balans almayı da ekleyerek, rulmandaki gerilimleri azaltma, rulman ömrünü uzatma ve arıza olasılığını en aza indirme yoluna gidebilir, ayrıca bir sonraki adımı da atarak arızanın kaynağını bulur. Örnek olarak arıza öncesindeki temizleme prosedürlerine bakarak yenileme sırasında oluşabilecek bir kirlenmenin, erken rulman arızalarının temel sebebini oluşturup oluşturamayacağını araması verilebilir[7].

Bu temel arıza sebeplerini belirleyip düzelterek sadece ekipmanın ömrünü arttırmakla kalınmaz, rasgele oluşan arızaların çoğunun önüne geçilmiş olur. Bu sayede aynı ekipmanın aynı sorunlar sebebi ile tekrar tekrar tamir edilmesinin önüne geçilmiş olur.

Uygulanan onarımın kalitesi, bakım öncesi ve sonrasında kaydedilen veriler ve yapılan analizler ile izlenmelidir. Her yapılan onarımın sonunda, yapılan onarımın doğrulanması yapılır. Yapılan bakım yada onarımın sonucu istenilen düzeyde değilse, yakın zamanda tekrar duruş olmaması için gereken önlemler alınır ve hatta gerekirse bakım yeniden yapılır. Proaktif bakıma örnek olarak yerinde balans ve lazerli kaplin ayarı verilebilir.

Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de verilen örneklere bakılırsa, bakım uygulamasından sonra alınan ölçümler "0" (sıfır) seviyesine ulaşamadığını göstermektedir, tekrar devreye alınması sırasında, titreşim seviyesi olması gerekenden yüksek çıkmaktadır. Başka bir anlatımla, yapılan bakım-onarımda tam olarak istenilen hedefe erişilememiştir. Kestirimci bakıma ek olarak uygulanacak proaktif bakımla, bakım

sonrası devreye girmeden önce bu ölçüt kontrol edilir. Eğer bakım istenilen kalitede değilse düzeltilir. Bunun sonucunda bakım periyotlarının arası açılır, yıl boyunca daha az bakım ihtiyacı doğar.

1.6. GÜVENİLİRLİK ESASLI BAKIM

Güvenilirlik esaslı bakım, periyodik, kestirimci ve proaktif bakım metotlarının bir birleşimidir. Bu metotta makine sağlığı hakkında bilgi verecek birden fazla ölçüm ve analiz teknolojisi ile arıza kaynağı ve gelişimi doğrulanır. Tüm gelişmeler tek bir noktadan izlenir, acil iş emirleri aynı bünyede açılır. Bakım yönetim programları ile haberleşerek iş talepleri iletilir ve sonuçları izlenir. Ölçümler ile izlenebilecek arızalar kestirimci bakım bünyesinde, ölçümle izlenemeyecekler koruyucu bakım bünyesinde takip edilerek çözümlenmeye çalışılır, uygulanan bakımın kalitesi proaktif bakımla kontrol edilir.

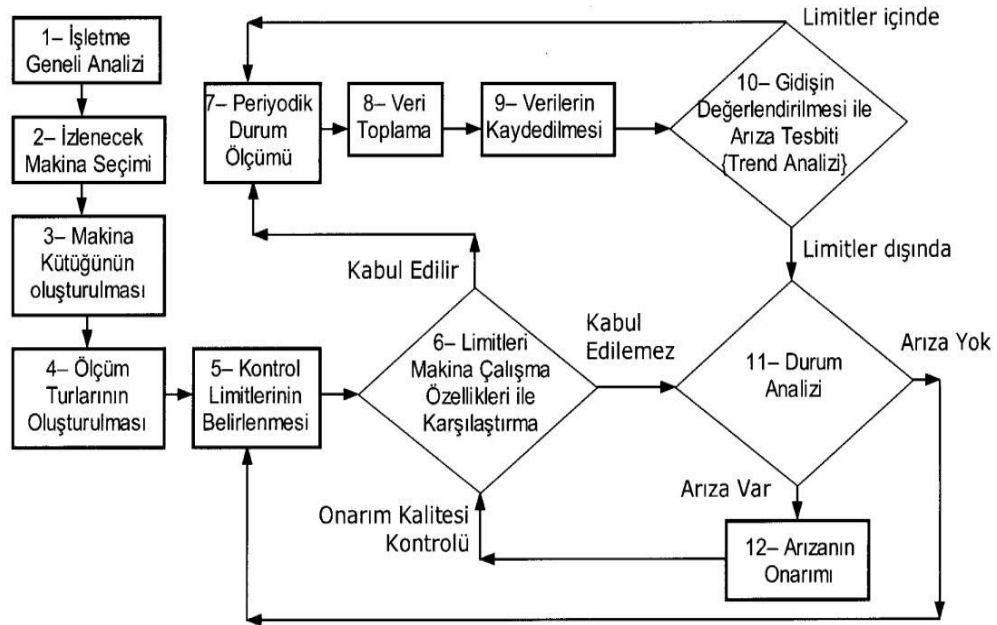
1.7. KESTİRİMCİ BAKIM KAVRAM VE TEKNİKLERİ

Kestirimci bakım, her geçen yıl kabul edilirliliğini arttırarak endüstrideki yerini sağlamlaştırmaktadır. Temelde kestirimci bakım, gerilim altındaki yada hasar başlangıcındaki parçaları belirlemeye dayanır. Kestirimci bakım çalışmalarında temelde dört metot kullanılır; titreşim analizi, kızıl ötesi termografi, yağ analizi (triboloji) ve ultrasonik analizler. Bu tekniklerin tümü bakım yapmanın gerekli olduğu zamanı bildiren farklı veri setlerine sahiptir, ancak günümüzde en yaygın olarak kullanılan teknik titreşim ölçümüdür. Bu teknikle ölçüm yapılırken, makinelerin sabit titreşim frekansları olduğu gerçeği baz alınır. Arıza yapabilecek makinelerin ise farklı bir titreşim frekansına yada sabit frekanslarda farklı gerilimlere sahip olduğu bilinir. Makineler çoğunlukla mekanik özelliğe sahip olduğu için, titreşim ölçümü rutin izlemede ve yeni başlayan problemleri açığa çıkarmada etkilidir. Bununla beraber bu yöntem ısı kaybı olan bölgeleri, yağ sızıntısı olan durumları ve elektriksel arızaları teşhis edememektedir. Bu yüzden verimli bir erken uyarı özelliği taşıyan bakım sisteminden söz edebilmek için, bakımdan sorumlu yönetim, birkaç tekniği bir arada uygulamak zorundadır. Ancak yinede bu bakım

yöntemlerinin bazı dezavantajları bulunur. Bunlar; makinelerin üzerinde sık kontrol yapmanın getireceği olumsuzluklar, parça değiştirmeler esnasında oluşan hatalar, periyodik kontrollerde makinelerin üretimden alınması ve kontroller için yapılan parasal yatırımlardır[2].

Bu bakım yönteminde ana prensip, üretim sırasında yapılan ölçmelerle makinelerin performansını izleyerek ne zaman bakıma gerek olacağına karar vermek ve kısa bir süre üretime ara vererek daha önceden belirlenen arızayı onarmaktır. Makinenin karakteri ve çalışma koşulları göz önünde bulundurularak yapılan program çerçevesinde, üretimi durdurmadan kontrol ve ölçümler yapılır. Bu ölçümler değerlendirilerek makinenin çalışma şartları hakkında fikir oluşturulur ve önceki ölçümlerle karşılaştırılarak varsa hasarın gelişmesi izlenir. Hatayı oluşturan sebep/sebepler belirlenerek hata teşhisi yapılır. Ölçülen ve izlenen parametreye bağlı olarak hata belirleme işlemi değişik kriterlere dayanarak yapılır. Hata teşhis edildikten sonra, gerekli yedek parça temin edilerek üretim durdurulur ve mümkün olan en kısa zaman süresinde bakım yapıp, tekrar üretime devam edilir[8].

Bir kestirimci bakım akış şeması, Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Kestirimci bakım akış şeması

1.8 KESTİRİMCİ BAKIM YÖNTEMLERİ

1.8.1.Yağ Analizi

Mekanik parçalar temelde 10 mikronluk bir yağ filmi üzerinde çalışırlar ki bu kalınlık yaklaşık olarak bir kan hücresinin çapına eşittir. Bu yağ filminin ortadan kalkması arızanın oluşması anlamına gelir. Bu yağ filminin temiz ve sağlıklı olması son derece önemlidir. Bu amaca ulaşılmasını sağlayan kestirimci bakım metodu yağ analizi olarak adlandırılır. Buna ek olarak, insan vücudundaki kan gibi, makinelerdeki yağ da makinenin sağlığı ile ilgili olarak çok önemli ipuçları verir. Yağ analiziyle bu ipuçları analiz edilerek operasyonları ve bakım kararlarını etkileyen çok önemli bilgilere dönüştürülür.

Yağ analizi sadece kullanılan yağa yapılmamalıdır. Çoğunlukla, işletmeye yeni giren yağın temiz ve standartlara uygun olduğu gibi bir kabul yapılır, ancak bu kabul son derece tehlikeli ve yanıltıcıdır. Gelen yağın uygun özelliklerde ve temiz olup olmadığını anlaşılması için, ilk girişte yağdaki parçacık sayımı yapılmalı, nemi ve viskozitesi kontrol edilmelidir. Aynı şekilde, stokta bekleyen yağlar da düzenli olarak kontrol edilmelidir. Bununla birlikte, yapılan rutin kontrollerle makinelere hatalı yağ eklenmesi, sistemdeki keçe ve sıyrıcıların düzgün çalışmaması yada aşınması sonucu sisteme su veya pislik girmesi, bakımı yapılan, yeni yada tamir edilen makinelerin haznelerindeki yağın parçacıktan arınmamış veya kirli olması gibi problemlerin önüne geçilir[10].

Yağ analizinde yapılan parçacık sayımı ile makinedeki filtre arızaları, aşınma ve sürtünme gibi problemler tespit edilebilir. Eğer metal parçacık sayımı da yapılırsa, tespit edilen parçacıkların kir mi, yoksa keçe parçacıkları yada aşınma sonucu oluşan metal parçacıkları mı olduklarını kolaylıkla belirlenebilir ve arıza kaynağının çok daha çabuk bir şekilde tespiti sağlanabilir, metalin metale sürtmesinin temel nedeni olan düşük viskozite periyodik olarak izlenebilir, yağın içindeki kesif parçalar ve su miktarı belirlenerek yağın kimyasal değerleri takip edilir ve özelliklerini kaybetmeye başladığı noktada, bir arıza kaynağı tespit edilmişse (filtre arızası, keçe yırtılması, yağa soğutucu karışması vs.) yağ değişimi ve/veya arızanın giderilmesi için planlama yapılarak makine bakıma alınır[11].

İşletmelerde, yağ değişim takvimleri hazırlanırken çoğunlukla göz ardı edilen birçok gizli maliyet bulunmaktadır. İşletmelerin çoğunda, yağ değişim maliyeti, atık yağın uzaklaştırılmasının (ISO 14001 çevre yönetim sistemine göre), yeni yağın ve yağ değişim işçiliğinin maliyetlerinin toplamına eşit olarak alınır, fakat bunlar buzdağının sadece görünen kısmıdır. Bu maliyete ek olarak kullanım ömrü daha dolmamış olan yağın atılmasının, duruş süresinin, üretim kaybının, taşımının, yağın stok maliyetlerinin de hesaplanması gerekir. Ayrıca yağ değişimi sonrasında yanlış yağ kullanımı, yağ tankını eksik yada fazla doldurma, tezgâhı yağsız çalıştırma, yağa pislik bulaşması gibi sorunlar dolayısı ile tezgâhın arıza yapabileceği gerçeği de göz ardı edilmemesi gereken bir risktir.

Yağ değişimi, analizlerde göz önüne alınan testlerinin sonuçlarına bakılarak gerektiğince yapılır. Yağ analizi için yüzlerce çeşit test metodu bulunmakla birlikte, temelde iki çeşit analitik analizden bahsedebiliriz. Bunlardan ilki yağın fiziksel özellikleriyle diğeri kirlilik seviyesi ile ilgilidir. Fiziksel özellikler yağın durumunu çok iyi bir şekilde belirtir ve genellikle yağ değişimine karar verilmesinde kullanılır. Sıklıkla kullanılan fiziksel testler, viskozite, TAN ve TBN (yağdaki katkı maddelerinin sayımı) testleridir. Kirlilik seviyesi testleri ise genelde radyatör kaçakları yada filtre arızalarının bulunmasında kullanılır. En sık kullanılan kirlilik seviyesi testleri yakıt derişimi, parçacık sayımı, yağdaki su miktarı ve metal aşınma analizidir.

Yağları, motor yağları ve hidrolik yağlar olarak ikiye ayırırsak, bu ayrımın sebebi motor yağlarında yanma sonucu kimyasal değişimler olur iken hidrolik yağlarda bu tarz kimyasal değişimler olmamasıdır, motor yağlarında yapılacak yağ analizleri sonucunda, sağlıklı yağ kullanımı ile motor ömrü artar. Ayrıca yapılan analizler sonucunda motor problemleri, çok daha ciddi boyutlara ulaşmadan fark edilebilir. Motoryağı analiz programlarında, temelde şu özelliklere bakılır.

1.8.1.1. Motor yağı analizi

Viskozite: Motor yağının bozulmaya başladığını gösteren temel göstergelerdendir. Genellikle 37°C deki SUS (Saybolt Universal Seconds) birimi ile gösterilir. Viskozitedeki %25'lik artış, yağın kullanılabilir ömrünün tamamlandığını gösterir.

Yağdaki Katkı Maddelerinin Sayısı (TBN): Birçok motor yağının içine, özelliklerini iyileştirici katkı maddeleri eklenerek daha uzun süre çalışması sağlanmaya çalışılır. Motor yağı formülleri çok çeşitli olduğundan dolayı TBN analizi sonuçları, analiz edilen yağın bilgi formundan kontrol edilir. Bilgi formundaki değerlere göre oluşacak %50'lik bir azalma, yağın bozulmaya başladığını gösterir.

Yağ Durum Analizi: Yağ durum analizi, analiz programlarının önemli bir bölümünü oluşturur. Yağdaki bozulmayı izleyerek, parçalarda oluşması muhtemel hasarların önüne geçilmesine yardımcı olur. Kirlenme, sıcaklık ve oksijene maruz kalması, yağın bozulmasına neden olur. Özellikle motor yağı, sülfür, nitrasyon, yanma ürünleri, yüksek sıcaklıklar, yanma sebebi veya yoğunlaşmadan kaynaklanan su nedeniyle bozulabilir. Bu analiz yapılmadan önce, temiz bir yağ örneği analiz edilerek veri bankasına kaydedilmelidir. böylelikle, analiz edilecek olan kullanılmış yağdaki değişimlerin karşılaştırılabileceği bir numune elde edilir.

Yağ durum analizi ile, kullanım sırasında yağın ne kadar bozulduğu ve istenilen kriterlere uygunluk derecesi saptanabilir.

Yağ durum analizinde incelenen parametreler ve bu parametrelerin motorda sebep olabileceği arızalar şu şekilde özetlenebilir.

- i. Kurum:** Sadece motor yağında bulunur ve tam olarak yanamayan yakıtın çözünemeyen artıklarıdır. Yüksek konsantrasyondaki kurum, birbirine temas eden yüzeylerde yağlanmayı azaltarak aşınmaya neden olur.
- ii. Oksidasyon:** Yüksek yağ sıcaklığı, motor yağı soğutucusundan kaynaklanan antifriz, bakırın varlığı ve yağ değişim süresinin uzaması, oksidasyonu hızlandıran etkenlerdir. Oksidasyon yağı kalınlaştırarak asit oluşumuna sebep olur, yağlama kalitesini azaltır ve motorun ömrünü kısaltır.
- iii. Nitrasyon Ürünleri:** Nitrasyon ürünleri bütün motor yağlarında ortaya çıkar. Yanma ürünlerinden gelen nitrasyon bileşikleri yağı inceltirerek yağlama yeteneğini azaltır.

- iv. Sülfür (Kükürt) Ürünleri/Asitler:** Sülfür (Kükürt) yakıtta bulunur ve tüm motoru etkiler. Yanma sırasında yakıttaki sülfür oksitlenir ve suyla karışması sonucu sülfürik asit meydana gelir. Asit bütün motor parçalarını aşındırır.
- v. Antifriz:** Antifriz, yağın hızla oksitlenmesine neden olur ve genellikle soğutma sistemindeki bir kaçağı işaret eder. Yağda antifrizin en az miktarı bile kabul edilemez.
- vi. Su:** Yağlar ortalama olarak içlerinde %1 kadar yağ çözebilirler. Eğer analiz sonucunda, yağda su olma ihtimali tespit edilirse, hot plate metodu ile yaklaşık su miktarı belirlenir. Su miktarının %0.5'in üzerinde olması aşırı yüksek seviye olarak kabul edilir.
- vii. Yakıt:** Yağa yakıt karıştığı, "flash test" kullanılarak doğrulanır. Yağa yakıt karışması genellikle yanlış ateşleme zamanı, motorun uzun süre rölantide çalışması, hasarlı enjektör, pompa veya yakıt borularından kaynaklanır.

Aşınma Miktarı Analizi: Aşınmış metal parçalarının analizi hangi motor parçasının arızalandığı konusunda bilgi verir. Birçok testte, 10 mikron büyüklüğe kadar olan bakır, demir, krom, kurşun, alüminyum, molibden, silikon ve sodyum elementlerinin varlığı araştırılır. Yağ içindeki elementlere bakılarak motor elemanlarındaki aşınmalar tespit edilir[13].

Endüstriyel hidrolik yağlarda ise periyodik yağ analizi daha uzun tezgâh ömrü, daha az duruş ve daha fazla verim anlamına gelmektedir. Etkin bir yağ analizi programı aşağıdaki testleri içermelidir.

1.8.1.2. Hidrolik yağ analizi

Viskozite: Hidrolik yağındaki bozulmayı gösteren temel göstergelerden biri viskozitedir. Viskozitede oluşacak %10 seviyesindeki bir artış, yağın ömrünü tamamladığını gösterir.

Asitlik (TAN): Yağdaki bozulmayı ölçmeye yarayan bir başka metottur. Hidrolik yağları bozuldukça, asidik yan ürünler üretmeye başlarlar. TAN, bir gram örneği nötr hale getirmek için gereken potasyum hidroksit oranını gösterir.

Su Miktarı: Hidrolik sistemlerin en büyük problemlerinden biride yağa su karışmasıdır. Su sadece kötü bir yağlayıcı değil, aynı zamanda korozyon hızlandırıcıdır. Petrol türevi birçok yağın %1 oranında su çözebilme kapasitesine sahip olduğu göz önüne alınırsa, %0,2 uygun bir uyarı noktası olarak gösterilebilir.

Parçacık Sayımı: Temiz yağ, bir sistemin sağlıklı çalışmasının en önemli şartlarından biridir. Yağ her ne kadar temiz görünse de, içinde sistemin aşınmasına neden olacak, verimini ve performansını düşürecek bir çok küçük parçacık barındırır. Parçacık sayımı, 2 ile 100 mikron arasındaki tüm parçaları sayarak gruplandırır ancak metal olup olmadıklarını tespit edemez. Bu sebeple genellikle aşınma miktarı analizi ile birlikte kullanılır ve yağdaki hortum, conta, o-ring, keçe vs. parçacıklarının tespitinde son derece etkili bir araç haline gelir.

1.8.2. Akışkanları Ayırt Etmede Kullanılan Fiziksel Testler

Akışkanları ayırt etmede kullanılan yüzlerce farklı test türü vardır. Ancak bunlardan bir kısmı üretici ve satıcılar tarafından hem ekonomikliği hem de daha doğru sonuç vermesi ve kullanışlı olması dolayısı ile tercih edilir.

1.8.2.1. Görsel ve fiziksel testler

- i. Görünüm:* Yapılabilecek en kolay testlerdendir. Yağın kirliliği ve durumu ile ilgili birçok ipucu içerir. Bununla birlikte, sonuçları sübjektiftir, temizken koyu olan yağlarda sonuç vermesi çok zordur, kirlilik seviyesini ve yağdaki parçacıkların cinsini veremez.
- ii. Koku:* Genellikle yağların çok ayırt edici bir kokuları yoktur. Yağda fark edilecek normal dışı kokular yağın bozulmaya başladığının göstergesidir. Bu metodun sonuçları da sübjektiftir ve testi yapanın koku duyusunun

gücünden etkilenir. Ayrıca kapalı tanklar ve saklama kapları ilk açıldıklarında, içeride biriken buharın oluşturduğu güçlü koku test edeni yanıltabilir.

iii. Viskozite (Düşen kütle testi): Yağ analizlerinde yapılan en önemli testlerden birisidir. Testte viskozitesi bilinen bir yağ ile test edilecek yağ özdeş kaplara konularak içlerine bir kütle atılır ve kütlelerin düşüşü gözlemlenir. Kütlelerin arasındaki mesafe, viskozitenin hesaplamasında kullanılır. Bu test genelde %1 yanılma payı ile sonuç verir.

iv. Kurutma Kâğıdı Testi: Karter yağlarındaki çamur oluşumunu tespit etmek için kullanılan bir testtir.

v. Su İçerme (Çatlama testi): Yağda bulunan küçük miktardaki su (~%0,1) yağ içerisinde kendini pek belli etmez fakat 120-125°C deki sıcak bir yüzeye damlatılırsa, çatlama benzeri bir ses çıkararak hızla buharlaşır. Oldukça subjektif olan bu test yağdaki su miktarını tam olarak belirtmez.

vi. Parçacık Sayımı (Benek Testi): Benek testi, parçacık sayımında kullanılan en basit testlerden biridir. Yaklaşık 100 ml hacmindeki yağ, standart boydaki bir filtre kâğıdından geçirilir. Kâğıt kurutulurken, oluşan benek, parçacık seviyeleri bilinen resimler ile karşılaştırılır. Bu test sonucunda, yağdaki parçacık boyutu ortaya çıkar ancak kompozisyonu tam olarak belirlenemez.

1.8.2.2. Metal aşınma analizi:

Bu analiz iki başlık altında incelenebilir.

i. Metal Aşınma Analizi (Atomik Soğurma Yöntemi): Bu metotta, yağ örneği yüksek sıcaklıkta yakılarak metal parçalarının ne kadar enerji soğurduğunu bulunur. Analiz edilen her metal için örnek, kalibreli

cihazdan tekrar geçirilir. Bu metotta analiz edilen metal başına doğruluk oranı çok yüksektir ancak çok zaman alır.

ii. Metal Aşınma Analizi (Emisyon Spektrometresi Yöntemi): Bu metotta da yağ örneği yüksek sıcaklıkta yakılır ancak bu kez cihaz ışınım seviyelerini ölçer. 18 farklı aşınma parçası için ölçüm yapılabilir. Analiz süresi kısadır ve ppm mertebesinde doğru sonuçlar verir[15].

Yağ analizi yapanlar için yağda bulunan parçacıkların boyutları, yüzey alanları, sertlikleri, yoğunlukları, Şekilleri, kompozisyonları, kutupsallıkları ve manyetik etkilenebilirlikleri son derece önemlidir.

Doğru ölçü, yapı ve sertlikteki parça, zamanını bekleyen potansiyel bir tehlikedir. Bu özellikteki iki parça, riski doğru orantılı olarak artırır. Aslında, yüzeyden kaldırılan metal miktarı, bu metali kaldıran parçacığın kütlesinin 4-10 katı kadar olabilir. Filtre edilmeyen banyo ve sıçrama tazyi yağlama sistemi kullanan makinelerde risk çok daha fazladır. Ayrıca, bu parçacıkların yeni parçacıklar oluşturdukları ve oluşan bu parçacıklarında çevrime aynı şekilde devam ettikleri unutulmamalıdır. Bu sebeple parçacık sayısının kontrol altında tutulması makine güvenilirliğinin sağlanmasında oldukça yararlı bir stratejidir[16].

Analizi yapılacak örneklerin alındıkları zaman, örnekleme periyodu, örnekleme yerleri, alınma teknikleri ve dokümantasyonu oldukça önemlidir. Yağ analizi için örnekler genelde ya tezgâh çalışırken, yada kapatıldıktan hemen sonra alınır. Bu sayede yağ içinde taşınan aşınmış parçalar ile kirler çökmemiş ve yağa karışmış su ile soğutma sıvısı yağdan ayrılmamış olur[15].

Temelde, yağ analiz periyotlarının belirlenmesinde 3 temel teknik vardır. Bunlar; problem oluşunca örnekleme, kontrol için rasgele örnekleme ve trend analizi için örnekleme. Bu metotların tamamı kullanılıyor olsa da genel eğilim maliyet üzerine olduğundan problem oluşunca örnekleme daha sık tercih edilen metottur[15].

Örnek alma teknikleri de yağ analizi sonuçlarını çok büyük oranda etkiler. Bu nedenle yağ örneği alınırken kullanacağımız teknik, örnek şişesinin içine en fazla miktarda bilgiyi alınırken, analiz sonuçlarını etkileyecek çevresel etkileri mümkün oldukça dışarıda tutmalıdır[17]. Özellikle maden bölgeleri, şantiyeler, dökümhaneler, rüzgârlı sahalar ve yere yakın örnek alma noktaları gibi yüksek riskli yerlerden

alınan örneklerin tozla kirlenmemiş olduğundan emin olunmalı, gerekirse birden fazla örnek alınmalıdır.

1.8.2.3. Sonuçların yorumlanması

Yağ analizinin temel amacı ekipmanın ve ekipmanda kullanılan yağın durumu hakkında bilgi edinmektir. Bu bilgiler beklenmedik arızaların önlenmesinde, yağ değişim zamanlarının ve makine ömrünün uzatılmasında kullanılır.

Bazı durumlarda analitik veriler problemi açıkça gösterir. Örnek olarak, yüksek düzeydeki su, bor ve/veya sodyum, antifriz kaynaklı bir kaçak olduğunun göstergesidir, fakat birçok durumda veriler kesin bir sonuca varmayı sağlamaz. Bu tip durumlarda daha sağlıklı sonuçlara ulaşabilmek için o an alınan örnek ile önceki örnekler karşılaştırılır. Yağ analizinde göz ardı edilmemesi gereken önemli bir nokta vardır, her makine kendi şartlarına göre aşınma miktarı gösterecektir, bu sebeple aynı şartlarda çalışan makinelerde farklı sonuçlar görülebilir. Karşılaştırma yapılırken mümkün oldukça aynı tezgâhın önceki ölçümleri kullanılmalı, benzer şartlarda çalışan makinelerin ölçümleri sadece zorunlu kalındığında bir fikir vermesi için kullanılmalıdır.

Sonuçların güvenilirliğini arttırabilmek adına veriler, benzer uygulamalardan alınan örneklerin verileri ile karşılaştırılabilir. Karşılaştırma, tezgâh tiplerine, çevre ve iklim koşullarına veya kullanım şartlarına göre yapılabilir.

Analizlerin tümünde olduğu gibi deneyim, yorumlamada doğruluğu arttırmadaki en önemli etmendir. Analizi yapacak kişinin deneyimi ne kadar fazla ise, sonuçların doğruluğu o kadar yüksek olacaktır.

Motor Yağı: Motor yağının özelliğini kaybetmeye başladığını gösteren en temel gösterge viskozite artışıdır. Bu artışın en önemli sebepleri, yağ içerisinde bulunan daha hafif bazdaki yağ parçacıklarının buharlaşması ve bozulmaya başlayan ürünlerin yağ içinde kimyasal olarak birleşerek uzun polimer zincirleri oluşturmasıdır. Motor yağları için viskozitedeki %25’lik bir artış, yağın ömrünü tamamlamaya başladığının en temel göstergesidir. Motor yağı çalıştıkça viskozitesi

yavaşça artar. Ancak viskozitede bir düşüş görülürse yağa yakıt karışmış olabileceğinden şüphelenilmelidir.

Birçok motor yağına yağlamayı arttırıcı, oksidasyon ve korozyonu yavaşlatıcı ve çamurlaşmayı engelleyici ajanlar katılır. Kritik ajanların seviyesi, yağın korozyonu önlemeye devam etme yeteneğini ölçen toplam baz sayısı (TBN) gözlemlenerek belirlenebilir. TBN deki düşüş, ajanların bozulmaya başladığının göstergesidir. Genellikle TBN de %50'lik bir düşüş gözlemlendiğinde yağ değişimi yapılır. Her yağdaki katkı miktarı farklı olduğundan ajan miktarı da farklıdır, bu sebeple yağın temizken ki TBN değeri bilinmelidir. Bu değer malzeme bilgi formundan alınabileceği gibi spektrografik metal analizi ile de belirlenebilir.

Normal metal analizinde birçok yağda ortak olarak bulunan ajanlardan çinko, fosfor, kalsiyum ve baryum miktarına ppm olarak bakılır. Ppm deki %50'lik bir düşüş yine değişimin gerekliliğini gösterir.

En önemli motor yağı kirleticilerinin başında su ve soğutucu gelir. Bunlar, yağın yağlama kabiliyetini azaltır, korozyona ve çamurlaşmaya sebep olur. Yüksek sıcaklıklarda su buharlaştığı için bazen sadece yağdaki su miktarına bakmak, gerçek sonucu bize vermez, zira %0,05'in altındaki değerler testlerde genellikle görülemez. Bu yüzden yağdaki kirlilik analizi yapılırken glikol varlığına ya da bor veya sodyum seviyesi spektrografisine bakılmalıdır. Yağların bazıları bor ve sodyum ajanlar içerdiklerinden spektrografik değerlerindeki belirgin bir değişim, soğutucu kaçacağını gösterecektir.

Toz ve pislikler motor yağlarının en genel kirleticileridir ve yüksek miktarları motor aşınmalarına neden olur. En kolay tespit metotları spektrokimyasal analizdeki silikon oranına ve başlangıçtaki değerine göre değişimine bakmaktır. Kirlilik seviyesi, motor tipine ve çalışma yerlerine göre değişmekle birlikte, eğer çok büyük veya hızlı bir değişim varsa yağ deposu kapağının açık olmasından yada filtrelerin iş görmediğinden şüphelenilebilir.

Hidrolik Yağı: Hidrolik yağının bozulduğunu gösteren göstergelerin başında viskozite gelir. Normal şartlarda viskozite artışı oldukça yavaştır. Genellikle 65°C sıcaklığın altında çalışan sistemlerde yağ ömrü binlerce saat olur. Viskozitede oluşacak %10'dan fazla bir artış yağın ömrünü tamamladığını işaret eder. Viskozite

artış trendinde ani bir hızlanma yada düşüş olması durumunda, sistemde sıcak bir nokta olduğundan, soğutma sistemi arızasından, yağa yakıt veya başka sıvıların karışmasından şüphelenilmelidir. Daha kesin bir yargıya varmak için toplam asit sayısı (TAN) kontrol edilmelidir. Hidrolik yağı bozulmaya başladığında asidik yan ürünler üretmeye başlayacağından, TAN sayısında önemli bir değişme olmadığı halde viskozitenin ani değişiminde yağa yakıt yada başka bir akışkan karışmasından şüphelenilmelidir.

Kir, hidrolik yağı için en önemli tehditlerdir. En genel kirleticiler su, pislik, keçe parçaları, yakıt sızması ve hatalı hidrolik yağı eklenmesidir.

Su, yağlamayı azaltması ve korozyona sebep olması sebebi ile en tehlikeli kirleticilerin başında gelir. Petrol türevi yağlar içlerinde en fazla %1 oranında su çözebilir. Su, genellikle analiz örneğinin alınmadığı depo tabanında çökmüş vaziyette bulunur, bu yüzden analiz sonucu elde edilen değer genellikle toplam su miktarını vermez. Su, petrol türevi yağlara beyazımsı bir krema rengi verir ve göz ile ayırt edilebilir. Yapılan analizler sonucunda, yağdaki su miktarı ppm cinsinden belirtilebilse de, daha kesin bir sonuç veren su aktivitesinin ölçülmesi daha doğru olacaktır. Su aktivitesi a_w , bir maddedeki su miktarının o maddenin alabileceği su miktarına oranıdır[18].

Parçacık sayımı, tezgâhın aşınma durumu ile ilgili oldukça önemli bilgiler verir. Parçacık sayımında dikkat edilmesi gereken en önemli unsur, her makinenin kendine has, sistemin normal olarak çalıştığı bir parçacık sayısı olmasıdır. Sistemlerde yeni oluşan parçacıklar filtreler tarafından yakalanan veya ölü noktalarda takılı kalan parçacıklarla yer değiştirir. Sistemlerin normal parçacık sayısının bulunabilmesi için, 3–6 aylık periyotlarla analizler yapılmalıdır. Bu noktada, analizi yapanların deneyimi de oldukça önemlidir. Sonraki testlerde, parçacık sayısındaki değişim kolayca izlenir. Parçacık miktarı ve boyutu, problemin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Yapılacak detaylı analizlerle parçaların kum, toz gibi dış kaynaklı mı, yoksa metalik yada keçe gibi iç kaynaklı mı oldukları belirlenir. Birçok durumda kirlilik 25 mikronluk büyük parçalar halinde başlar ve ufalanarak 10 mikrondan daha küçük ve çok daha tehlikeli parçacıklar haline dönüşür.

Yağ analizinin kestirimci bakım programına dahil edilmesiyle makinelerde oluşan yağ kaynaklı sorunların önüne geçilir, tezgâh ömrü ve verimlikte artış

sağlanır. Yapılacak analizin diğerk bir faydası da, periyodik bakımlarda ömrü dolmadan atılan ve daha uzun süre kullanılabilcek yağların ortaya çıkardığı ekonomik kayıpların ve oluşan çevresel sorunların, yağ tüketiminin azalmasına paralel olarak azalacak olmasıdır.

Yağ analizinin uygulanmasının önündeki engeller yağ analizinin maliyeti ve yağ örneğinin doğru alınamamasıdır. Bu analizi yapacak cihazların maliyeti onbinlerce doları bulur. Bununla birlikte doğru örnek toplanması, tezgâhların fiziksel şartları sebebiyle bazen imkansız yakın olabilmektedir, bu da analizin sonuçlarının yorumlanmasında sıkıntılara neden olur.

1.8.3. Ultrasonik Testler

Ultrason ile çeşitli ölçümler yapılmasının yaklaşık 40-50 yıllık bir geçmişi bulunmaktadır. Günümüzde endüstriyel kullanım yönünden ultrason, basınçlı hava kaçaklarının belirlenmesi, buhar kapanları çalışma testlerinin yapılması, rulmanların yağlama ve hasar durumunun kontrolü, elektriksel sistemlerde ark-korona dinlenmesi, kalınlık ölçülmesi, boru ve tesisatlardaki korozyon ve erozyonun tespiti gibi geniş bir alanı kapsamaktadır[19].

Tanım olarak ultrason, insan kulağının duyma eşiğinin üzerindeki seslere verilen isimdir. İnsan kulağının duyma eşiği 20 Hz ile 20 kHz arasındadır. Genel olarak 16,5 kHz üzerindeki sesleri birçok insan duyamaz. Duyulabilir sınırdaki seslerin dalga boyu yaklaşık 1,9 cm ile 17 m arasında değişir. Ultrason cihazları ile yakalanan seslerin dalga boyu ise 0,3-1,6 cm arasındadır. Bu değerler insan kulağı tarafından duyulamaz, ama bu frekansları dinlemek için ayarlanmış bir cihaz tarafından rahatlıkla tespit edilebilir ve bir dizi elektronik filtreleme işleminden sonra, bu sesler insan kulağı tarafından da duyulabilir hale getirilebilir. Bu cihazlar temelde iki şekilde bilgi verebilirler. Ultrasonik sesi bir dizi elektronik filtreden geçirdikten sonra, bu sesleri insan kulağı tarafından da duyulabilir hale getirerek çevre gürültüsünü izole eden bir kulaklıkla operatöre ulaştırır yada bir gösterge üzerinde sayısal olarak gösterir.

Ultrason sistemlerinin kullanımını kolaylaştıran önemli bir etkende, ses araştırması yaptığı halde sessiz bir ortama ihtiyacı olmamasıdır. Bunun en büyük

sebebi, işletmelerin yoğun gürültülü ortamındaki seslerin çok büyük bir kısmının duyma eşiğinde olması ve çok düşük miktarda ultrasonik unsur içermesidir. Ultrasonik olarak dinlendiğinde, elektrik motorlarının koronalarının (sargınlarının) çatırdadığı, rulmanların sağlam ise hafif bir hışırtı sesi verirken bozulmaya başlayanların patlama sesleri çıkardığı duyulabilir.

Havadaki ultrasonik sesleri belirleyen sensörle hava kaçakları, vakum, buhar, azot ve bazı soğutucu gazları tespit ederken, sensörü temaslı cins sensör ile değiştirmek şartıyla buhar kapanlarını dinleyip doğru olarak çalışıp çalışmadıkları, bir yataktaki rulmanın arızalı olup olmadığı tespit edilebilir. Diğer yandan yağlamanın ne kadar doğru yapıldığı da belirlenebilir. Bu şekilde sadece eksik yağlama değil, aynı zamanda endüstride çok yaygın bir yanlış olan aşırı yağlama sorunu da belirlenmiş olur.

Mekanik analiz ve kaçak tespiti için kullanılan sensörler ses dalgalarını elektrik sinyallerine çeviren piezoelektrik mikrofonlar kullanırlar. Kullanılan ekipmanların göstergeleri dijital yada analog olabilir. Burada bilinmesi gereken, analog göstergelere alınan değerlerin daha kesin olduğudur. Bu tip göstergeler küçük değişimleri bile atlamadan tepki verirler ve daha az enerji harcarlar.

1.8.3.1. Ultrason uygulamaları

- i. **Kaçaklar:*** Basınçlı hava kaçakları, endüstrideki en pahalı enerji kaynaklarından birinin boşa harcanmasına neden olur. Normal bir sistemde üretilen basınçlı havanın %25 ile %35'inin kaçakları karşılamak amacı ile kullanıldığı, başka bir anlatımla iş yapmadığı göz önüne alındığında, boşa giden parasal kaynağın büyüklüğü ortaya çıkmaktadır. Kaçak noktalarında oluşan türbülans kuvvetli ultrasonik dalgalar yayar. Yayılan bu dalgalar, çevre gürültüsünden farklı olarak ultrason tarayıcıları ile bulunabilir. Uygulama sadece hava kaçaklarıyla sınırlı değildir, basınçlı her türlü gaz kaçağı ultrason uygulamalarıyla tespit edilebilir[20].



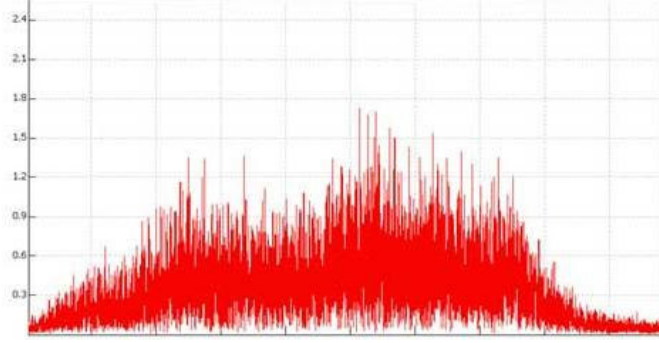
Şekil 1.5. Ultrason ile kaçak tespiti

Sanayide, özellikle enerji üretimi, rafineriler, kimya, petrokimya, gıda, paketlenme ve kağıt endüstrisinde ayrıca hastanelerde kullanılan vakumun (negatif basınç) sürekliliği son derece önemlidir ve bu sistemlerdeki vakum kaçaqları da basınçlı hava kaçaqları kadar maliyetlidir. Bu sebeple vakum kaçaqları da basınçlı gaz sistemlerinde olduğu gibi ultrasonik metotlarla tespit edilerek giderilmelidir[21].

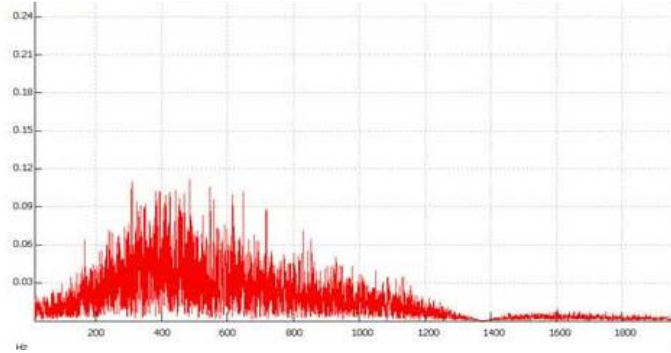
- ii. Rulmanların izlenmesi:* Rulmanlar, bir çok tezgâh için en kritik elemandır. Bozulmaları halinde tespit edilip temini ve değiştirilmesi de dahil olmak üzere saatler, hatta günler sürecektir duruşlara neden olurlar. Yapılan araştırmalar yeni takılan rulmanların %30'unun montaj hatası yada şafttaki ayarsızlık yüzünden arızalandığını, ömürlerinin 2-5 kat arası azaldığını ve rulmanların %10'unun takıldıklarından itibaren ilk 6 ay içerisinde arızalandıklarını göstermektedir[22]. Rulman bilye ve makaraları dönüşleri sırasında, bilezikleri ile olan temasları sonucunda ultrasonik sesler çıkarırlar. Doğru olarak çalışan ve yeteri kadar yağlanmış bir rulmanda bu sesler hafif hışırtı halinde ve az iken, az yağlama yapılmış bir rulmanda güçlü bir çıtırtı yada gıcırtı sesi duyulur. Fazla yağlanmış rulmanlardan ise hiç ses alınmaz. Rulmanlar bozulmaya başladıkça, oluşan hasarın şekline göre tırmalama, tıkradama yada sıyrılmaya sesi gibi çeşitli sesler alınır. Bu ultrasonik seslerin takibi sonucunda rulmanların durumları ile ilgili bilgi edinilebilir ve ayrıca takılırken yapılmış olabilecek montaj hataları tespit edilerek ileride daha büyük sorunlara neden olması engellenebilir. NASA'nın yaptığı araştırmalar

ışığında, bir önceki ölçüme göre 12dB'lik bir ses artışıyla birlikte çattırtı seslerinin de algılanması rulmanın arızalanmaya başladığını göstermektedir.

Yapılan deneysel bir çalışmada, yağlama durumları hariç benzer şartlarda çalışan 2 rulmanın ses örnekleri alınmıştır. Şekil 1.6'da görülen grafik yağsız çalıştırılan rulmana aittir. Bu grafikteki yüksek tepecikler yağlanmaya ihtiyacını göstermektedir. Şekil 1.7'de yüksek tepecikler görülse de, genlikleri ve sayıları az olduğundan, yağlama durumunun iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 1.6. Yağlanmamış Rulman



Şekil 1.7. Yağlanmış Rulman

Periyodik olarak yağlanan rulmanlardaki bozulma riski, duruma dayalı olarak yağlanan rulmanlara göre çok daha fazladır. Periyodik olarak yapılan yağlama genellikle eksik yada fazla olacaktır ki, her iki durumun da rulman üzerindeki etkisi olumsuzdur. Yağlama esnasında, doğru miktarda yağlama yapılabilmesi açısından gres tabancası ile ultrasonik sensör birlikte kullanılmalıdır (Şekil 1.8). Eşzamanlı çalışmalarını sağlamak açısından

akustik yağlama adaptörü ile birleştirilir ve bu sayede doğru yağ miktarının ayarlanması sağlanır[23].

Doğru yağlama miktarı, rulmanın temel ses seviyesine inene kadar gres yağı uygulamaktır. Eğer rulmanın temel ses seviyesi bilinmiyorsa, sesin düşüp yeniden yükselmeye başladığı yere kadar gres yağı uygulanır ve bu noktada durulur. NASA'nın yaptığı araştırmalar ışığında, bir önceki ölçüme göre 8dB'lik bir ses artışı yağlanma gerekliliğini gösterir[24].



Şekil 08: Akustik Yağlama adaptörü

iii. Buhar sistemlerinin takibi: Yükselen enerji fiyatları, basınçlı hava gibi buharı da pahalı enerji kaynakları içine sokmuştur. Buhar kapanları, buhar sistemlerinin verimli çalışabilmesi için sistemdeki yoğuşmaları, yoğuşmayan gazları ve havayı, buhar kaybını engelleyerek yada en aza indirerek sistemden çıkaran elemanlardır. Bozuk buhar kapanları sistemdeki buhar kalitesinin düşmesine ve koç darbelerinin oluşmasına neden olur. Kapandan geçebilen buhar görevini yapamadan dışarı çıkmış olacağından boşa giden kaynak olacaktır, ayrıca yoğuşmayan gazlar ciddi bir korozyon sebebidir. İşletmelerdeki buhar kapanlarının %15-20'sinin arızalı olduğu göz önüne alınırsa, bunların bulunması ve arızalarının giderilmesi maliyetlerde önemli bir azalma sağlayacaktır. Buhar kapanları görsel olarak yada kızıl ötesi termografi ile de kontrol edilebilmesine rağmen, bu metotlarla elde edilen sonuçlar yanıltıcı olabilmektedir. Oysa ultrasonik metotlarla yapılan kontrollerde daha kesin sonuçlar alınır[25].

Buhar sistemlerindeki tek kaçak noktası elbette buhar kapanları değildir, çekvalfler, vanalar, eşanjör ve boylerler gibi bir çok devre elemanı da kaçak sebebi olabilir ve bunların tamamı ultrasonik metotlarla tespit edilebilir.

iv. Elektriksel problemlerin takibi: Ultrason, elektriksel problemlerin tespitinde son derece aktif olarak kullanılabilir. Güçlü elektrik alanları, havadaki kirleticilerinde etkisi ile iletim yüzeylerinde malzeme kaybına sebep olur ve bunun sonucunda bu yüzeylerde farklı direnç ve geçirgenlikte lokal bölgeler oluşur. Diğer bir sorun ise koronadır. Korona, tespit edilip önlenmezse hattan hatta, yada hattan yere elektrik atlamaları kaçınılmaz olacaktır. Oluşumunun temel sebebi, iletkenleri çevreleyen moleküllerin iyonlaşmasıdır. Oluşan enerji atlaması sonucu ozon ve azot oksitler oluşur ki, bu da izolasyon malzemelerini bozar, ayrıca korona sonucu ölümlü kazalar meydana gelebilir.

Elektrik arki, sanayide özellikle yangına sebebiyet vermeleri dolayısı ile önemli bir problemdir. Ayrıca iletkenlerin birbirlerine kaynamasına yada iletkenin erozyona uğramasına sebep olur. Korona ile arasındaki en temel farklılık koronanın başlangıç ve bitiş voltajları aynı iken arklarda başlangıç ve bitiş voltajları arasında %50 oranında fark olmasıdır. Yüksek voltaj hatlarındaki bahsedilen problemler gelecekte olabilecek sorunları belirtecek nitelikte ultrasonik ses dalgaları oluşturur ve bu sesler ultrasonik cihazlarla rahatlıkla tespit edilebilir[26].



Şekil 1.9. Korona tespiti

v. Basıncısız sistemlerin kontrolü: Bu grup, içlerinde basınçlı akışkan yada vakum bulundurmayan, bazen basınç altında kalan fakat basınç altında test edilemeyen, depolama tankları, basınçsız boru hatları, kamara ve ambar sızdırmazlık elemanları, ön cam, kapı ve pencere fitilleri, laboratuvarlar, klimalı araçların kabinleri, soğutucu bölmeler, tehlikeli yada zararlı madde taşıyan taşıtların kasaları gibi sistemleri kapsar. Kontrol edilmek istenen boşluğa bir ultrason üretici konur ve kontrol edilecek fitil, conta, bant ve

kaynaklar yine ultrason ölçüm cihazı ile kontrol edilerek kaçak olup olmadığı tespit edilir[27].



Şekil 1.10. Sızdırmazlık Testi

vi. Dişli Kutuları: Dişli kutuları, dişli grubu, rulmanlar ve şafttan oluşan, motor tarafından üretilip aktarılan mekanik hareketin yönünü, dönme momentini ve hızını değiştiren sistemlerdir. Dişli deformasyonu ve aşınma, dişli setlerinin çeşitlerine göre farklı olacaktır. Oluşan ultrasonik titreşimler dişliler ile ilgili olarak bir çok tasarım ve kullanım koşullarına bağlıdır. Bu koşullar; dişli kutusunun tahrik sisteminin türü (elektrik, hidrolik, pnömatik, içten yanmalı motor veya türbin), dişli kutusu ile tahrik sisteminin bağlantısı, dişli kutusu ile dişli grubunun tasarımı ve çevredeki endüstriyel ekipmanlardan yayılan ultrason dalgalarıdır[28].

vii. Yukarıda belirtilenlerin dışında, motor supaplarındaki kirlenmelerden pompaların kavitasyonuna kadar pek çok bakım onarım işinde ve kalite kontrol proseslerinde ultrason ile kontrol ve tespitler yapılabilir.

1.8.4. Kızılötesi Termografi

Kızıl ötesi, ışık tayflarına ayrıldığında, göz ile görülebilen ışınların sınırının üzerinde bir dalga boyuna sahip ışın türüdür. Mutlak sıfırdan (0 °K, -273,15 °C) daha sıcak olan tüm maddeler mutlaka çevresine enerji yayar.

Kızıl ötesi ışınların dalga boyu 0,75 ile 1000 mikron arasındadır. Göz ile görünmese de sıcaklık şeklinde hissedilebilir. Özellikle, teknolojiye gelişmelerinde yardımcı ile bu ışınlar günümüzde fotoğraflanabilmektedir, diğer bir deyişle

görülebilen hale gelmişlerdir. Termal kamera olarak adlandırılan cihazlarla alınan görüntülerde ısı arttıkça sıcak bölgeler beyaza yakın renkler alırken, soğuk bölgeler ise siyah ve siyaha yakın renkler almaktadırlar[29]. Termal kameralar ile yapılan çalışmalarda mutlaka göz önünde bulundurulması gereken konu, termal kameraların sadece yüzeyleri görebildikleridir. Termal kamera ile alınan görüntü sadece dış yüzey sıcaklığıyla alınan görüntüdür, yani maddelerin içini göremez. Bu nedenle dış yüzey sıcaklığı çevre sıcaklığına eşit olan maddeler termal olarak görünmezdirler.

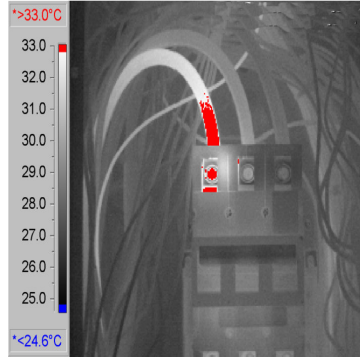
Termografi, potansiyel arızaların bulunmasında yıllardır kullanılan bir metottur, termografinin ortaya çıkmasından bu yana temel uygulaması elektrik sistemleri, elektrik ve elektronik devre bileşenleri ve demir çelik sanayisi olmuştur. Termografi, diğer metotlara göre daha yüksek olan yatırım maliyetleri, işletim ve bakım masraflarının sebebi ile birkaç yıl öncesine kadar sadece uzmanlar tarafından kullanılabiliyordu, son yıllarda kullanımı yaygınlaşan el tipi termal kameralar, makinelerde arızalara yol açabilecek problemleri bileşenlerin sıcaklık artışlarını tespit edip iki boyutlu fotoğraflarını çekerek, gerekli değişimlerin yapılabilmesi için doğru bir bakım planlaması yapılabilmesine olanak tanır. Bu kameralar 0,1 derecelik hassasiyet ile çalışabilmektedir.

1.8.4.1. Termografi ile tanımlanabilecek arızalar.

Elektrik Yüğü: Elektriksel yük dengesizlikleri bir enerji iletim problemi, bir ayak üzerindeki düşük voltaj veya motor sargılarındaki izolasyon rezistansının kaybolması gibi farklı nedenlerden meydana gelebilir. %100 verimli çalışmayan herhangi bir elektrik bileşeninin çektiği akım, dolayısıyla sıcaklığı artar. Küçük bir voltaj dengesizliği dahi bağlantıların kötüleşmesine, motorlar ve diğer yükler aşırı akım çekerken beslenen voltajın miktarının azalmasına ve (ilişkili mekanik gerilim ile birlikte) daha düşük moment değerlerinin iletilmesine ve kısa bir süre sonra da arızaya neden olabilir. Ciddi bir yük dengesizliği bir sigortayı attırarak operasyonların tek bir faza kaydırılmasına neden olabilir. Bu arada dengesiz akım nötr üzerinden dönerek tesisin pik elektrik kullanımından ötürü para cezası almasına neden olacaktır. Yük artışı bazı bileşenler üzerinden ölçümle tespit edilebileceği

gibi, kontaktör yada motorun tamamının termal olarak görüntülenmesi ile de tespit edilebilir.

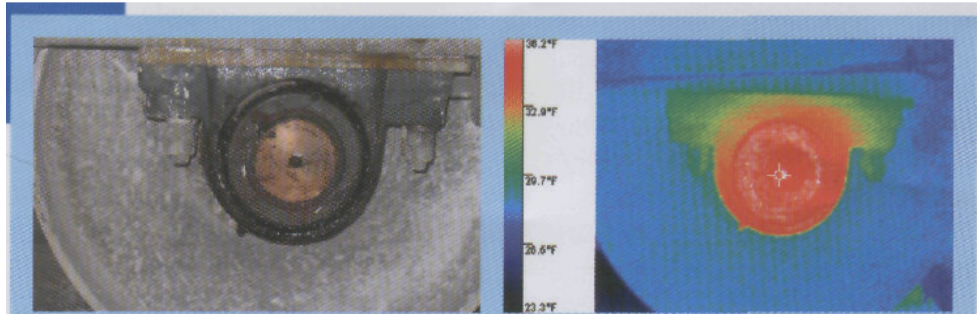
Elektrik Direnci: Termografinin elektrik sistemlerinin izlenmesine son derece uygulanabilir olmasının nedeni, elektrik bileşenlerinin takılır takılmaz kötüleşmeye başlamasıdır. Elektrik bağlantıları en az enerji kaybı ile en fazla gücü transfer edebilmeleri için çok düşük dirençli olarak tasarlanırlar. Yüksek direncin oluşacağı gevşek, kirlenmiş yada paslanmış bağlantılarda sıcaklık artışı gözlemlenir. Elektrik bağlantılarının gevşekliğinin sebebi bir devre üzerindeki yüklenme, vibrasyon, yorgunluk veya yağ kalıntısından hangisi olursa olsun, çevresel koşullar bunların paslanma sürecini hızlandırabilir. Kısaca belirtmek gerekirse, bütün elektrik bağlantılar zaman içinde arızalanmaya giden bir yol izleyecektir. Bu noktalar bağlantı klemensleri olabileceği gibi, şalterlerin ve devre elemanlarının iç bağlantıları da olabilir. Şekil 1.11’de, bu konu ile ilgili olarak bir elektrik paneli bağlantısı örneği verilmiştir. Uluslararası elektrik testleri birliği (NETA) tarafından yayınlan kılavuzlara göre, benzer yükler altında çalışan benzer bileşenler arasındaki sıcaklık farkı 15°C’yi aşarsa derhal gerekli onarım faaliyetlerine başlanmalıdır. Aynı kılavuza göre ortam sıcaklığı ile bileşen arasındaki sıcaklık farkı 40°C’yi aştığında yine gerekli bakım çalışmaları yapılmalıdır.



Şekil 1.11. Elektrik paneli, fazlardan birinde gevşeklik olması durumu

Harmonik Etkiler: Elektronik sistemlerde, aletlerin çalışma prensiplerine bağlı olarak bir çok yüksek frekanslı sinyal oluşur. Bazı durumlarda oluşan bu sinyaller harmonikler oluşmasına, dolayısı ile iletkenlerde ve bağlantılarında bölgesel sıcaklık artışlarına neden olabilir.

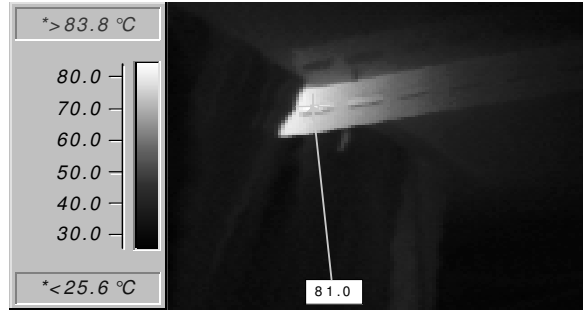
Sürtünme: Sürtünen iki yüzeyin, yetersiz yağlamanın, eksantrik birleştirmenin yada hasarlı bir rulmanın olduğu bir makinede yüksek oranda sürtünme, dolayısı ile ısı yükselmesi olur (Şekil 1.12). Genel olarak vibrasyon analizi, büyük, erişilebilir, görece olarak yüksek hızlı yataklar için seçilen kestirimci bakım teknolojisidir, ancak yataklara sensörlerin uygun olarak yerleştirilebilmesi halinde doğru ve emniyetli bir şekilde yapılabilir. Görece olarak küçük olan (örneğin konveyör silindirlerindeki yataklar), düşük hızlı operasyonlarda kullanılan, fiziksel erişim yapılması mümkün olmayan veya ekipmana yaklaşılması güvenli olmayan yataklarda, termografi, vibrasyon analizine iyi bir alternatif olabilir. Pek çok durumda ekipman çalışır durumda iken emniyetli bir mesafeden termografi uygulaması yapmak mümkündür.



Şekil 1.12. Mekanik bir problemin neden olduğu yatak ısınması

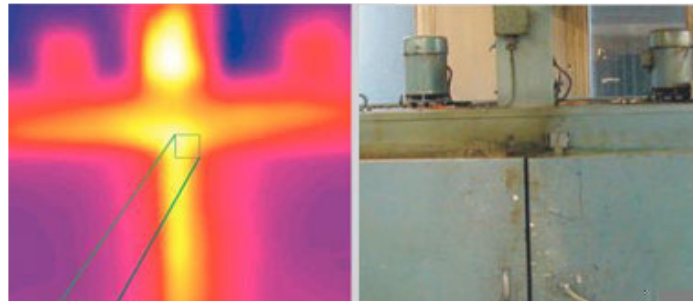
Elektrik Motorlarının Muayenesi: Endüstrinin bel kemiğini oluşturan elektrik motorlarının sadece ülkemiz işletmelerindeki sayıları milyonlarla ifade edilebilir. Pompaların çalıştırılmasından eksen hareketlerinin yapılabilmesine, fener mili tahrikinden, konveyör bandı tamburlarının döndürülmesine kadar bir çok yerde elektrik motorları kullanılmaktadır. Motorlar sıcakta, soğukta, kumda, suda, kimyasallarda, kısaca her ortamda çalışmaktadır. Birbirinden çok farklı olan bu ortamlarda çalışacak motorlar prosese özel olarak üretilir ve üzerindeki ısı değerleri farklıdır. Bu yüzden termografinin hangi sıcaklığın normal, hangisinin anormal olduğuna karar verirken temel yardımcısı deneyimleri ve benzer motorları karşılaştırması olacaktır. Termografi ile dişli kutusu arızası, yetersiz hava akışı olması, yakın yatak arızası, şaft kuplajı problemleri ve bir motorun rotor veya statorundaki izolasyon bozulması gibi durumlar tespit edilebilir.

İndüksiyon Isınması: İndüksiyon ile ısıtma her ne kadar bazı çelik işleme proseslerinde kontrollü olarak kullanılsa da, büyük AC akımlarının çelik konsollar gibi geçirgen metallere çok yakın olması durumunda beklenmedik zamanlarda ve kontrolsüz bir biçimde oluşabilir. Şekil 1.13'te, kablo konsollarının içindeki yüksek akım taşıyan AC kablolarının çelik destek ve kanallarda indüksiyon ısınmasına sebep olduğu görülmektedir. Isınma sonucunda kablonun izolasyonu sertleşir, kırılabilir bir hal alır ve beklenmedik bir zamanda koparak kısa devreye sebep olur.



Şekil 1.13. Kablo konsollarındaki indüksiyon ısınması

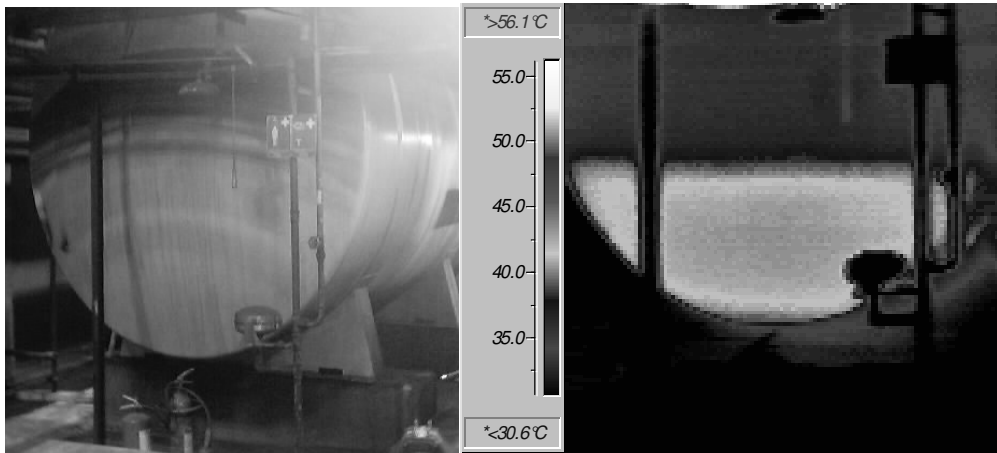
İzolasyon Aşınması: İzolasyon kaplı ve içinde yüksek sıcaklıkta malzeme bulunan herhangi bir hat, kullanımı esnasında çok yüksek sıcaklık artışları gösterir. Bunlara örnek olarak buhar hatları verilebilir. Termografi, bu hatlardaki izolasyon malzemenin incelmeye başladığı noktalarda oluşan lokal sıcaklık artışlarını yakalar. Tabii ki kullanımı sadece buhar hatları ile sınırlı değildir. Endüstriyel tip ısıtma fırınlarında izolasyon arızaları sonucu ısı kaybı olan bölgelerin tespiti yada tam mühürlenmeyen giriş çıkışlarda oluşan enerji kayıpları (Şekil 1.14) ve enerji geri kazanım sistemlerindeki arızalar yine termal kameralarla rahatlıkla tespit edilebilir.



Şekil 1.14. Fırının kapağından ısı kaybı

1.8.4.2. Kızılötesi termografinin diğer kestirimci bakım teknikleriyle karşılaştırılması

Seçilen kameranın özelliklerine göre bir kestirimci bakım programındaki en pahalı kalem kızılötesi termografi olabilir. Kestirimci bakım metotlarının bir çoğu bazı alanlarda çok etkin olarak kullanılabilir. Örnek olarak yağ analizi ve titreşim analizi, özellikle, dönel parçaları olan tezgâhları hedefler ancak bunlardan hiçbiri elektrik arızalarının teşhisinde etkin olarak kullanılamaz. Kızılötesi termografinin temel farkı, elektrik arızalarının yanında hatalı ayar, rulman aşınması, yağlama hatası, bara bağlantı sorunları, elektrik motor yükleri, döküm hatlarındaki refrakter aşınmaları, arızalı şalter bağlantıları, dengesiz yükler gibi bir çok problemi tespit edebilmesinin yanında tankların iç seviyelerini belirleme (Şekil 1.15), izolasyon bakım ve tamiratlarını planlama, izolasyon malzemelerinin yerleşimini ve bağlantılarını doğrulama gibi tanı fonksiyonlarını da desteklerdir[30]. Bununla birlikte kalınlık, termografinin etkinliğini azaltan bir parametredir. Takip edilmesi planlanan eleman, ekipman yüzeyinden ne kadar derinde ise, istenilen sonuca ulaşılması, sıcaklık yüzeye kadar dağılmış olacağından, o kadar zor olacaktır. Böyle yerlerdeki ekipmanlarda takip yapabilmek için tezgâh üzerinde tadilat yapılması (kapak yapılması, gövde inceltmesi vs) gerekebilir. Ayrıca, çevre sıcaklığı ile kontrol edilen ekipmanın sıcaklığı bir diğer sınırlayıcıdır. Bu sıcaklıklar birbirlerine ne kadar yakınlarsa, ekipman termal olarak o kadar görünmezdir.



Şekil 1.15. Termografi ile tank seviyesi ölçümü (göstergenin boş gösterdiği asit tankı aslında %30 dolu).

1.8.5. Titreşim Ölçüm ve Analizi

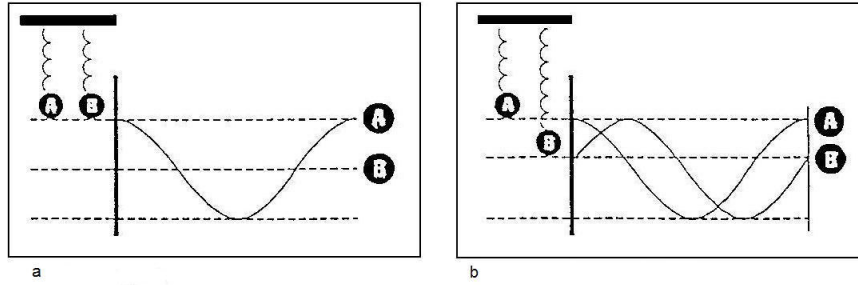
Kestirimci bakım metotlarından belkide en yaygın olarak kullanılan olan titreşim analizi, dönel parçaları bulunan her türlü makineye uygulanabildiği ve çok geniş bir problem çözme yelpazesine sahip olduğu için tercih edilmektedir. Çoğu zaman kestirimci bakım denildiğinde akla gelen tek metot olduğundan kestirimci bakımla özdeşleştirilmiştir.

Makineler durumlarını titreşimlerle ortaya koyarlar. Titreşim, bir kütle için referans konum etrafında yaptığı periyodik olan yada olmayan hareketler olarak adlandırılabilir. Bu hareketin şiddeti, cismin kütlesine, şekline, üzerine etkiyen kuvvetin büyüklüğüne ve kendisiyle çevresinin sönümleme gücüne göre değişir. Titreşimleri birçok gruba ayırabilmek mümkünse de, temelde kestirimci bakımla ilgili olarak rasgele titreşimler ve periyodik titreşimler şeklinde ikiye ayrılabilir. Rasgele titreşimler, proses dalgalanmaları yada çevre koşulları ile ortaya çıkan, yön ve şiddetleri sürekli değişen, zamanla azalıp çoğalan geçici hareketlerdir. Matematiksel olarak bir ifadesi yoktur. Makineler rejime girene kadar çok kısa bir süre devam edip kaybolan ve geçiş rejimi titreşimi olarak adlandırılan özel bir şekli bulunur. Periyodik titreşimler ise, sistemin dinamik yapısı yada bir arıza sonucunda oluşur. Düzenli aralıklarla tekrarlanırlar ve matematiksel olarak ifade edilebilirler. Titreşim analizinde kullanılan titreşimler bu türe dâhildir. Ölçümlerde rasgele titreşimler ile periyodik titreşimler birbirlerinden ayrılmalıdırlar.

Titreşim analizi ile ilgili olarak öncelikle açıklanması gereken bazı parametre ve tanımlar şu şekilde sıralanabilir.

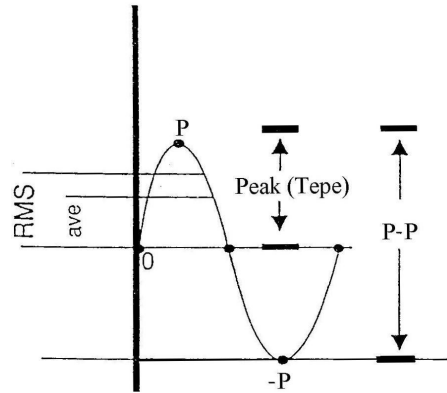
- i. Frekans:* Frekans, belirli bir hareketin birim zaman içerisindeki tekrar sayısıdır. Herz (Hz), cps (saniyedeki tekrar sayısı) ve cpm (dakikadaki tekrar sayısı) birimleri ile ifade edilir.
- ii. Periyot:* Titreşimin bir tam tur yapması için gereken süreyi ifade etmek için kullanılır, T ile ifade edilir. Frekans ile ters orantılıdır.

iii. **Faz:** İki olaydan birinin diğerine göre ne kadar önce veya sonra meydana geldiğinin ölçüsüdür. Birimi derece (0° - 360°) veya radyan (0 - 2π) olarak verilir. Faz açısı hesaplamalarında dönüş yönü (-) negatif, dönüş yönünün tersi (+) pozitiftir. Faz farkı, Şekil 1.16’da açıklanmıştır.



Şekil 1.16. İki kütle arasındaki faz farkı a) 0° fark ile b) 90° fark ile

iv. **Genlik:** Titreşim şiddetini gösterir ve sinüs eğrisinin “0” noktası ile tepe noktası arasındaki mesafesidir. Bir makineye etkiyen tüm kuvvetlerin oluşturduğu titreşimlerin toplam büyüklüğü olarak ta tanımlanır. Genliği tanımlamak için Şekil 1.17’deki büyüklükler kullanılır.



Şekil 1.17. Genliği tanımlayan büyüklükler

- v. **Pik, tepe (peak):** Sinyalin bir yönde eriştiği maksimum değerdir.
- vi. **Pik-Pik (P-P):** Sinyalin (+) tepe noktası ile (-) tepe noktası arasındaki uzaklığı temsil eder. Bir makine yada elemanın titreşiminin toplam genliğini verir. Pik değerinin iki katına eşittir.

vii. **Etkin değer (RMS):** Adını “root mean square” teriminin baş harflerinden almıştır. Bir sinyalin t_1 - t_2 aralığındaki değerlerinin karelerinin ortalamasının kareköküdür. E 01 eşitliği ile hesaplanır.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad E 01$$

viii. **Ortalama (Average):** Bir sinyalin t_1 - t_2 aralığında aldığı değerlerin aritmetik ortalamasıdır. E 02 eşitliği ile hesaplanır.

$$Ortalama = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt \quad E 02$$

Bu büyüklüklerin birbirlerine dönüşümü esnasında kullanılmak üzere Çizelge 1.1’de gösterilen katsayılar hesaplanmıştır.

Çizelge 1.1. Titreşim analizi parametrelerinin birbirleri arasındaki dönüşüm çizelgesi

	P-P	P (tepe)	RMS	Ort (average)
P-P	1,000	2,000	2,828	3,142
P (tepe)	0,500	1,000	1,414	1,571
RMS	0,354	0,707	1,000	1,500
Ort (average)	0,318	0,636	0,900	1,000

Bir kuvvetin şiddeti, meydana getirdiği hareketin deplasmanı, hızı ve ivmesi cinsinden belirtilebilir. Bu kavramlar şu şekilde açıklanabilir.

a. **Deplasman:** Bir kuvvetin etkisindeki kütle için belli bir referans noktasına göre kat ettiği mesafedir. mm, mikron, in yada mils birimleriyle ifade edilir

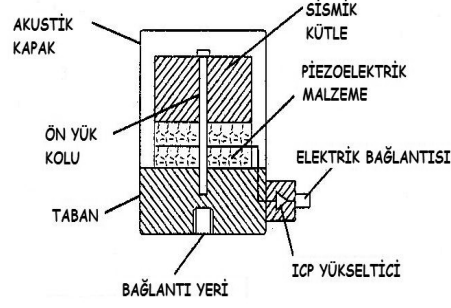
- b. Hız:** Birim zamanda alınan yoldur, titreşime neden olan parçanın ne kadar hızlı hareket ettiğinin ölçüsüdür. Deplasmanın birinci türevinin yada ivmenin integralinin alınması ile hesaplanır. Birimi mm/s, mikron/sn yada in/sn olarak verilir.
- c. İvme:** Birim zamandaki hız değişimi ivmeyi verir. Deplasmanın ikinci yada hızın birinci türevi ile hesaplanır. Birimi mm/s^2 , mikron/sn^2 , in/sn^2 yada g's olarak verilir (g's yer çekimi ivmesidir).

Ölçümleri yaparken büyüklük için hangi birimde ölçüm yapılması gerektiğine dikkat edilmelidir, zira gerek deplasmanın gerek hızın gerekse de ivmenin kendilerine has avantaj ve dezavantajları vardır. Deplasman ile ölçüm genellikle 10 Hz den küçük (600 CPM) devirlerde kullanılmalıdır. İvme ile yapılan ölçümlerde 5000 Hz (300.000 CPM) den büyük frekans üreten dişli ya da rotor sistemleri için kullanılır. Hız birimi ise genellikle 10 ile 2000 Hz (600–120.000 CPM) arasında kalan frekanslar için kullanılır.

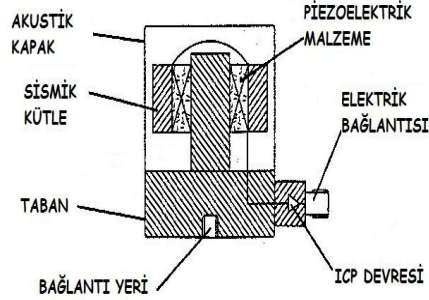
1.8.5.1. Titreşim sensörleri

Günümüzde sıklıkla kullanılan 3 tip sensör vardır, bunlar ivme sensörleri (accelerometer), hız sensörleri (velocity pickups) ve deplasman sensörleridir. Bu sensörler ayrıca kendi içlerinde de çeşitli gruplara ayrılmışlardır.

- i. İvme sensörleri (accelerometer):** Direk ivme “g” ölçümü yaparlar. İvme ölçerlerin performanslarını etkileyen 3 temel karakteristikleri vardır. Bunlar voltaj hassasiyeti (mV/g), frekans (cpm,Hz) ve ağırlığıdır (oz,gr). Günümüzde en yaygın olarak kullanılan piezoelektrik ivme sensörleri Şekil 1.18 ve Şekil 1.19’da gösterilen baskı tipi sensör ve kesme tipi sensördür. Hız sensörlerine göre daha ucuz ve frekans bandının daha geniş olması sebebiyle, kestirimci bakım uygulamalarında en çok tercih edilen sensörlerdir.

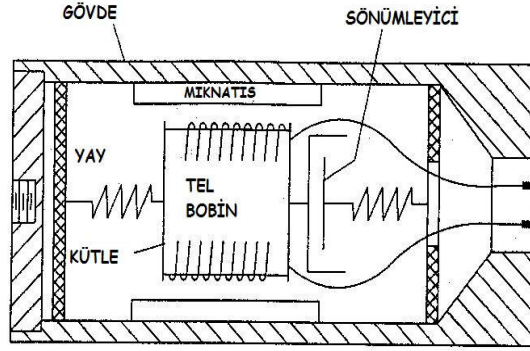


Şekil 1.18. Baskı tipi ivme sensörü

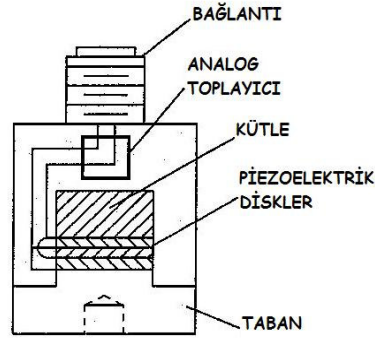


Şekil 1.19. Kesme tipi ivme sensörü

ii. Hız sensörleri (velocity pickups): Hız sensörleri, pahalı oluşları, dar frekans bantları ve nispeten fazla olan ağırlıkları sebebi ile yerlerini ivme sensörlerine kaptırmışlardır. Ama yine de harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymamaları ve birimlerinin herhangi bir çevrim işlemine ihtiyaç duymaması nedeni ile ivme sensörleriyle alınan ölçümlerin çevriminde ortaya çıkan gürültünün oluşmaması gibi avantajları vardır. Sismik ve piezoelektrik hız sensörü (Şekil 1.20 ve Şekil 1.21) olmak üzere 2 temel çeşidi vardır. Piezoelektrik sensörlerin aksine, sismik hız sensörleri kendi kendilerine çalışırlar. Bu sistemin doğal frekansı 10 Hz civarındadır. Ağırlıkları sebebi ile sistem ataletini yenmek zorlaştığından, sismik hız sensörlerinin frekans limiti 1000-2000 Hz civarındadır. Daha yüksek yada düşük değerlerde direkt hız ölçümü yapılması gerekiyorsa piezoelektrik hız sensörleri kullanılmalıdır. Sismik sensörler manyetik alanlardan etkilenirken, piezoelektrik sensörlerde bu dezavantaj yoktur.



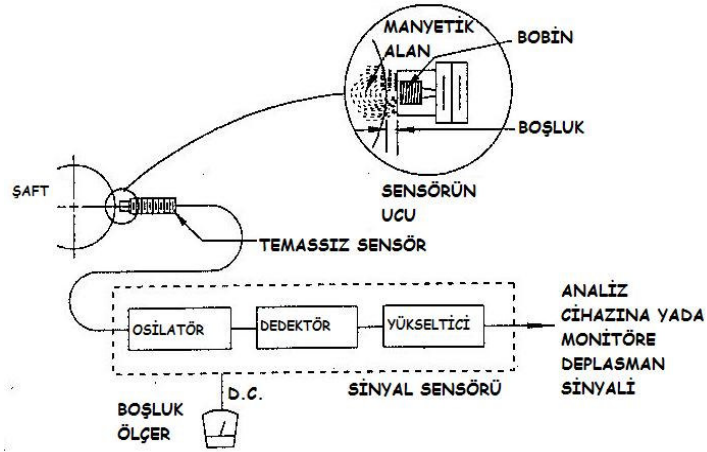
Şekil 1.20. Sismik hız sensörü



Şekil 1.21. Piezoelektrik hız sensörü

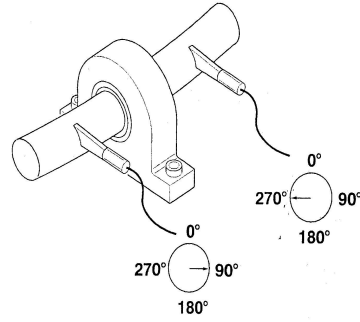
iii. Deplasman sensörleri: Deplasman sensörleri ivme ve hız sensörlerinin aksine, mutlak titreşim değerini değil, ölçüm noktasına göre şaft titreşimini ölçerler. Temaslı ve temassız tipler olmak üzere 2 grupta incelenebilirler. Temassız deplasman sensörleri (Şekil 1.22) genellikle şaft titreşimini, radyal / aksenal şaft pozisyonunu ve şaft pozisyonu ve rotor ile motor gövdesi arasındaki diferansiyel genişlemeyi ölçmede kullanılırlar. Özellikle türbin, jeneratör ve kompresör gibi yağ filmleri üzerinde çalışan büyük motorlarda efektif olarak çalışırlar. Piezoelektrik sensörlerin aksine, titreşime göre bir elektrik potansiyeli oluşturmazlar, şaft titreşiminin AC sinyalini içinde oluşturduğu osilasyonu tespit etmek için yüksek frekanslı alternatif akım üretecek bir elektronik devreye ihtiyaçları vardır. Bobine uygulanan bu yüksek frekanslı sinyal bir manyetik alan oluşturur. Şaftın sensöre göre olan hareketi bu manyetik alanda değişimlere yol açar, bunun sonucunda sensör titreşimle orantılı bir AC ve boşlukla orantılı bir DC sinyal üretir. Bu

sistemlerde karşılaşılan en büyük sorun şaft yüzeyinin çatlaksız ve pürüzsüz olma zorunluluğudur. Diğer bir sorunda mekanik yada elektriksel kaçıklıklardır. Mekanik kaçıklık, şaft merkezi ile ölçüm noktası arasındaki daireselliğin bozukluğu olarak tanımlanırken, elektriksel kaçıklık şaft yüzeyindeki iletkenlik farklılıkları yada yerel manyetik alanların bulunması sonucu ortaya çıkar.

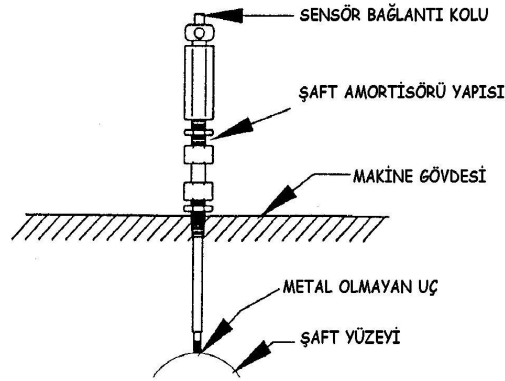


Şekil 1.22. Temassız deplasman sensörleri

Temaslı deplasman sensörleri bir çok yerde yerini temassız sensörlere bırakan eski bir teknoloji olsa da halen kullanım alanları vardır. 200 Hz frekans ve 10.000 d/dak hıza kadar ölçüm yapabilen temaslı deplasman sensörlerinin şaft levyesi ve şaft amortisörü adında iki çeşidi vardır. Şaft levyeleri (Şekil 1.23) bir ucu balık kuyruğunu andıran, diğer ucunda sensör bağlantısı için bir saplama olan mekanik bir yapıdır. Balık kuyruğu yapısı sayesinde ölçüm için 2 temas noktası ve farklı çaplara uyum olanağı verir. Şaftta bir eğiklik var ise, şaftın her iki yanında yapılan ölçümlerde 180° lik faz farkı oluşur. Kullanım yeri olarak temassız sensör bağlantısı yapılamayan yerler kalmıştır. Şaft amortisörleri (Şekil 1.24) temelde temassız sensörlere benzerler ve kalıcı olarak monte edilmelidirler. Temassız sensörlerle temel farkı, yaylı bir uçla şafta temas etme zorunluluğudur. Temaslı tip sensörler yüksek frekans problemlerinin tespitini yapamamaktadır.



Şekil 1.23. Şaft levyesi



Şekil 1.24. Şaft amortisörü

1.8.5.2. Sensör seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalar

i. Hassasiyet derecesi: Hassasiyet, sensörün vibrasyon hareketinin genliğini gösterebilme derecesidir (Ör: 100mV/g lik bir ivme ölçer 10 mV luk sinyal üretiyorsa, hassasiyeti $10/100=0,1g$ dir).

ii. Frekans bandı: Sensörün ölçüm yapabildiği en alt ve en üst frekansın arasındaki değerlerdir.

iii. Doğal frekans bandı: Sensörün frekans bandının üst sınırını doğal frekansı belirler. Ölçüm frekansının doğal frekansı yakalaması durumunda, rezonans durumuna göre titreşim büyüklüğü 50 kata kadar yükselebilir.

iv. Ağırlık: Ağırlık iki açıdan çok önemlidir. Sensör, saha çalışmalarında kullanılabilecek kadar hafif, ölçüm alınan yatağa göre de belirli bir oranda ağır olmalıdır.

v. Sıcaklık Bandı: Sensörün doğru olarak çalışabileceği bir sıcaklık aralığı vardır. Buna özellikle ısı üreten yada çok soğuk ortamlarda çalışan ekipmanlarda yapılan ölçümlerde dikkat edilmelidir.

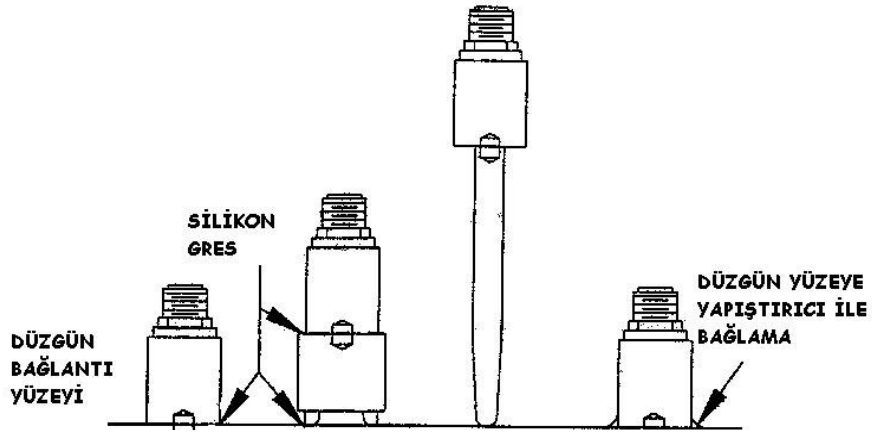
vi. Ölçüm yönü: Sensörlerin tamamına yakını montaj yönündeki titreşimi ölçer, sadece küçük bir bölümü her üç yöndeki titreşimi ölçebilir.

vii. Sensör boyutları: Kullanılacağı yere göre çok çeşitli boy ve ebatlarda sensörler vardır, uygun olan seçilmelidir.

viii. Güç kaynağı: Üç çeşit güç kaynağı bulunmaktadır, bunların ilki ICP (integrated circuit piezoelectric) dir. Piezoelektrik sensörlerde kullanılır, ölçüm cihazından sensöre bir kablo yardımıyla güç ulaştırılır. İkinci güç kaynağı türü bağımsız güç kaynağıdır. Bu tip güç kaynağında sensöre gereken enerjiyi harici bir batarya yada AC ünitesi sağlar. Sonuncu güç kaynağı türü de sinyal güçlendiricidir. Bu kez sensörle cihaz arasına sinyal voltajını yükseltecek bir batarya yada AC ünitesi konur.

1.8.5.3. Sensörlerin montaj Şekilleri

Sensörlerin bağlanma Şekilleri ölçüm sonucunda önemli etkiler yapabilir. Temelde 5 çeşit sensör bağlantı tekniği vardır (Şekil 1.25). Bu tekniklere göre ölçüm yapılabilecek frekanslar Çizelge 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.25. Sensörlerin bağlantı Şekilleri

Çizelge 1.2. Sensörlerin bağlantı tiplerine göre kullanılabilecekleri frekanslar.

Bağlama Tekniği	Kullanılabileceği Azami Frekans (CPM)	Bağlantı Doğal Frekansı (CPM)
1) Saplama bağlantı	975.000	1.900.000
2) Yapıştırıcıyla bağlantı	540.000	Gözlemlenmemiştir
3) Mıknatıs Bağlantısı	450.000	724.500
4) Hızlı bağlantı saptaması ile bağlantı	360.000	609.000
5) 2" lik uzatmalı el probu ile ölçüm	48.000	88.500

i. Saplama Bağlantısı: Bu bağlantı şekli sensörü sürekli olarak bağlamak için kullanılır. En sağlam bağlantı şeklidir ve en geniş frekans bandında ölçüm yapılabilmesini sağlar. Farklı makinelerden bilgi toplamak amacı ile kullanımı pratik olmasa da 50.000 Hz ve üzeri ölçümlerde bu tip bağlantı kullanılmalıdır. Sensörün yeri sabit olduğu için bir nokta ile ilgili doğru ve tekrarlanabilir bilgiyi bize bu bağlantı şekli ile bağlanmış sensörler verir.

ii. Yapıştırıcıyla Bağlama: Eğer doğru tip ve miktarda yapıştırıcı kullanılırsa çok iyi ölçümler alınabilir. Bu tip bağlantılar zaman içinde çözülebileceğinden kontrol edilmesi gerekir. Yüksek frekanslı (>75.000Hz) makinelerde çalışılacaksa, bu tip bir bağlantı kullanılabilir. Bu metot ile tekrarlanabilir ve güvenilir ölçüm sonuçları elde edilebilir.

iii. Mıknatıs İle Bağlama: Frekans aralığının müsait olması ve takıp sökme kolaylığı sebebi ile kestirimci bakım programlarında kullanılan en popüler bağlantı şeklidir. Tabiki tüm ölçümlerde kullanılmaları mümkün değildir.

iv. Hızlı bağlantı: Bu bağlantı tarzı da yine mıknatıs tekniği gibi çabukluk sağlayan bir metottur. 7000 Hz ve üzeri frekanslarda kullanılmamalıdır.

v. El probu ile ölçüm: En tercih edilmeyen ölçüm şeklidir. Kullanılabilir ölçüm frekansı 500-1000 Hz civarındadır. Probu boyutuna göre, yapılan ölçümün doğruluğu 500 Hz mertebesine kadar düşebilir. Kullanım alanları, diğer sensörlerin giremediği yada girmesi durumunda ciddi iş güvenliği sorunları oluşturabilecek yerler olarak kalmıştır.

Titreşim analizi ile balanssızlık, kaplin ayarsızlığı, mekanik gevşeklik, dişli arızaları, rulman arızaları, kaymalı yatak arızaları, kayış arızaları ve motor arızaları gibi arızalar teşhis edilir.

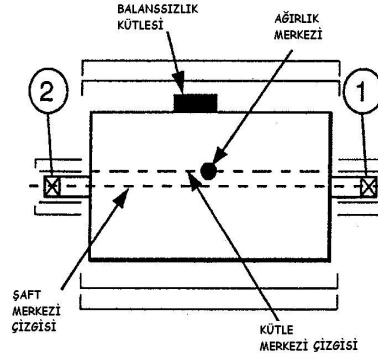
1.8.5.4. Titreşim analizi ile tespit edilebilen arızalar

i. Balanssızlık: Balanssızlık şaft merkezi ile kütle merkezinin aynı olmaması sonucunda ortaya çıkan bir problemdir. Dönel parçalar üzerinde oluşan dengelenmemiş kuvvetler şiddetli titreşimler oluşturarak ana gövdeyi ve temelleri zorlarlar. Balans alma işlemi, temel olarak makine üzerindeki dengelenmemiş kütlelerin karşı bir kütle ile dengelenmesidir[35].

Balanssızlık mutlaka 1XRPM’de yüksek titreşim olarak kendini gösterir (ancak 1XRPM deki titreşim her zaman balanssızlık olmayabilir). Sadece balanssızlık olması durumunda, 1XRPM deki sinyal genliği, toplam genliğin genellikle %80’i civarındadır (başka problemlerde varsa, bu oran %50-80 arasında olabilir). Balanssızlığa sebep olan kütle, sürekli yön değiştiren ama tüm radyal yönlerde uygulanan bir kuvvet oluşturur. 1XRPM frekansında, faz farkı 0^0 yada 180^0 ye yakın, yüksek bir sinyal var ise, balanssızlıktan değil, eksantriklikten şüphelenmek çok daha doğru olacaktır.

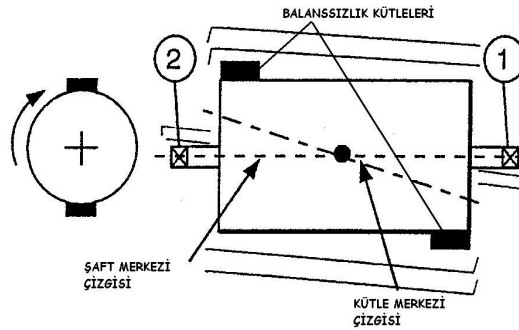
Balanssızlığın üç temel çeşidi vardır;

- a. **Statik balanssızlık:** Balanssızlığa sebep olan kütlelerin merkez çizgisinin, şaft merkez çizgisine paralel ve buna belirli bir mesafede olması durumunda ortaya çıkan balanssızlık çeşididir (Şekil 1.26). Statik balanssızlığın karakteristikleri; titreşimlerin her iki yatakta da eşit fazda olması ve balanssızlığa neden olan ağırlığın zıt yönünde eşit bir ağırlığın uygulanması ile tek düzlemde rahatlıkla giderilebilmesidir.



Şekil 1.26. Statik balanssızlık

- b. **Kuvvet Çifti Balanssızlığı:** Balanssızlığa sebep olan kütlelerin merkez çizgisinin şaft merkez çizgisini orta noktadan kesmesidir. Şekil 1.27'de gösterildiği gibi farklı iki düzleme 180° açı ile yerleştirilmiş iki kütlelerin oluşturduğu balanssızlık gösterilmektedir. Bu tip bir balanssızlıkta; Rotor statik olarak dengededir, 1XRPM'de her iki yatakta da yüksek genlikli titreşimler üretir, yataklardaki faz farkı 180° dir.



Şekil 1.27. Kuvvet çifti balanssızlığı

c. Dinamik balanssızlık: Diğer tiplere göre endüstride en sık karşılaşılan balanssızlık çeşididir. Statik balanssızlık ile kuvvet çifti balanssızlığının toplamından oluşur. Balanssızlığa sebep olan kütle merkezi ne şaft merkezine paraleldir ne de bu merkezi orta noktadan keser. Bu balanssızlık türü, 1XRPM frekansında yüksek genlikli titreşimler oluşturur ancak yataklardaki genlikler farklıdır. Faz farkı, 0^0 ile 180^0 arasında herhangi bir değerde olabilir.

Balanssızlığı gidermek için iki temel metot kullanılmaktadır. Bu metotların ilki, balans problemi olan parçayı sökerek bir balans cihazına bağlamaktır ki, bu metotta yeniden yerine takılan parçanın üzerinde işlem sonrası ölçülen balanssızlıktan daha fazla balanssızlık olması muhtemeldir, diğeri ise balanssızlığı parçanın çalıştığı yerde gidermektir. Daha önceleri, el ile alınan ölçümlerin polar koordinat grafiğine girilmesi ve vektörel olarak yapılan hesaplamalar sonucunda bileşke vektörün bulunarak balansı alınacak cisme uygulanması sonucu giderilen balanssızlık problemi, günümüzde bilgisayarlı ölçüm aletleri sayesinde çok daha hızlı ve hatasız olarak yapılabilmektedir. Tabii ki kullanılan metot ve hesap algoritması halen değişmemiş, sadece dijitalleşmiştir.

Yerinde dengelemenin diğer metoda göre avantajları, herhangi bir demontaj ve transfer işlemi gerektirmemesi, işlem şaftın kendi yatakları üzerinde gerçekleştirildiği için, daha hassas ve sağlıklı dengeleme yapılabilmesi, balans tezgâhına bağlanamayacak büyüklükteki şaft ve rotorlarda dahi kullanılabilmesi ve cihaz maliyetinin sabit sistemlere göre daha düşük olmasıdır[31].

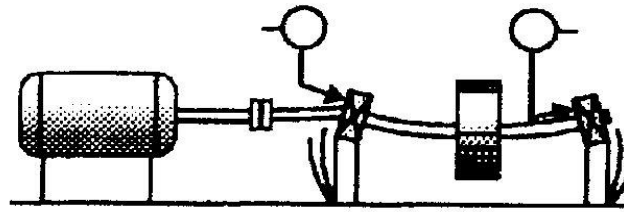
ii. Eksantriklik: Eksantriklik, dönen bir cismin geometrik merkezinin dönüş merkezine olan uzaklığıdır. Bu, merkezin bir tarafındaki ağırlığın diğer tarafa oranla daha fazla olduğu anlamına gelir ve cismin dönüşü aksak bir biçimde gözlemlenir. Eksantrikliğin olduğu durumlarda titreşimi kesmek çoğu zaman mümkün olmaz. Özellikle günümüzde kullanılan çok yüksek devirlerde eksantrikliğin minimize edilmesi yeterli olmamakta, tamamen ortadan

kaldırılması gerekmektedir, Bu tip bir uygunsuzluk, spektrumda 1XRPM frekansında, balansa olduğu gibi bir pik olarak kendini gösterir.

Eksantrik rotorlar, bir radyal yönde diğerine göre daha yüksek genlikte titreşimler oluştururlar. Yapılacak faz analizi ile, 1XRPM’de oluşan titreşimin sebebinin balanssızlık mı yoksa başka bir sebep mi olduğunun ortaya çıkarılabilmesi için son derece kullanışlı bir metot olacaktır[31].

iii. Şaft eğikliği: Eğik bir şaft, eğikliğin yerine ve eğim miktarına göre çok yüksek genlikte titreşimlere neden olur. Eksantrik şaftlarda olduğu gibi, balans almayla bir miktar azaltılabilir gibi görünse de, genellikle pek mümkün değildir. Eğilmiş şaftlar, aralarında ısıl işlemin de bulunduğu çeşitli metotlarla düzeltilebilmekle beraber, üzerinde kalıcı gerilim bırakılmaması son derece önemlidir. Aksi halde, daha sonra yorulma sebebi ile kırılabilirler. Temsili olarak Şekil 1.28’de gösterilen şaft eğikliğinin karakteristikleri şunlardır.

Eğik bir şaft, çok yüksek genlikli ve vuruntulu titreşim sinyalleri üretir. Eğiklik merkeze yakın bir yerdeyse, genellikle 1XRPM de görünen bu sinyal, eğikliğin kapline yakın kısımlarda olması durumunda 2XRPM frekansında normalden daha büyük bir genlik oluşturur.



Şekil 1.28. Şaft eğikliği

Yataklardaki aksenal faz değişimi, eğiklik miktarına göre 180^0 ye ulaşabilir. Aynı yatak üzerinde farklı noktalar kontrol edildiğinde, rulmanın altıyla üstü, sağıyla solu arasında 180^0 ye ulaşan faz farkları gözlemlenir.

iv. Ayarsızlık (Kaçıklık): Günümüz endüstrisinde çok yoğun olarak yaşanan sorunlardan birisi de kaçıklıktır. Son yapılan çalışmalar, işletmelerde çalışan makine ve ekipmanlardan ayarsız ve kaçık çalışanların düşünülenden çok daha fazla olduğunu ortaya koymaktadır. Ortalama olarak ekipman sayısının %30-50'sine varabilen bu değer, aşırı titreşime, fazladan enerji kullanımına ve pahalı parçaların zamanından önce aşınmasına neden olmaktadır. Kaçıklık tabii ki öncelikle kaplinin bozulmasına sebep olur, ancak kaplin güçlüyse, bu kez rulman, dişli, kayış, vs gibi daha başka bir kısımda arıza meydana gelecektir. Kaçıklık nedeniyle oluşan en büyük reaksiyon düşünüldüğü gibi shafta en yakın rulmandan gelmez, genellikle serbest uçtakinde oluşur.

Kaçıklık hem aksenal hem de radyal titreşimler oluşturur. Her ne kadar, aksenal yönde oluşan titreşimlerin en önemli nedeni kaçıklık olsa da, faz ve titreşim spektrumu da mutlaka kontrol edilmelidir. Aksenal titreşimlere neden olabilecek diğer problemler, eğik shaftlar, bazı parçaların aksenal yöndeki rezonansları, aşınmış aksenal rulmanlar, aşınmış helisel yada konik dişliler, dinamik balanssızlıktaki kuvvet çifti vs olarak tanımlanabilir. Ayarsızlıkla ilgili olarak, yüksek yatay yada dikey titreşim değerlerinin alınması, o yönde bir ayarsızlık olduğunu her zaman göstermez, birçok çalışmada, alınan yüksek yatay titreşim değerlerinin sebebinin dikey yöndeki ayarsızlık olduğu gözlemlenmiştir. Bunun tersi de aynen geçerlidir.

Ayarsızlık kendini 2XRPM frekansında, aksenal ve/veya radyal yönde, normalden yüksek titreşimler olarak gösterir. Bunun sebebi, makine, destek noktaları yada kaplindeki asimetrik bükülmeler olarak açıklanabilir.

Özellikle kritik makinelerde ayar yaparken, ayar izlenerek değişimler gözlemlenmeli, faz 4 yönde de ölçülerek değişimler dikkatli bir şekilde yorumlanmalıdır. Bu tip tezgâhların genellikle termal kaydırma sistemleri olduğundan, ortam sıcaklığından çalışma sıcaklığına gelene kadar ayarsızlık belirtileri görülebilir ve çalışma sıcaklığına ulaşılmasıyla bu belirtiler kaybolur. İzleme yapılırken 1XRPM değerinden çok 2XRPM ile 4XRPM arasındaki değerler gözlemlenmelidir. Özellikle tezgâhın 3XRPM'de sebep olduğu titreşim sayesinde ayar takibi yapılabilir.

Ayarsızlık, açısal ayarsızlık, paralel ayarsızlık, rulman ayarsızlığı ve kaplin problemleri başlıkları altında incelenebilir.

Açısal ayarsızlık: Açısal ayarsızlıklar özellikle 1XRPM ve 2XRPM de yüksek eksenel titreşimlere neden olurlar, ancak bu tepelerden birinin tek başına ön plana çıkması beklenmez. Yine de 2 yada 3XRPM deki tepeciklerin, 1XRPM deki eksenel değeri %30-50 civarında aşması açısal ayarsızlığın göstergesidir. Kaplinde eksenel yönde 180⁰'lik faz farkı olması açısal ayarsızlığı en iyi şekilde ortaya çıkarır.

Paralel ayarsızlık: Eksenel titreşime sebep olan açısal ayarsızlığın aksine radyal titreşimlere neden olur. Kaplinde, radyal yönde 180⁰ faz farkı oluşturur. 2XRPM'de ortaya çıkan tepeciğin genliği 1XRPM'dekinden %50 daha büyüktür.

Rulman ayarsızlığı: Şaft yataklamasının ayarsız olması durumunda yüksek genlikli bir titreşim ve aşırı yüklenme oluşur. 1XRPM ve 2XRPM'de eksenel yönde titreşim görülür. Eğer eksenel yönde 90⁰ ara ile 4 faz ölçümü yapılırsa, sağdaki ile soldaki yada üstteki ile alttaki ölçüm arasında 180⁰ faz farkı olduğu görülür. Böyle bir durumda kaplin ayarı yapmak yada rotorun balansını almaya çalışmak problemi çözemez.

Kaplin ayarsızlığı: Genellikle sinyallere bakarak sorunun kaplin problemi mi yoksa ayarsızlık mı olduğunu söylemek pek kolay değildir. Kaplin tipi de dahil olmak üzere, şaft çapı, yatak çapı, şaftlar arası boşluk gibi pek çok faktör titreşim değerlerini etkiler. Yinede bazı temel noktalar bu arızanın tespitinde faydalı olabilmektedir.

3XRPM'deki titreşim, genellikle ara boşluğu çok az yada çok fazla olan problemlili kaplinleri işaret eder. Radyal yönde çok yüksek titreşim alınır, eksenel yönde alınan genliklerde oldukça yüksektir. Sorunu giderebilmek için kaplin boşluğunu yeniden ayarlanması yada tahrik grubunun veya karşılığının yeniden yerleştirilmesi gerekir.

Dişli kaplinlerde, dişlinin dişlerinde sürtünme dolayısı ile yapışmalar olabilir ve bu rulman arızasına kadar gidebilecek sorunlar zincirini başlatır. Dişli yapışması, radyal ve aksenal yönde yüksek genlikli titreşimlere neden olur. Aksenal titreşim normalde biraz daha yüksektir. Genelde en çok 1XRPM frekansı etkilenir ama bir çok kaplin tipi yılbaşı ağacı olarak adlandırılan tipik bir frekans dağılımı gösterir. Bu dağılımda 2. harmonikten 5. veya 6. harmoniğe kadar her biri bir öncekinden %25 daha düşük genlikte titreşim değerleri alınır[31].

v. **Doğal frekanslar ve rezonans:** Doğal frekanslar ve rezonans titreşim konusunda çok önemli bir yere sahiptir. Doğal frekans, evrendeki her objede var olan doğal ve zararsız bir kavramdır. Rezonans ise doğal değildir, her zaman oluşmaz ve oluşması halinde çok büyük zararlara neden olabilir.

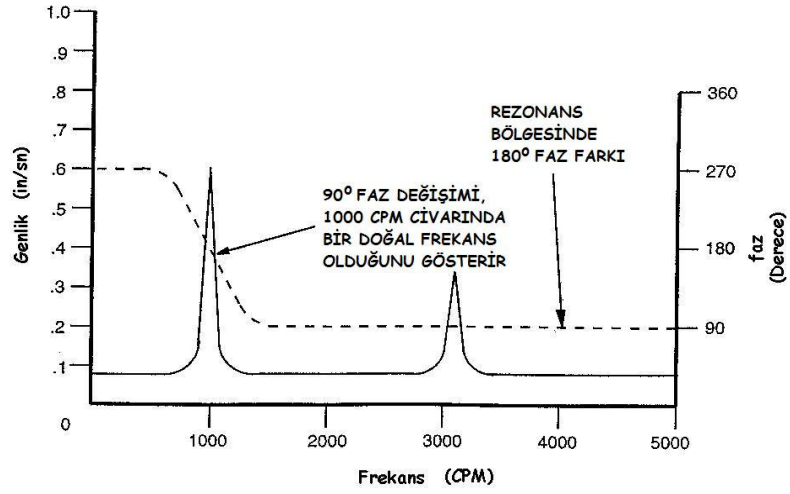
i. **Doğal frekans:** Sistemin serbest haldeki titreşimi olarak tanımlanır. Her yöne doğrudur ve sonsuz sayıdadır. Bir çok doğal frekans tespit metodu olmakla birlikte, bunlardan en genel iki tanesi aşağıda anlatılmıştır.

i. **İmpuls doğal frekans testi:** Duran bir makinedeki bir elemanın üzerine bir ivme ölçer yerleştirilir. Makineye harici bir etki uygulanır ve FFT veri toplayıcı ile ivme ölçerin tepkisi kaydedilir. Frekans spektrumunda elde edilen tepecikler ivme ölçer yönündeki doğal frekansları gösterir. Bu test bir çok noktada her 3 yön (yatay, dikey ve aksenal) için tekrarlanarak mümkün oldukça çok sayıda doğal frekans yakalanır.

ii. **Serbest durma yada hızlanma testi:** Serbest durma testinde, çalışan bir makinenin üzerindeki elemana ivme ölçer yerleştirilerek makine kapatılır, durana kadar bir veri toplayıcıyla ivme ölçerin sinyalleri kaydedilir. Balanssızlık kuvvetinin etkisiyle, aranan doğal frekanslar tepecikler olarak ortaya çıkmaya başlar. Her tepecik mutlaka doğal frekans demek değildir. Tepeciğin doğal frekans olup olmadığını anlamak için bode diyagramından faydalanılır (Şekil 1.29). Bode diyagramında doğal frekans, fazın 90^0 derece değiştiği yerde genlikte

de bir artış olmasıyla kendini gösterir. Rezonans noktasından geçerken fazda 90° 'lik bir değişim daha olur ve genlik düşer

Hızlanma testi serbest durma testi ile aynı mantıkla yapılır. Tek farkı, makine durağan halden çalışma hızına doğru hareket eder.

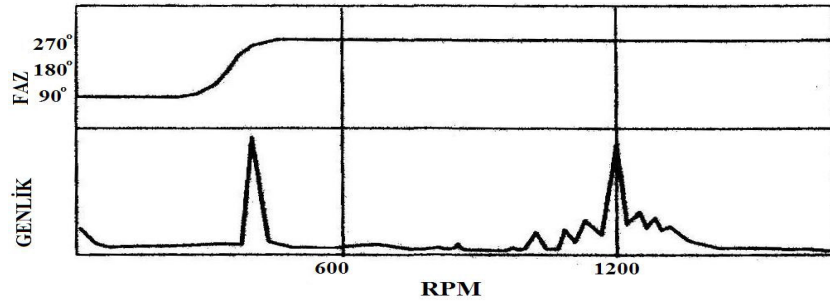


Şekil 1.29. Bode diyagramı

- ii. **Rezonans:** Son derece yıkıcı bir titreşim türüdür. Bir maddeye doğal frekansında, yada doğal frekansına çok yakın bir frekansta ve aynı yönde kuvvet uygulanması sonucu ortaya çıkar. Bir çok durumda makine ve/veya makine gövdesinde ağır hasar ve kırılmalar oluşturabilir. Sonuçta genlik 10 ile 30 kat arasında artış gösterir. Bu konuya verilebilecek en iyi örnek diyapozom (ses çatalı) örneğidir. Bir diyapozoma sertçe vurulup titreştirildiğinde rahatsızlık vermeyen bir titreşimin zamanla sönümlendiğine tanık oluruz. Eğer diyapozom titreştirildikten sonra bir masanın üzerine konulursa, masanın doğal frekanslarından birini yakalamasının ardından titreşim enerjisi katlanarak artar. Rezonans ile ilgili olarak bilinmesi gereken üç temel nokta vardır. Bunlar; rezonans, bir maddeye doğal frekansı ve yönünde bir kuvvet uygulanmadıkça oluşmaz, makede oluşan bir problem, doğal frekanslardan birinde değilse, frekans spektrumunda sorunun neden olduğu kadar bir genlik görülür, doğal frekansın neden olduğu titreşim görülmez ve eğer aynı problem, doğal

frekansta yada doğal frekansın oldukça yakınlarında oluşursa, frekans spektrumunda genlikler 10 ile 30 kat daha büyük ölçülür.

Rezonans, statik ve dinamik olarak iki temel başlık altında incelenebilir. Her iki rezonans tipinde de ortak olan özellik, diğer arızaların aksine, frekans diyagramlarında yan bantları bulunmayan tek bir tepelik olarak görünürler (Şekil 1.30). Şekle baktığımızda, 500 rpm civarında bulunan tepelik hem yan bantları olmaması, hem de faz farkının 180^0 olması sebebiyle rezonans göstergesidir. 1200 rpm'deki tepeliğin ise rezonans olmadığı, hem faz farkının olmaması hem de yan bantlarla çevrili olmasından dolayı açıkça bellidir.



Şekil 1.30. Rezonans diyagramı

- i. **Statik Rezonans:** Hareketsiz parçaların doğal frekanslarının bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkar. Bu, durağan parçaların (motor bloğu, gövdeler, boru sistemleri vs.) doğal frekanslarının bir yada bir kaçının enerjilenmesi, uyarılması sonucu rezonansa girmeleridir. Statik rezonans, dinamik olmayan bir olgu olduğundan genellikle makinenin çalışma hızıyla ilgili değildir.
- ii. **Dinamik Rezonans:** Dönme hareketi yapan bir makine elemanının doğal frekansının enerjilenmesi, uyarılması sonucunda bu eleman rezonansa girer. Bu duruma dinamik rezonans, olduğu rotor hızına kritik hız denir. Bir çok durumda, çalışma hızı, dinamik parçanın doğal frekansını etkileyen zorlayıcı kuvvettir.

Dinamik rezonans ile özellikle fanlarda sıklıkla karşılaşılır. Bunun sebeplerinden ilki, kayış kasnaklı sistemlerde kasnakların

aşınması sonucu fan hızının artması, ikincisi ise, özellikle kirli yerlerde çalışan fanların yüzeylerine yapışan kirleticilerin fan ağırlığını arttırmasıdır. Her iki durumda da, çalışma hızı kritik hız ile çakışacak şekilde değişebilir[32].

vi. Mekanik gevşeklik: Genellikle 2XRPM veya çalışma hızı harmoniklerindeki yüksek titreşim ile kendini gösterdiği kabul edilmekle birlikte, 3 farklı ve kendine has özellikleri olan mekanik gevşeklik türü vardır. Mekanik gevşeklik ile ilgili olarak söylenebilecek en önemli şey, titreşime neden olmamasıdır. Gevşeklik çoğunlukla, makinenin diğer problemlere verdiği tepkidir.

i. Tip A (Genel gövde / baskı gevşekliği): Bu tip gevşekliğe, makine ayağı, taban plakaları yada beton zeminin gevşekliği (zayıflığı), bozulmuş yada kırılmış dolgular, gövde yada tabanın çarpılması ve gevşek bağlantı cıvataları sebep olur. 1XRPM’de yüksek titreşim değerleri gösterir ve benzer spektrumlara sahip olduklarından, bu tip mekanik gevşeklikler, balanssızlık ve ayarsızlık ile karıştırılabilirler. A tipi gevşeklikte iki faz durumu gözlemlenir.

Her yataktaki yatay ve dikey fazlar karşılaştırıldığında, titreşim, 0^0 veya 180^0 deki faz farkıyla yöndeş olarak bulunur.

İlk faz durumu ortaya çıkmışsa, ölçümlere sadece yataklarla sınırlandırılmamalı, makine ayak bağlantıları ile zemine de bakılmalıdır. Zayıf ayağa bağlı çarpılma, yine 1XRPM’de balanssızlığı andıran bir başka durumu gösterir. Sorunun çarpılma olduğu durumlarda faz ve genlik ölçümlerinde makine ayağı, taban plakası ve beton zeminin aynı yönde titrediği görülür. 4 cıvatanın birinde, veya sağ ön sol arka, yada sol ön sağ arka cıvatada diğerlerine göre daha yüksek titreşim değerleri alınır. Titreşimin giderilebilmesi için ayaklardaki yüksek genlik farklarının giderilmesi, yani zayıf ayağın kuvvetlendirilmesi gerekir.

ii. **Tip B (Sarsıntı yada gövde çatlağı sebebiyle gevşeklik):** 2XRPM gevşeklik sendromu çoğunlukla, tezgâhın gövdesinde çatlak olması durumunda, farklı boyutlardaki destek ayaklarının sebep olduğu sarsıntı hareketleri, rulman yataklarının gevşek kalmış cıvataları gibi durumlarda ortaya çıkar.

Genellikle radyal yönde, 2XRPM'deki titreşim genliği, 1XRPM'deki genliği %50'den fazla geçmiyordur. Genlikler düzensiz, dengesizdir. Bu gevşeklik durumu oluştuysa gidermek son derece güçtür.

iii. **Tip C:** Yataktaki gevşek rulman yada parçaların uygunsuz birleştirilmesi türündeki gevşekliklere, yataкта aşırı iç boşluk olması, rotor gevşekliğı ve rulmanın gevşeyip şaft üzerinde dönmesi gibi durumlarda rastlanır. Tip C en çok karşılaşılan gevşeklik türüdür. Balanssızlıktan farklı bir yönde titreşim sinyalleri verir.

Eğer harmoniklerin genlikleri fazla ise 0,5XRPM'de hatta 0,3XRPM'de frekanslar oluşturur, ancak bunlar tam katlardakilere göre oldukça azdır. 0,5XRPM'deki harmonikler genellikle balanssızlık yada kaçıklık gibi diğer problemler tarafından oluşturulurlar. Çoğunlukla radyal yönde görülür, ancak gevşeklik türüne göre eksenel de olabilir. Faz ölçümlerinde yatay ve dikey yönler arasında 0^0 ile 180^0 arasında değişen çelişkili sonuçlar alınabilir.

Rotor gevşekliğı durumunda ise, her çalıştırmada faz ve genlik ölçümleri farklı sonuçlar verir. Bu tip rotorlarda dengeleme yapmak imkansızdır.

Tip C olarak yorumlanan bir gevşeklik ile karşılaşırsa dikkat edilmelidir, çünkü yatağındaki gevşek bir rulmanı gösteriyor olabilir. Bu durum eğer fark edilmezse, rulman dağılına kadar şaftın üzerinde çok büyük hasara neden olabilir.

vii. **Rulman arızaları:** Rulmanların kalan ömrü, yaydıkları titreşim miktarı ile son derece ilgilidir. Yapılan ölçümlerden alınan verilerle kalan rulman ömrü

tahmin edilip, bu tahmine göre bir acil bakım planı oluşturularak beklenmeyen arızaların önüne geçilebilir.

Rulmanların, modern tezgâhlardaki hassasiyeti sağlayan en kritik parçalardan olduklarını söylemek pekte yanlış sayılmaz. Bununla birlikte hassasiyet dereceleri, büyüklük ve tiplerine göre rulmanların işletmeler için ciddi maliyetler oluşturduğu da bir gerçektir. Çalışan rulmanların sadece %10-20'lik kısmının tasarım ömrüne ulaşabilmesi konunun önemini ortaya koymaktadır. Eşitlik E 03'te, rulman teorik ömrünün hesabı gösterilmiştir.

$$L_{10\text{ÖMÜR}} = \left(\frac{16.666}{RPM} \right) \left(\frac{\text{Dinamik yük}}{\text{Gerçek yatak yükü}} \right)^P \quad \text{E 03}$$

$L_{10\text{ÖMÜR}}$: Rulmanların saat cinsinden tasarı ömrü

RPM: Devir sayısı

Dinamik yük: Rulmanın 1.000.000 devirlik ömrüne karşılık gelen ortalama yük

Gerçek yatak yükü: Rulmana gerçekte etkiyen yükür

P: Sabit katsayı (bilyeli rulmanlar için 3, makaralı rulmanlar için 10/3)

Formül dikkatle incelendiğinde, rulmanın teorik ömrüne ulaşabilmesi için, gerçek yatak yüklerinin asgari düzeyde tutulmasının önemi görülmektedir.

Durum izleme için kullanılacak uygun titreşim parametreleri

Titreşim ölçümü, rulman analizi yaparken yeterli olmayacak, ivme, hız yada deplasman parametrelerinden biri kullanılacaktır ancak bunların hepsi aynı hassasiyeti vermeyecektir.

i. Deplasman: Deplasman ölçümüyle, yararlı rulman hasar bilgilerinden bir çoğu yakalanamaz. Deplasman ölçümü, düşük frekanslarda hassastır. Deplasman ölçümünün 200 RPM'den düşük hızlarda çalışan makinelerde tercih edilmesinin en önemli sebebi de 1XRPM'i çok iyi göstermesidir,

ancak rulman sorunu iyice ilerlemeden bu sorunun oluşturduğu frekansları yakalayamaz.

ii. İvme: Deplasman ölçümünün tersine, ivme ölçümüyle rulman arızalarının oluşturduğu yüksek frekansların büyük çoğunluğu yakalanır. Ancak ivme ölçerlerle çalışmaya alışık olmayanlar için çok erken alarmlar verebilir.

iii. Hız: Hız ölçümüyle düşük hızlarda bile birçok rulman hasar frekansı yakalanabilir. İvme ve deplasman sensörlerinin aksine, hız sensörlerinde 10-2.000 Hz arasında ölçüm yapılabilir. Hızı aynı kalan rulman hasar frekansları eşit ağırlıklı olarak değerlendirilir. Ancak, 10.000 RPM'den daha büyük dönüş hızlarında ivme ölçümü, en iyi rulman sağlığı göstergesidir.

Hasarlı rulmanlar, çeşitli hasar frekansı üretirler. Bunlar; rasgele ultrasonik sesler, rulman elemanlarının doğal frekansları ve dönel hasar frekanslarıdır.

Rasgele ultrasonik sesler: Bu frekanslarda ölçümler 5.000 ile 60.000 Hz arasında, çeşitli enstrüman ve tekniklerle yapılabilir.

Rulman elemanlarının doğal frekansları 500 ile 2.000 Hz arasında değişir. Diğer tüm elemanlar gibi, bu elemanlarda bir etkiye maruz kaldıklarında bu frekanslar arasında gidip gelirler. Rulman bilye veya makaralarının bileziklerde oluşturdukları küçük etkilerle bunların doğal frekansları da oluşur. Bu sebeple mikroskobik olarak başlayan rulman hasarları bu frekansları etkileyerek ikincil bir tespit frekansı oluştururlar. Rulmandaki hasar büyüdükçe, doğal frekanslardaki tepkiler de artacaktır. Sonuçta, aşınma oluştuğunda, bu noktaların etrafında daha fazla frekans görülecektir. Bunların çoğu, bu doğal frekansların 1XRPM yan bandı olarak görülür.

Dönel hasar frekansları: Yıllar süren çalışmalar sonucunda, rulman iç bileziği, dış bileziği, kafesi veya bilye elemanlarının hasarlarını tespit etmeye yardımcı olan bir dizi formül geliştirilmiştir. Aşağıda verilen eşitlikler rulmanın geometrisine, bilye veya makara sayısına ve dönüş hızına dayanılarak türetilmişlerdir.

$$\text{Rulman iç bilezik hasarı} \rightarrow BPF_I = \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \Phi \right) \times RPM \quad E\ 04$$

Rulman dış bilezik hasarı \rightarrow

$$BPF_O = \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \Phi \right) \times RPM = N_b \times FTF \quad E\ 05$$

$$\text{Bilye (makara) hasarı} \rightarrow BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \Phi \right)^2 \right) \times RPM \quad E\ 06$$

$$\begin{aligned} \text{Kafes arızası} \rightarrow FTF &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \Phi \right) \times RPM \\ &= 0,35 - 0,45 \times RPM \end{aligned} \quad E\ 07$$

Eğer iç bilezik sabit, dış bilezik hareketli ise, kafes arızası formülündeki negatif işaret pozitif ile değiştirilir, böylece $FTF \sim 0,55 - 0,65 \times RPM$ olur.

N_b = Bilye (makara) sayısı

B_d = Bilye (makara) çapı

P_d = Rulman adım çapı

Φ = Temas açısı

Rulman hasar frekanslarını diğer frekanslardan ayıran en temel fark, rulman hasar frekansının normal zamanlarda olmaması gerektiğidir. Makineler normal durumlarda da titreşimler yaydığından $1 \times RPM$ deki frekans daima vardır ama rulman frekansları için bu geçerli değildir. Rulman

hasar frekansları, çalışma hızının tamsayı olmayan katlarındadır (5,78X yada 7,14X gibi).

Rulmanlarda, genellikle ilk arızalanan elemanlar bileziklerdir, bu yüzden önce bilezik frekansları ortaya çıkar. Daha sonra kafes frekansı, bir diğer frekansın yan bandıymış gibi gelişmeye başlar. Bilye veya makara frekansları da benzer şekilde bir iç yada dış bileziğin altında yada üstünde bir yan bant olarak oluşur.

Bilye yada makaralar arızalandığı zaman sadece bilye dönüş frekansında (BSF) değil, kafes frekansında da bir frekans oluşturur. BSF nin ortaya çıkması her zaman bilye veya makara arızasını göstermez. Kafesin kırık olduğu durumlarda da BSF ortaya çıkar.

Eğer birden fazla bilye veya makara da sorun varsa, bu sayı X BSF de bir frekans oluşturur. Rulmanlar için kabul edilebilir bir titreşim genliği vermek doğru değildir, çünkü rulmanlar çok çeşitli makinelerde, değişik hassasiyetlerde ve değişik hızlarda çalışırlar. Bu sebeple, rulman arızaları araştırılırken dikkat edilmesi gereken temel nokta, rulman hasar frekansları harmoniklerinin sayısıdır. Eğer 1XRPM yada diğer arıza frekansları kadar arayla yan bantlar bulunuyorsa, genliğin bir önemi yoktur. Bu durumda rulman mümkün olan en kısa zamanda değiştirilmelidir.

Rulmanın üzerinde aşırı yük oluşması durumu, yine rulman frekansları kullanılarak tespit edilebilir. Yerine uygun olarak konulmayan bir rulman göz önüne alınırsa, rulman iç boşlukları kasıntı dolayısıyla sıfırlanır ve rulman bileziklere sürtünmeye başlar. Bu durumda, rulman çalışmaya başladığı andan itibaren iç ve dış bilezikte bilye geçiş frekansı (BPF) oluşur. Bu durum hatalı yerleştirilen aksenal rulmanlar için de geçerlidir.

viii. Dişli arızaları: Dişliler, hareket ve güç aktarımında sıklıkla kullanılan makine elemanlarıdır. Dişli arızalarının tespitinde dişli ağ frekansını (GMF) kullanmak gerekir. GMF değeri eşitlik E 08'den bulunur.

$$GMF = \text{dişli sayısı} \times \text{dişlilerin dönüş hızı}$$

E 08

Dişli arızalarının en sık yakalandığı frekanslardan biri 3XGMF frekansıdır. Bunun sebebi, dişliler çalışırken dişlerin girişi sırasında kayma sonrasında yuvarlanma ve çıkarken yeniden kayma frekansında GMF oluşmasıdır. Dişli analizleri en az 3,25XGMF ölçümleri gerektirdiğinden, bazen aynı noktada 2 farklı titreşim sensörü kullanmak gerekebilir. İlki 40 yada 50XRPM frekansında olup balanssızlık, eksantriklik, ayarsızlık, vs türü arızaların tespitinde, ikincisi ise daha yüksek frekanslarda, potansiyel dişli arızalarının tespitinde kullanılır. Helis dişliler ve konik dişliler aşındıklarında aksenal yönde daha fazla titreşime neden olurken, düz dişlilerin en yüksek titreşimleri radyal yönlerde olur.

Dişli boşlukları da dişlilerin ömürlerinde son derece önemlidir. Tüm dişlilerde belirli bir çalışma boşluğu olması zorunludur. Bu boşluğun fazla yada eksik verilmesi dişlilere etkiyen yükü çok büyük oranda arttıracığından, dişli ömrünü büyük oranda azaltır. Dişli arızalarının temel göstergeleri şunlardır;

Dişlilerdeki aşınmaların temel göstergesi 1XGMF yada harmoniklerindeki genlik artışlarıdır, ancak sadece dişli frekansını gözlemlemek bazen sakıncalı olabilir, çünkü yük durumuna göre genliklerde 2-3 kata kadar artma olması son derece normaldir. Genliklerle birlikte, dişli frekanslarını çevreleyen yan bant frekanslarını izleyerek daha fazla bilgi edinmek mümkün olabilecektir. Bu yan bant frekansları karşılaştıkça her dişlinin RPM si kadar aralıkta oluşur.

Normalde, eğer dişliler iyi durumdaysa, karşılıklı dişler birbirlerine göre doğru ayarlanmışlarsa ve kaçık değilse, en yüksek genlik 1XGMF’de oluşur ve 2XGMF ile 3XGMF’deki değerler düşüktür.

Çoğunlukla ilk dişli aşınma frekansları, kayma – dönme – kayma hareketi sebebiyle 3XGMF’de oluşur. Bu durumda sadece bu noktadaki genlik artışına değil, yan bantlardaki daha büyük genlik artışlarına dikkat edilmelidir.

Eğer aşınmış diş sayısı birden fazla ise, GMF etrafında, aşınmış dişleri olan her dişlinin RPM’si kadar aralıklarla yan bantlar oluşacaktır.

ix. Elektriksel arızaların tespiti: Hernekadar, titreşim analizi ile elektriksel problemlerin tespit edilebilmesi garip görünse de, motorun oluşturduğu manyetik alanın ve tetiklediği manyetik kuvvetlerin yataklara iletildiği ve bunlarında titreşimler olarak algılanacakları bir gerçektir.

Elektrik motorlarıyla ilgili olarak bilinmesi gereken başlıca eşitlikler aşağıdadır;

$$N_s = \frac{120F_L}{P} \quad \text{E 09}$$

$$F_s = N_s \times RPM \quad \text{E 10}$$

$$F_p = F_s \times P \quad \text{E 11}$$

$$RBPF = \# \text{ Rotor çubuğu} \times RPM \quad \text{E 12}$$

F_L : Elektrik hat frekansı (genellikle 50 Hz)

RPM: Rotor Hızı

N_s : Senkron hızı

F_s : Kayma frekansı ($N_s - RPM$)

F_p : Kutup geçiş frekansı

P: Kutup sayısı

RBPF: Rotor çubuğu geçiş frekansı

Birçok elektriksel problem 2Xelektriksel hat frekansında tespit edilir. Bunun sebebi, 2 kutuplu 3600 rpm'lik bir motorun 1 turunda, hafif eksantriklik durumunda, rotor ile statorun birbirine en yakın noktasından 2 kez geçmesidir. Rotorla statorun doğru olarak merkezlenemediği durumlarda, rotorla stator arasında değişken bir hava boşluğu oluşur ve bu boşluk her zaman 2Xhat frekansı titreşimini etkiler.

a. Stator Problemleri: Titreşim analizi metoduyla stator eğikliği, lamel problemleri (izolasyonun hasar görmesi sonucu oluşacak lokal ısınmalar) ve gevşeklikler gibi problemler tespit edilebilir. Bu problemlerin karakteristikleri; stator sorunları 2Xhat frekansında yüksek titreşimler oluştururlar. Ancak stator içinde oluştuklarından, kutup geçiş frekansı yan bantlarını oluşturmayabilirler.

Stator eksantrikliği, rotor ile stator arasında eşit olmayan hava boşlukları oluşturur ve büyüklüğü en büyük boşluğa bağlı olarak değişir. En büyük manyetik kuvvetler, en küçük rotor-stator boşluğunda oluşur. Bu yüzden dönüş esnasında, elektromanyetik kuvvetler en azdan en fazlaya doğru hat frekansının 2 katı frekansında titreşim oluşturur.

b. Eksantrik rotor ve değişken hava boşluğu: Eksantrik bir rotor, eşmerkezli dönemeyeceği için, motor ile stator arasında değişken bir hava boşluğu oluşur ve eksantrik bir rotor çoğunlukla $2F_L$ 'de yüksek genlikli titreşim oluşturur ve kutup geçiş frekansları kadar aralıklarla yan bantları vardır. Eksantrik rotorlar özel olarak yataklardan ayar isterler, bu sayede hava boşluğu, toleranslar dahiline getirilebilir. Bu noktadan hareketle, eksantrik rotor problemini hatalı ayarlanmış yatakların yapabileceği söylenebilir.

c. Rotor problemleri: Titreşim analizi ile tespit edilebilecek rotor problemleri; kırık, çatlak rotor çubukları, kafesin yüksek dirençli, hatalı bağlantıları, arızalı lameller, gevşek yada bağlanmamış iyi iletim yapmayan rotor çubukları olarak sıralayabiliriz. Bu problemler aşağıdaki karakteristiklerle kendilerini belli ederler.

Kırık veya çatlak rotor çubuklarının belirtisi, çalışma hızı harmoniklerinde ve 1XRPM'de kutup geçiş frekansı yan bantlarının olmasıdır. Buna ek olarak kırık veya çatlak çubuklar ve yüksek dirençli bağlantılar, 2, 3, 4 ve 5. çalışma hızı harmoniklerinde kutup geçiş yan bantları oluşturabilirler.

- x. **Kayış / kasnak arızaları:** Kayış kasnaklı tahrik sistemleri endüstrinin bir çok alanında kullanım yeri bulmaktadır. Bu sistemler, eğer uygun biçimde ayarlanırlarsa, oldukça düşük titreşim değerleri ile çalışabilmektedirler. Bu tip sistemlerde titreşim değerini belirleyen üç temel unsur, kasnakların ayarı, eş merkezliliği ve kasnak yapısıyla bağlantı şeklindedir.

Titreşim analizi ile tespit edilebilecek kayış kasnak sistemi arızaları aşağıda açıklanmaktadır.

- i. **Aşınmış, gevşek yada hatalı ayarlanmış kayışlar:** Kayış frekansı, eşitlik E 13'te gösterilen şekilde hesaplanır. Eşitlikte, tüm bilgiler aynı kasnaktan alındığı sürece, kasnağın tahrik eden yada tahrik edilen olmasının bir önemi yoktur. Titreşim analizi ile kayışlardaki çatlaklar, kopuk parçalar, sert yada yumuşak noktalar ve form değişiklikleri gibi hasarlar tespit edilebilir.

$$Kayış\ frekansı = \frac{(3,142)(kasnak\ RPM)(kasnak\ çapı)}{Kayış\ Uzunluğu} \quad E\ 13$$

Aşınmış, gevşek yada ayarsız kayışlar genellikle titreşim, kayış frekansının 3 ile 4. katları arasında oluşur. Çoğunlukla 2Xkayış frekansı baskın olabilir. Bu tip kayışlar genellikle düzensiz genliklere sebep olurlar. Ayrıca eğer harmonikler kasnak hızlarından birine yakınsa, tahrik eden yada edilen kasnağın devirlerinden birinde atımlar oluştururlar.

- ii. **Kayış kasnak ayarsızlığı:** Ayarsızlık, kayış kasnak sistemlerindeki arızaların önemli bir bölümünü oluşturur. Basit düzeltmelerle titreşim genliklerinde büyük düşüşler sağlanabilir. Bu sorun aşağıdaki karakteristikleri gösterir.

Kasnak ayarsızlığı her zaman eksenel titreşimler oluşturur, bu da baskı rulmanlarının aşınmasını hızlandırır. Ayarsız kasnaklar 1XRPM'de, çoğunlukla eksenel yönde titreşimler oluştururlar.

c. Eksantrik kasnaklar: Eksantrik kasnaklar, kayış kasnak sistemlerindeki titreşimin çok önemli bir sebebidir. Bu tip kasnakların 1XRPM'sinde yüksek genlikli titreşim oluşur. Balanssızlığın aksine, eksantrik kasnağın oluşturduğu reaksiyon kuvveti, kasnağın 360° dönüşünde eşit olarak etkimez. Güç, iki şaftın merkezleri arasında bant gergisi yönünde yoğunlaşmıştır. Sonuçta bu titreşim birbirinden farklı ve aralarında 180° faz farkı olan yatay ve dikey faz ölçümleri alınmasına neden olur. Bileşke titreşim kuvveti, balans alma işlemiyle giderilemez.

d. Kayış rezonansı: Doğadaki her madde gibi, kayışlarında kütlelerine, bükülmelerine ve çalışma esnasındaki gergilerine göre doğal frekansları vardır. Kayışın doğal frekansı basitçe, kayışın çekilip bırakılması sonucu oluşan tepkisinin ölçülmesiyle bulunabilir.

Kayışın doğal frekansı 1XRPM'e çok yakınsa, kayış çarpınma hareketi yapar. Kasnakların hızı kayış rezonansını tetikleyebilir. Kayış doğal frekansı, kayış gergisini arttırarak, kayış uzunluğunu veya kayış merkez mesafelerini değiştirerek yada araya avare bir kasnak koyarak kolayca değiştirilebilir.

e. Motor temel/gövde rezonansı sebebi ile aşırı titreşim: Genelde kayış tahrikli makinelerde, motorda fazlaca titreşim olabilir. Ancak spektrum analizi yapıldığında, motor hızında motorda düşük titreşim, fan hızında yüksek titreşim değerleri alınır. Bu radyal yada eksenel yönde olabilir. Bunun sebebi genellikle motor temeli/gövdesinin doğal frekansından etkilenmesidir. Eğer tespit rezonans olursa, temel yada beton güçlendirilmelidir.

f. Gevşek kasnak yada fan göbeği: Bazı durumlarda titreşimin nedeni gevşek bir kasnak yada fan göbeği olabilir.

Bu durumda özellikle 1XRPM'de ve bazı çalışma hızı harmoniklerinde yüksek genlikli titreşim oluşur. Fazın kararsızlığı, bu tip problemlerin en büyük göstergesidir. Normal şartlarda faz her yönde

kararlı olmalıdır, ancak eğer konik geçme göbek yada sabitleme cıvatalarından herhangi biri gevşediyse, sistem her çalıştırıldığında farklı faz ve titreşim değerleri okunur. Balans alma işlemi soruna geçici bir çözüm olabilir ancak göbeğin şaft üzerinde kaymasıyla tüm değerler yeniden değişecektir. Böyle bir durumda yapılması gereken, şaft yada kasnak göbeğindeki tüm cıvataların tam olarak sıkıldığını kontrol etmek ve konik geçmelerin uygun şekilde yapılıp yapılmadığına bakmaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Patton'a göre, periyodik bakımın istenilen ölçüde başarılı olabilmesi için iki temel şart vardır. Bunlar: planlama ve disiplindir. Planlamadan kasıt doğru adımların atılması, doğru zamanda değiştirilmesi gereken parçaların değiştirilmesi ve ayarların yapılmasıdır. Disiplin ise, ki günümüzde birçok organizasyondaki temel eksikliklerdir. planlaması yapılan işlerin tamamının doğru bir şekilde ve zamanında eksiksiz olarak yapılmasıdır[6].

Mobley'e göre, kestirimci bakım, tezgâh ve sistemlerin mekanik durumlarının, çalışma verimliliklerinin ve diğer göstergelerinin takip edilerek, tamiratlar arasındaki sürenin mümkün olduğunca uzatılmasıdır. Bu, aynı zamanda, arızaların sayısını ve neden oldukları maddi zararları da azaltır[4].

Köse, kestirimci bakım tekniklerinin uygulamaları sonrasında karşılaşılan en büyük güçlüğün, tezgâhın analiz öncesindeki durumunun bilinmemesi olduğunu belirtmiş ve özellikle titreşim analizi sonucu ortaya çıkarılan yüksek frekanslı sinyalin, arıza olabileceği gibi makinenin karakteristik bir özelliği, dizayn, imalat, montaj veya proses kaynaklı olabileceğini ve bunun doğru olarak tespit edilebilmesi için makine özelliklerinin, daha önce yapılan titreşim analizi sonuçlarının ve arıza geçmişinin bilinmesinin önemine dikkat çekmiştir[39].

Gücin'e göre, bir işletmede, kestirimci bakım uygulamalarının başlatılmasına karar verildiğinde, öncelikle izlenecek tezgâhlar belirlenerek kritiklik durumlarına karar verilir. Tezgâhlar fabrika planı üzerinde işaretlenerek her tezgâh için ölçüm noktası türü ve yönü belirlenir. Daha sonra ölçüm noktaları tezgâh üzerinde işaretlenir. Her tezgâh için bir uyarı ve arıza limiti konur. Her tezgâh için, o tezgâhın özelliklerini ve varsa arıza geçmişini gösteren kartlar hazırlanır. Her tezgâhtan temel ölçüm değerleri alınır ve ölçümler arası zaman dilimleri belirlenir. Eğer tezgâhların belirli bir ismi yada kodu yoksa, tezgâhlar kodlanır. Son olarak ölçüm organizasyonu yapılarak uygulamayı yapacak olan personel eğitilir[9].

Köse, yaptığı çalışmada, makine titreşimi ölçüm analizi ile arızanın kaynağına inilebilmesinin ancak deneyim ve bilgi birikimiyle mümkün olabileceğini belirtmiş, bu nedenle özellikle endüstriyel uygulamalarda tek seferde sonuca gitmeye çalışmak yerine belirli aralıklarla yapılan ölçümlerin sonuçlarının karşılaştırılması metodunun

kullanılması gerektiğini söylemiştir. Ölçümlerin sonucunda elde edilen grafiklerde, arıza frekanslarında değişimler görülmekte, karakteristik işaretler ile arıza sonucu oluşan sinyaller karşılaştırma metoduyla birbirlerinden ayrılmaktadır[36].

Beebe'e göre tüm makineler titreşim üretir. Önemli olan bu titreşimin ne kadarının normal ne kadarının fazla olduğu, fazladan oluşan titreşimin makineye etkisinin ne olacağı ve bu titreşimin nasıl giderilebileceğidir. Titreşim analizi ile bu sorulara cevap bulunabilmektedir[12].

Goodwin'e göre, dönel bir makinedeki en büyük sorunlardan birisi balanssızlıktır. Balanslı çalışan bir makine yüksek titreşime maruz kalır ve aşınma miktarları artar. Bununla birlikte ses düzeyi yükselir ve bir çok durumda malzeme yorulma ömrü azalır. Bu sebeple dönel makinelerde balans konusu dikkatli olarak ele alınmalıdır[37].

Yanabe ve Namura, sabit ivme ile hızlanarak iki kritik hız noktasından geçen bir şaftı inceleyip sönümlenme kuvvetini de dikkate alarak bir dizi teorik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları analizler sonucunda ortaya çıkan formüller ve bunların uygulanması sonucu elde edilen değerler ile gerçek uygulamalar sonucu elde edilen değerlerin örtüşmesi sonucunda, geliştirdikleri formüllerin geniş bir hız aralığında geçerli olduğunu belirtmişlerdir[40].

Lees ve Pandey, şanzımanlar üzerinde yürüttükleri çalışmalarında balanssızlık ve rulman hasarı problemlerinin yanı sıra dişlilerdeki geometrik profillerin ve bunlardaki aşınmaların makinelerde yoğun titreşime neden olduklarını göstermişlerdir. Türettikleri formülleri kullanarak elde ettikleri teorik sonucun deneysel olarak alınan sonuçlarla uyduğunu anlatmışlardır[41].

Taylor çalışmalarında, bir dişlideki hatalı diş ve/veya dişlilerin belirli frekanslarda atımlar oluşturacağını anlatmış, zaman sinyali, spektrum frekansı, Şekil, genlik ile toplam ve fark frekansları analizi ile hangi dişlide hasarlı dişliler olduğunu, her dişlideki hasarlı diş sayısını ve belirlenen bir referans noktasına göre hasarlı dişlinin konumunun belirlenebileceğini söylemiştir[42].

Köse, makine titreşimlerinin büyük bir kısmının rezonans kaynaklı olduğunu belirtmiş ve titreşim analizlerinin rezonans ölçümleriyle mutlaka desteklenmesi gerektiğini vurgulamıştır. Hesaplamalarla bulunan rezonans değerlerinin makine kurulumunun ardından mutlaka test edilmesi gerektiğini, aynı şekilde, makinelere

takılan sönümleyicilerin hesaplarının montaj sonrasında rezonans frekans ölçümü ve titreşim analizi ölçümleriyle kontrol edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bunun dışında, ön analizlerin yapılmadan makine devirlerinin değiştirilmemesi gerektiğini, bilinçsizce yapılan kasnak değişikliklerinin ve frekans kontrolü uygulamalarının istenmeden de olsa kritik hızlara yaklaşp rezonansa neden olarak makineye zarar verebileceğini belirtmiştir[38].

Koyuncu, yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, kademeli bir pompanın elektrik motorundaki ve pompa grubundaki rulmanları incelemiştir. Yaptığı ilk inceleme sonucunda, titreşim değerleri alındıktan sonra çalıştığı yerden çıkarılarak atölye ortamında dağıtılan pompanın rulmanlarının bileziklerinde, çalışan yüzeylerde aşınmalar ve yataklarda ovalleşme şeklinde arıza başlangıçları tespit etmiştir. Elektrik motorunun rulmanlarında yaptığı incelemede rulmanlarda fiziksel bir hasar görmemiştir. Ovalleşen yataklar kaynak ile doldurulup işlendikten sonra rulmanları değiştirilmiş, ve pompa toplanarak çalışma bölgesine yerleştirilmiştir. Pompanın çalışması sırasında yaptığı ölçümlerle ilk ölçümleri karşılaştırdığında, Koyuncu, pompa rulmanlarının titreşim değerlerinde %20-70 arası iyileşme tespit etmiştir. Elektrik motoru rulmanlarından alınan ilk titreşim değerleri pompaya göre oldukça düşük olduğundan bu rulmanlar değiştirilmemiştir. Pompa tarafından motor yataklarına yapılan baskının ortadan kalkmasıyla elektrik motoru rulmanlarında yapılan ölçümlerin sonuçlarının bazılarında da küçük düşüşler gözlemlenmiştir ancak gerek çalışma şartları gerekse bazı ölçüm sonuçlarının ilk ölçümlere göre yüksek çıkması arıza başlangıcı olarak kabul edilmiş ve planlanacak yakın bir zamanda değiştirilmesi uygun görülmüştür[43].

Özbay da yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında hazırladığı düzenekte bir motor, kaplin, disk ve rulmanı incelemiş, sistemin normal şartlardaki çalışması sırasında, belirlediği ölçüm noktalarındaki titreşim değerlerini toplamış ve deney düzeneğinde yapay arızalar oluşturarak belirlediği noktalardan tekrar ölçümler almıştır. Yaptığı ölçümleri karşılaştırdığında, titreşim değerlerinin öngörülen biçimde arttığını tespit etmiştir[44].

3. MATERYAL ve METOT

3.1. MATERYAL

Titreşim analizi uygulamaları için, Çukurova İnşaat Makineleri San. ve Tic. A.Ş., Parça Üretim Bölümünde çalıştırılan 1996 model OKUMA LU25-2SC x 650 CNC torna tezgâhı ve 2004 model MAZAK FH 6000 CNC işleme merkezi örnek seçilmiştir. Bu tezgâhlardan OKUMA CNC torna tezgâhı yakın zamanda fener mili rulmanlarından sorun yaşamış, MAZAK işleme merkezi ise nispeten yeni bir tezgâh olduğundan kontrol grubunu temsil etmesi için incelenmiştir.

Parça üretim bölümünde bulunan CNC torna ve işleme merkezlerinin fener milleri ve elektrik motoru rulmanlarında, 3 aylık periyotlarda titreşim ölçümleri yaptırılmakta ve rulmanların durumları bu şekilde takip edilmektedir. Ölçümler 900 d/dk dönüş hızında ve her tezgâh için 11 noktada yapılmaktadır. Ölçüm sonuçları sınır değerler içerisinde olduğu sürece rutin kontrol devam etmekte, uyarı değerini geçtiğinde ise ölçüm sıklığı arttırılmaktadır.

3.1.1. OKUMA LU25-2SC x 650 CNC Torna Tezgâhı

Çukurova İnşaat Makineleri San. ve Tic. A.Ş., Parça Üretim Bölümünde TC13 koduyla çalıştırılan 1996 model OKUMA LU25-2SC x 650 CNC Torna tezgâhı, Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Tezgâhın teknik özellikleri şu şekilde sıralanabilir; Maksimum tornalama kapasitesi Ø420x650 mm dir. Fener mili delik çapı 80 mm olan tezgâh 30kW’lık elektrik motoru ve sürücüsü sayesinde 65 ile 3500 d/dak dönüş hızlarında çalışabilir. İlerleme hızı X ekseninde 15 m/dk, Z ekseninde 20 m/dk, kesme hızı ise 0,1-1.000 mm/dk dır. Takım ucu koordinat ölçme sisteminin yanı sıra, takım ucu yarıçap telafisi, otomatik tornalama operasyonları programlama, inç/metrik çalışabilme, renkli grafik ekran, aşırı yükleme, takım ucu kırılması yada körelmesi durumunda otomatik ikaz ve durma özelliklerine sahiptir.



Şekil 3.1. OKUMA LU25-2SC x 650 CNC Torna tezgâhı-1



Şekil 3.2. OKUMA LU25-2SC x 650 CNC Torna tezgâhı-2

3.1.2. MAZAK FH 6000 İşleme Merkezi

Çukurova İnşaat Makineleri San. ve Tic. A.Ş., Parça Üretim Bölümünde MC32 koduyla çalıştırılan 2004 yılı imalatı MAZAK FH 6000 CNC işleme merkezi, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Tezgâh, MAZAK firmasının orta sınıf işleme merkezlerini temsil eder, üretim yapılmayan süreleri kısaltması bakımından oldukça başarılı sayılabilecek olan FH 6000'in takım değiştirme süresi 5 sn, palet değiştirme süresi 10 sn dir, ayrıca kesme yapılmayan hareketlerdeki hızı 40 m/sn mertebesindedir. 7.000 d/dk, 10.000 d/dk ve 15.000 d/dk hızlarında 3 fener mili

seçeneği vardır. İşleme sırasında dışarıdaki palet yüklenecek parça bağlama süresinden tasarruf edilmektedir, dışarıdaki palete farklı bir parça bağlanabilir, bu sayede iki farklı pozisyonda işlenecek parçalar arka arkaya bağlanarak mamul edilebilirler. Azami işleme kapasitesi $\text{Ø}600 \times 1.000$ mm ölçülerindeki parçalardır, yükleme sınırı 1.000 kg dır. X, Y ve Z eksenlerinde sırasıyla 800 mm, 800 mm ve 880 mm hareket kabiliyeti vardır. B eksenini (tabla eksenini) 1° bölüntülüdür, 360 noktada paleti kilitleyebilir. Çevre sıcaklığına bağlı olarak vidalı milde oluşacak mikron seviyesindeki uzama veya kısalmaları telâfi edebilecek termal kompanzasyon sistemi ile otomatik takım boyu ölçme sistemlerine sahiptir.



Şekil 3.3. MAZAK FH 6000 CNC işleme merkezi-1



Şekil 3.4. MAZAK FH 6000 CNC işleme merkezi-2

3.2. METOT

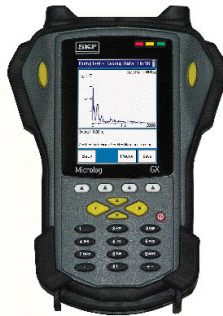
3.2.1. SKF MICROLOG GX Ölçüm Cihazı

Ölçümlerin yapılmasında, Şekil 3.5'te gösterilen SKF microlog GX serisi vibrasyon analiz cihazı kullanılmıştır.

Cihaz, farklılaşabilecek ihtiyaçlar göz önüne alınarak modüler olarak tasarlandığından, gereksinmelere göre istenilen özellikler rahatlıkla adapte edilebilmektedir. Geniş, renkli ekranı, kolay kullanım tuşları ve 400 MHz X scale işlemcisi ile çok hızlı bir veri toplama hızına sahiptir. Windows CE işletim sistemiyle çalışan cihaz, topladığı verileri sabit diskinde saklayabildiği gibi, doğrudan bilgisayara, SDIO, CF veya PCMCIA kartlara aktarabilmektedir.

Sahadaki zor koşullarda çalışabilecek şekilde tasarlanmış, IP 65 koruma (su ve toz) testi ve 2m düşme testinden başarı ile geçmiştir.

Microlog GX 75 serisi titreşim analiz cihazı ile genel makine sağlığının uygun standartlara (ISO, BS, ANSI) veya kullanıcı tanımlı standartlara göre kontrol yapılabilir. Bir ve iki düzlemde yerinde dinamik balans alınabilir. Doğal frekans tanımlaması, çatlak ve rezonans tespiti yapılabilir. Bunun yanında FFT analizörüyle rulman arızaları, dişli hasarları, eksen kaçıklığı ve balanssızlık gibi makine arızalarının tespiti, envelope acceleration tekniği ile yüksek frekanstaki döner ekipmanların analizinin yapılabilmesi ve takometre sinyali olmadan basit vektörel faz diyagramlarının görüntülenmesi mümkündür. Veri kayıt modülü ile de gerçek titreşim değerlerini kaydedebilir, WAV formatında çift kanal kayıt yapabilir ve bilgisayar üzerinden playback yapmak üzere e-posta dosyası oluşturabilir.



Şekil 3.5. SKF microlog GX serisi vibrasyon analiz cihazı

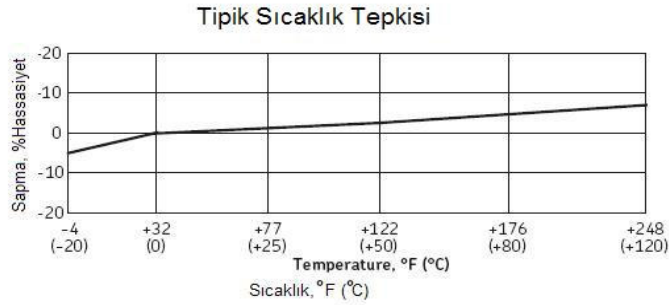
3.2.2. Sensör

Titreşim izleme ve analiz donanımında meydana gelen gelişmelere rağmen, sensörlerin seçimi ve montaj Şekilleri, bir izleme programının başarısını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Düşük kalitede sensörler kurarak tasarruf sağlamak, makineden gelen bilginin sıklıkla yanlış ve güvenilmez olmasına yol açtığından mantıklı değildir. Kalitesiz sensörler kolaylıkla yanıltıcı veriler iletebilir ya da makineye dair kritik durumlar söz konusu olduğunda bunu gözden kaçırabilir. Bu nedenle başarılı bir izleme programı için doğru tip ve kalitedeki sensörler en uygun montaj şekliyle monte edilmelidir.

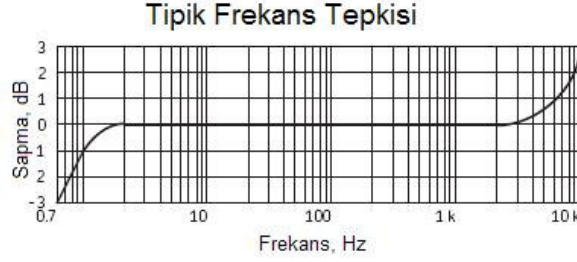
Bu çalışmada kullanılan sensör, Şekil 3.6'da gösterilen SKF CMSS 2200 model titreşim sensörüdür. Sensör, hassasiyeti 100mV/g olan bir genel kullanım amaçlı sensördür. Frekans aralığı 0,7Hz ile 10kHz arasındadır. Frekans hassasiyeti sapmaları Şekil 3.7'de verilmiştir. Hermetik yapıdadır ve korozyon direnci yüksektir. Saha çalışmalarında tercih edilen bir sensör tipidir. Çalışma sıcaklığı arası -50 ile +120 °C dir, bu sıcaklıklar arasındaki sapma değerleri Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Uygulama sırasında sensör, ölçüm noktalarına mıknatıs ile tutturulmuştur.



Şekil 3.6. SKF CMSS 2200 Model Titreşim Sensörü



Şekil 3.7. CMSS 2200 Sıcaklık tepkisi grafiği



Şekil 3.8. CMSS 2200 Frekans Tepkisi Grafiği

3.2.3. Kesikli Fourier ve Hızlı Fourier Dönüşümü

Zaman ve/veya frekans ile tanımlanan fonksiyonlar arasındaki bazı temel matematiksel ilişkiler, şok ve titreşim problemlerindeki bilgisayar destekli deneysel uygulamalarda ve raporlama özelliği olan ölçüm cihazlarında ortak olarak kullanılırlar. Burada dikkat edilmesi gereken temel nokta, bilgisayarlı işlemlerde fonksiyonların işlem görebilmesi için kesikli (ayrık) frekanslarda yada zaman aralıklarında olmaları gerekliliğidir.

- a. Kesikli Fourier dönüşümü:** Pratikte, bilgisayarlı uygulamalarda, $x(t)$ sadece sonlu zaman aralığında yada belirli bir T ölçüsünde, Δt aralıklarıyla dizilmiş N tane zaman aralığının toplamı olarak tanımlıdır. Kesikli Fourier dönüşümü çifti, eşitlik E 14 ve E 15'deki gibi bulunur.

$$S_x(m\Delta f) = \Delta t \sum_{i=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-i2\pi m\Delta f n\Delta t} \quad m = 0, \dots, \left(\frac{N}{2}\right) \quad \text{E 14}$$

$$x(n\Delta t) = \Delta f \sum_{m=0}^{N-1} S_x(m\Delta f) e^{i2\pi m\Delta f n\Delta t} \quad n = 0, \dots, (N-1) \quad \text{E 15}$$

S_x setleri, Fourier serisi $x(t)$ açılımlarının katsayılarıdır. Eğer $x(t)$ periyodik değil ise, kesikli Fourier dönüşümü $x(t)$ yi olduğu gibi, gerçek Fourier dönüşümünün bir değeri gibi hesaplar.

Shannon teoreminin bir sonucu olarak, ayrık Fourier dönüşümünün $x(t)$ 'si, maksimum F_{\max} frekansına kadar Δf aralıklarla yerleştirilmiş $N/2$ frekansında tanımlıdır. Aşağıda bazı tanımlar verilmektedir.

Blok ölçüsü;

$$N = \frac{T}{\Delta t} \quad \text{E 16}$$

Frekans ölçüsü;

$$F_{\max} = 1/2\Delta t = \Delta f(N/2) \quad \text{E 17}$$

Örnekleme aralığı;

$$\frac{1}{\Delta t} = 2F_{\max} \quad \text{E 18}$$

Frekans çözünürlüğü;

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad \text{E 19}$$

Kayıt uzunluğu;

$$T = \frac{1}{\Delta f} = N\Delta t \quad \text{E 20}$$

Kesikli Fourier dönüşümü analizini uygularken, blok ölçüsü N’de herhangi bir sınırlama olmadan seçilebilecek parametreler sınırlıdır. Frekans ölçüsü yada örnekleme aralığı, ikisi birden olmamak şartı ile isteğe bağlı olarak seçilebilir. Aynı şekilde, frekans çözünürlüğü yada kayıt uzunluğu seçilebilir. Eğer blok ölçüsü sabit ise, diğer dört parametreden sadece bir tanesi seçilebilir.

Kesikli Fourier dönüşümü ve bundan türetilmiş diğer değerler bazı hatalardan kolaylıkla etkilenirler. Bu hatalardan en tanınanı, x(t) sinyalinin kesikli Fourier dönüşümünün F_{\max} değerinden daha yüksek enerji yada

frekans elemanları içermesi durumudur. Örnekleme yada dijitalleştirme prosesleri sebebiyle, bu enerji kesikli Fourier dönüşümü frekans aralığındaymış gibi görünebilmektedir. Bu yanlışlığı önleyebilmek için, ya F_{\max} değeri tüm $x(t)$ frekans elemanlarını içerecek şekilde büyük seçilmeli, yada dijitalleştirilmeden önce, analog bir filtreyle verilen F_{\max} değerinin üzerindeki tüm elemanlar ortadan kaldırılmalıdır.

Spektrum sadece $m\Delta f$ ayrık frekanslarında uygun olacağından, zaman fonksiyonu kapalı periyodik olacaktır (Fourier serilerindeki gibi). Periyot, $T = n\Delta t = \frac{1}{\Delta f}$ olur. Burada n , zaman fonksiyonundaki ve frekans spektrumundaki örnek sayısını, T , zaman fonksiyonunun kayıt uzunluğunu ve Δt , zaman örnekleme boşluğunu göstermektedir.

Analog mantıkta, zaman sinyalinin ayrık örnekleme, spektrumun örnekleme frekansı f_s 'ye eşit bir periyotla kapalı periyodik olduğunu gösterir.

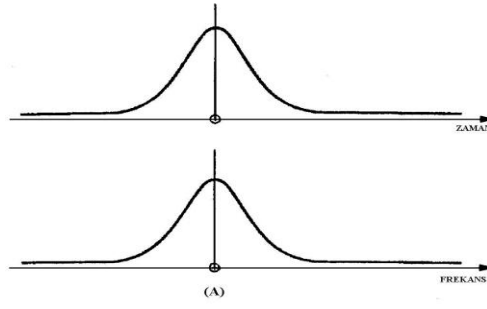
$$f_s = N\Delta f = \frac{1}{\Delta t} \quad \text{E 21}$$

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da spektrumun periyodikliği sebebi ile ikinci kısım ($m=N/2$ den N 'ye kadar), gerçek negatif frekans öğelerini gösterir ($m=-N/2$ den 0 'a kadar). Gerçek değerli zaman örneklerinde (normal durum), negatif frekans elemanlarıyla pozitif frekans elemanları E 22'deki eşitlik ile ilişkilendirilir ve spektrum devrik dönüşüm çifti olarak adlandırılır.

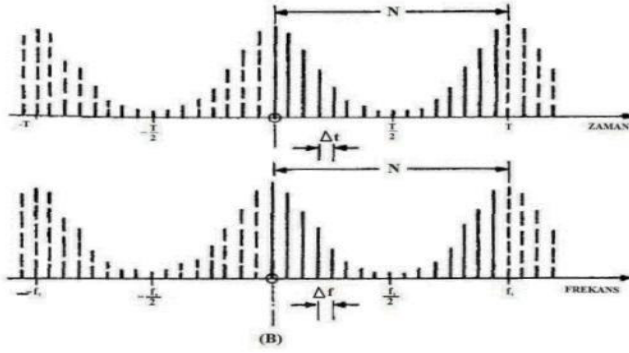
$$S_x(-m) = S_x^*(m) \quad \text{E 22}$$

Normal durumda $x(n)$ gerçek iken, sadece spektrumu $m=0$ dan $N/2$ ye kadar hesaplayıp, dönüştürülen ölçüyü aşağıdaki iki metottan biriyle yarıya indirmek yeterli olacaktır.

- i. N tane gerçek değer, $N/2$ tane karmaşık değer verecek şekilde dönüştürülür ve sonuç gerçek sonucu verecek biçimde işlenir.
- ii. Aynı sonuca ulaşabilmek için, bandın orta noktası merkezlenerek yakınlaştırma analizi yapılır.



Şekil 3.9. Fourier dönüşümü



Şekil 3.10. Ayrık Fourier dönüşümü

b. Hızlı Fourier dönüşümü (FFT_Fast Fourier Transform) algoritması:

Ayrık Fourier dönüşümü için kullanılan dijital metotlar oldukça zaman alıcıdır. FFT, modern bilgi işleme sistemindeki herhangi bir frekans tanım programındaki formülasyona dayanır. Entegral Fourier dönüşümü yönünden bakılacak olursa, hesap yapılabilmesi için fonksiyon tüm zamanlarda sürekli olmalıdır. Ancak gerçek ölçüm durumunda, veriler sadece sınırlı süreler için alınmaktadır. FFT bu noktada kesikli değerleri de kapsayacak biçimde bazı kabuller yapar. Bu kabuller, FFT algoritması uygulanan her sinyal tarafından karşılanması gereken iki durumdan birine indirgenebilir

- i. Sinyal, gözlemin zaman periyoduna göre tamamen geçici olmalıdır.
- ii. Sinyal, sadece gözlemin zaman periyodunun harmoniklerinden oluşmalıdır.

Eğer bu iki kabulden herhangi biri FFT tarafından işlenen veriyi karşılamıyorsa, elde edilen sonuç mutlaka hatalı olacaktır.

FFT analizörleri, FFT algoritmasını kullanarak veri bloklarını hesaplarlar. FFT algoritması ayrık Fourier dönüşümünü hesaplamanın en verimli yoludur ve Fourier entegral dönüşümünün de sonlu ve ayrık yaklaşımıdır. Eşitlik E 14 ve E 15'deki eşitlikler gerçek değerli zaman ve sinyaller içindir. FFT algoritması, gerçek ve karmaşık zaman serilerine eşit olarak uygulanan alttaki Eşitlik E 23 ve E 24 versiyonlarını kullanır.

$$S_x(m) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-j2\pi m\Delta f n\Delta t} \quad \text{E 23}$$

$$x(n) = \Delta f \sum_{m=0}^{N-1} (m\Delta f) e^{i2\pi m\Delta f n\Delta t} \quad \text{E 24}$$

Bu denklemler N farklı $m\Delta f$ frekansındaki spektrum değerini ve N ayrı $n\Delta t$ zaman noktasındaki $x(n)$ değerini verir[33].

4. UYGULAMA ÖRNEKLERİ

4.1. OKUMA LU25-2SC x 650 CNC TORNA TEZGÂHI

Uygulamanın ilk kısmında, Çukurova İnşaat Makineleri San. ve Tic. A.Ş. Parça üretim tesisi makine parkında bulunan ve periyodik olarak titreşim değerleri kaydedilerek takip edilen CNC işleme merkezi ve CNC tornalardan, materyal metot kısmında tanıtılan OKUMA LU25-2SC x 650 CNC torna tezgâhının fener mili üzerindeki rulmanların izleme sonuçları, 2005 yılı Temmuz ayı itibarı ile değerlendirilmiştir. Çizelge 4.1’de verilen ölçüm sonuçlarında, tezgâhın fener mili rulmanlarının arızalanmaya başladığı tespitinden sonra ölçüm sıklığı artırılmıştır. Çizelgenin son kısmındaki notlar bölümünde, ölçümü yapan teknik personelin yorum ve notları görülmektedir. Bu yorumlar ışığında, arıza daha tam olarak oluşmadan gerekli yedek parça saptamaları yapılmış ve sipariş edilmiştir, bu sırada ölçüm sıklığı artırılarak tezgâh daha yoğun gözlem altına alınmıştır. Tamamı ithal olan malzemenin gelmesinin ardından ölçüm sonuçları takip edilmeye devam edilerek üretim planlama bölümü, üretim bölümü ve tezgâh temsilcisi şirket ile zaman planlaması yapılmış, devamında ise planlanan tarihte tezgâh bakıma alınarak arıza giderilmiştir. Arızanın giderilmesinin ardından yapılan ölçümlerde, titreşimin normal seviyelere indiği görülerek, ölçüm sıklığı yeniden normal düzeyi olan üç ayda bir şekline getirilmiştir. Çizelgenin en sonundaki spektrum grafiği, yapılan son ölçüme aittir. Buradan da görüldüğü gibi çok düşük genlikli sinyaller bulunmaktadır ve yapılan işlemin başarılı olduğu sonucuna varılabilir. Grafiğin baş tarafında görülen yüksek genlikli birkaç sinyal, bir arıza hissi yaratsa da, aslında “ski slope” adı verilen geçici bir frekans dalgalanmasıdır. Bu şeklin ortaya çıkma sebebi, mıknatıs ile tutturulan sensörün içindeki piezoelektrik elemanın montaj sırasındaki sarsıntı sebebi ile titreşmesidir. Tamamen geçici olan bu olay ilk birkaç saniye görülebilir, ölçümlere herhangi bir etkisi olmadığı gibi, ölçüm almaya başlamadan önce kısa bir süre beklenmesi sonucunda grafiğe hiç girmez.

Konuyla ilgili ekonomik bilgiler ve yapılan hesaplamalar “kestirimci bakımın işletme verimliliğine ve ekonomiye katkısı” bölümünde incelenebilir.

Çizelge 4.2’de aynı tezgâhın elektrik motorunun titreşim ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Gerek çizelgedan, gerekse grafiklerden, fener mili rulmanlarına oranla çok düşük ve sınır değerlerin altında titreşim genliğine sahip bir dizi sinyal alındığı görülür. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, titreşimin genliğinin fener mili rulmanlarında takip edilen titreşimin genliğine paralel olarak artmasıdır.

Elektrik motorunun rulmanının en son ölçümde görülen spektrum grafiği çok karmaşık gibi görünse de, son derece normal ve neredeyse fener milinin spektrum grafiği ile aynıdır. Buradaki temel farklılık yukarıda anlatılan “ski slope” olayının gerçekleşmemesidir. Bunun nedeni, ölçüm alınmadan önce birkaç saniye beklenmesi dolayısıyla sensörün içinde bulunan piezoelektrik elemanın ilk sarsıntı sonrasında durağan hale geçmesidir.

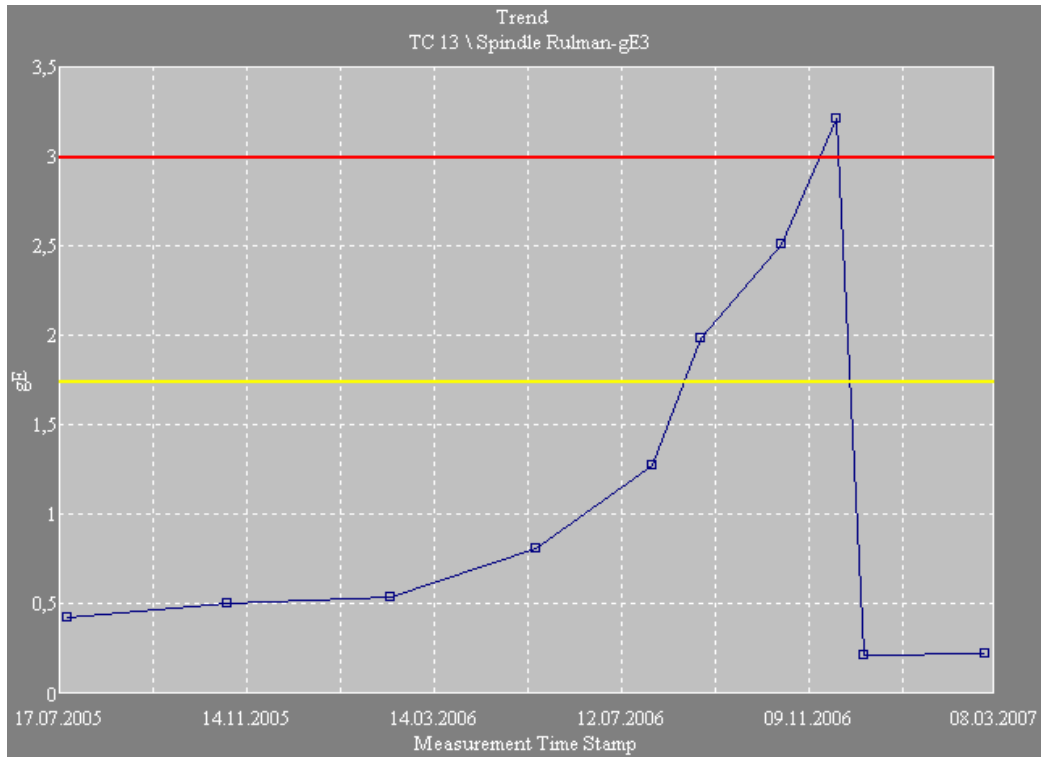
Çizelge 4.1. OKUMA LU25-2SC x 650 CNC torna tezgâhı fener mili titreşim ölçüm raporu

Last Measurement Report

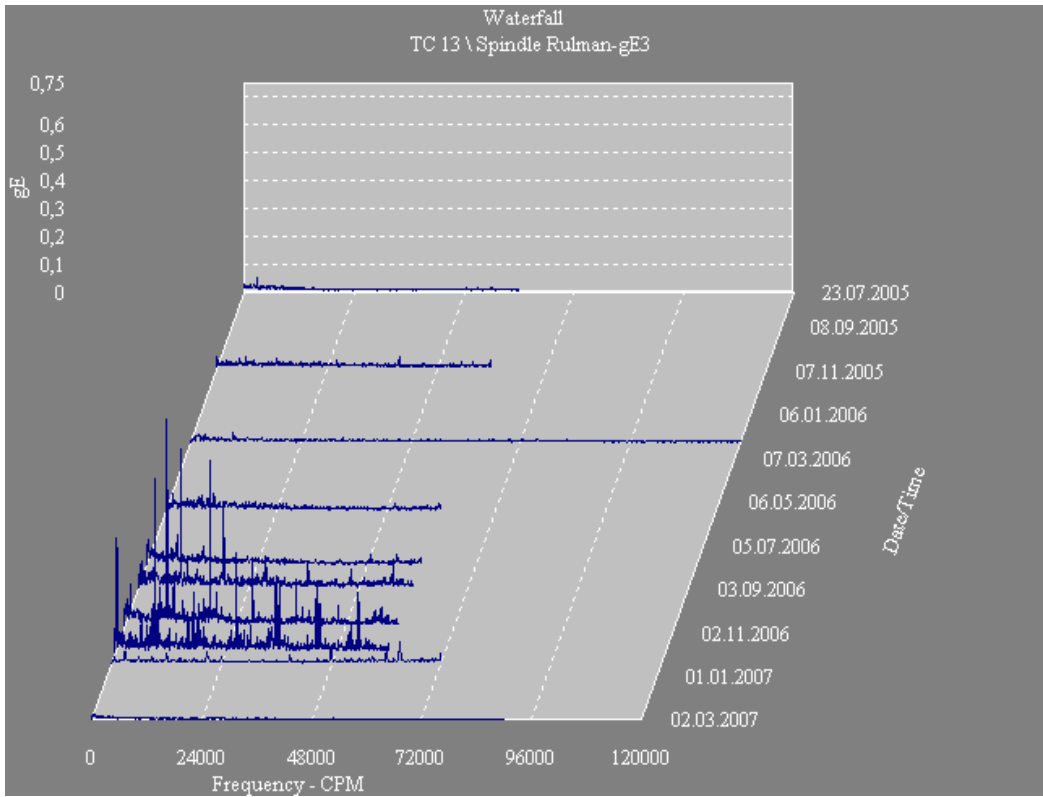
Source: TC 13 Spindle Rulman-gE3
06.03.2007 16:21:18

Last Measurement					
<u>Machine name</u>	<u>POINT name</u>	<u>Date/Time</u>	<u>Last value</u>	<u>Previous value</u>	<u>% change</u>
TC 13	Spindle Rulman-gE3	02.03.2007 10:02:17	0,222022 gE	0,2146977 gE	3,41
---	---	15.12.2006 12:28:58	0,214697 gE	3,210166 gE	-93,3
---	---	27.11.2006 15:30:54	3,210166 gE	2,509194 gE	27,9
---	---	23.10.2006 08:47:24	2,509194 gE	1,98275 gE	26,6
---	---	01.09.2006 11:37:10	1,98275 gE	1,270333 gE	56,1
---	---	01.08.2006 08:56:22	1,270333 gE	0,8082637 gE	57,2
---	---	19.05.2006 13:21:52	0,808263 gE	0,5360576 gE	50,8
---	---	15.02.2006 11:20:31	0,536057 gE	0,5054628 gE	6,05
---	---	02.11.2005 14:38:10	0,505462 gE	0,4216132 gE	19,9
---	---	23.07.2005 11:05:49	0,4216132 gE	0,4285346 gE	-1,61

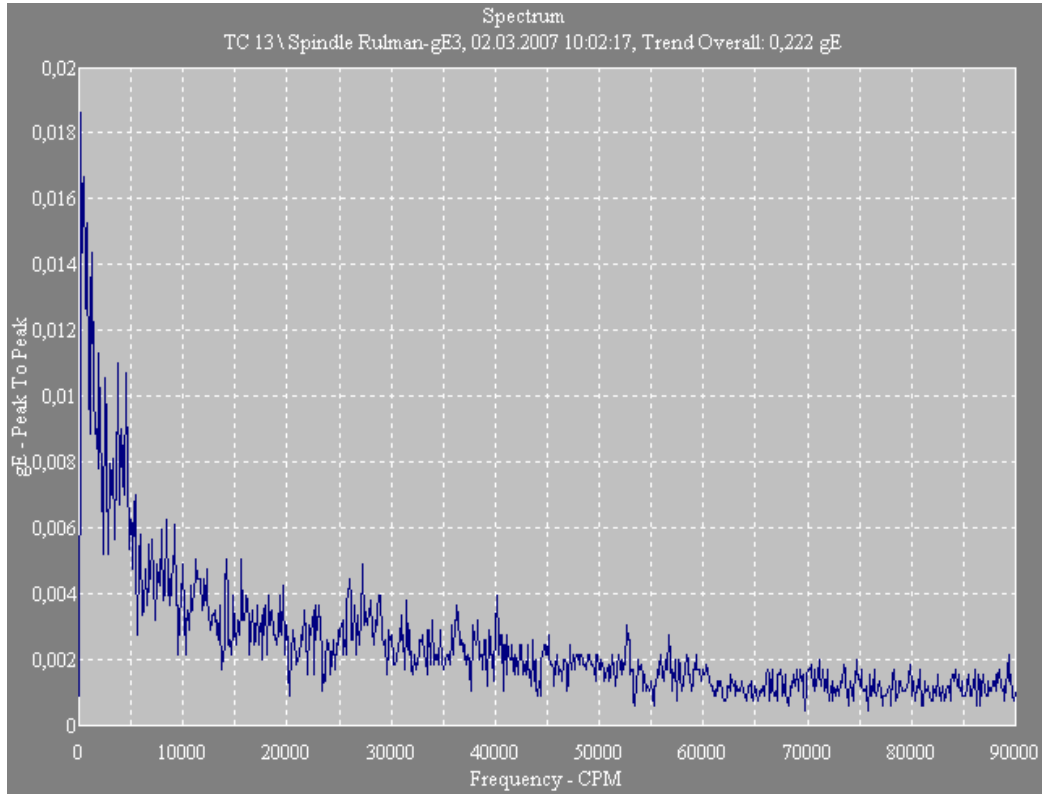
Çizelge 4.1. (devam)
TC 13 \ Spindle Rulman-gE3



TC 13 \ Spindle Rulman-gE3



Çizelge 4.1. (devam)
TC 13 \ Spindle Rulman-gE3



Notes

<u>Source Name</u>	<u>Date/Time</u>	<u>Note</u>
TC-13 / Spindle Rulman-gE3	29.11.2006 16:20:04	Titreşim seviyesi tehlike alarm seviyesinin üzerinde olup rulmanların acilen değişmesi gerekmektedir.
---	26.10.2006 15:42:34	Spindle rulmanlarının titreşimi artmakta olup bakım planına alınması gereklidir. Titreşim seviyesi artış göstermektedir.
---	04.09.2006 16:18:58	Titreşim seviyeleri artış göstermekte olup kontrolü daha sık yapılacaktır.

Çizelge 4.2. OKUMA LU25-2SC x 650 CNC torna tezgâhı elektrik motoru ön
rulmanı titreşim ölçüm raporu

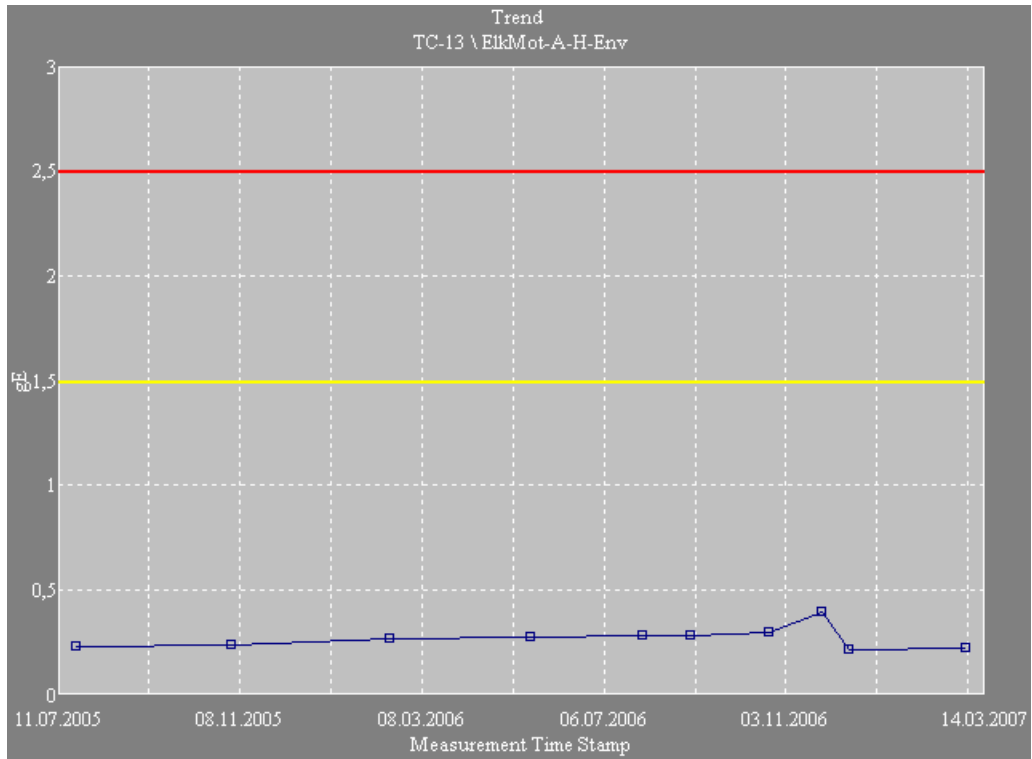
Last Measurement Report

Source: TC 13 ElkMot-A-H-Env

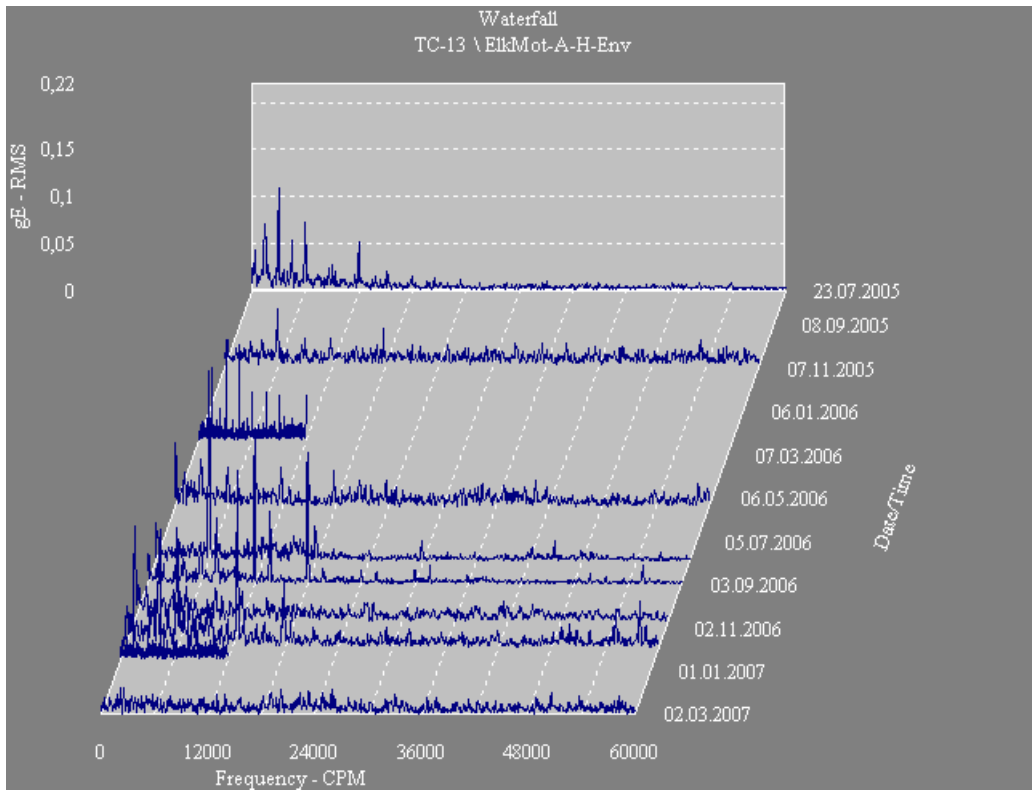
06.03.2007 16:21:33

Last Measurement					
Machine name	POINT name	Date/Time	Last value	Previous value	% change
TC 13	ElkMot-A-H-Env	02.03.2007 10:05:37	0,2195807 gE	0,2143925 gE	2,42
---	---	15.12.2006 12:33:38	0,2143925 gE	0,3918577 gE	-45,3
---	---	27.11.2006 15:35:58	0,3918577 gE	0,2961821 gE	32,3
---	---	23.10.2006 08:52:28	0,2961821 gE	0,2841273 gE	4,24
---	---	01.09.2006 11:41:22	0,2841273 gE	0,2787866 gE	1,92
---	---	01.08.2006 09:00:40	0,2787866 gE	0,2714621 gE	2,7
---	---	19.05.2006 13:25:53	0,2714621 gE	0,2659688 gE	2,07
---	---	15.02.2006 11:25:10	0,2659688 gE	0,2395703 gE	11
---	---	02.11.2005 14:44:47	0,2395703 gE	0,2301096 gE	4,11
---	---	23.07.2005 11:10:23	0,2301096 gE	0,2264736 gE	1,6

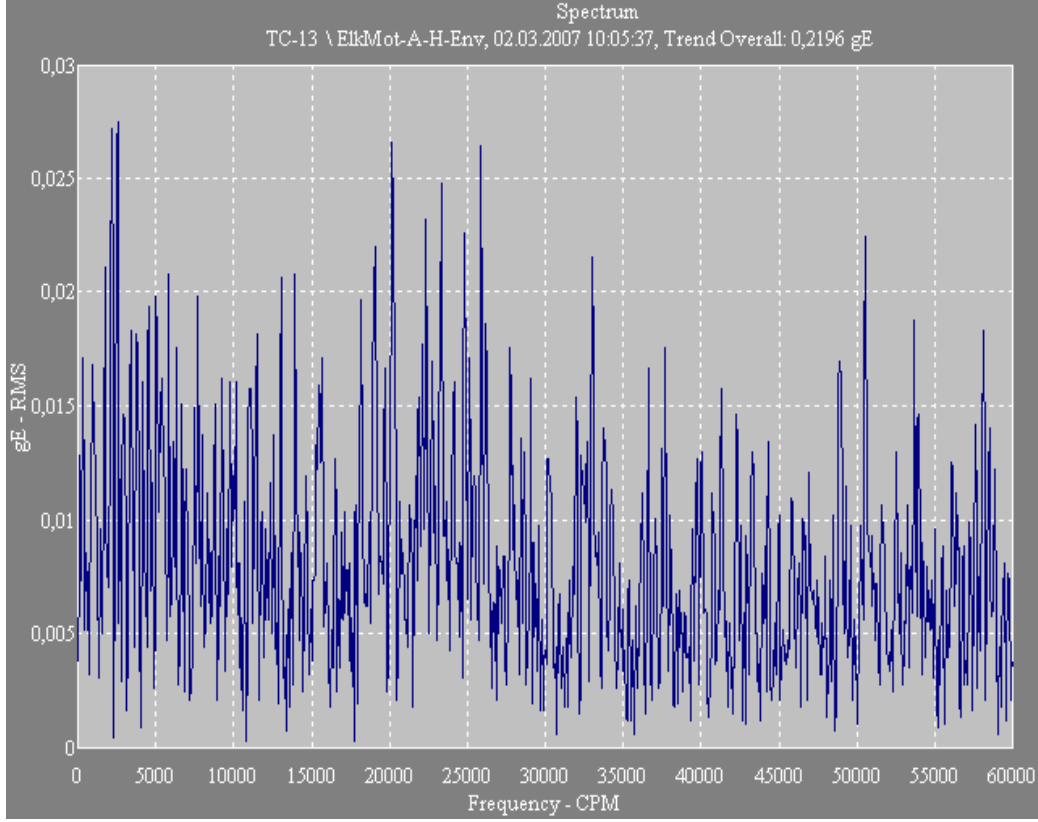
Çizelge 4.2. (devam)
TC 13 \ ElkMot-A-H-Env



TC 13 \ ElkMot-A-H-Env



Çizelge 4.2. (devam)
TC 13 \ ElkMot-A-H-Env



4.2. MAZAK FH 6000 İŞLEME MERKEZİ

Uygulamanın ikinci kısmında ise yine, Çukurova İnşaat Makineleri San. ve Tic. A.Ş. Parça üretim tesisi makine parkında bulunan ve periyodik olarak titreşim değerleri kaydedilerek takip edilen CNC işleme merkezi ve CNC tornalardan, materyal metot kısmında tanıtilan, MAZAK FH 6000 CNC işleme merkezi incelenmiştir. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te, bu işleme merkezine ait fener mili titreşim ölçüm sonuçları ile fener mili ve elektrik motoruna ait rulman titreşim analizi grafikleri verilmektedir.

Ölçüm sonuçları da, grafikler de son derece düşük genlikli titreşimler göstermektedir ki bunların düzensizliği ve genliklerinin düşüklüğü sadece gürültü olarak tanımlayabileceğimiz olağan frekanslar olduklarını gösterirler.

Fener mili spektrum grafiğinde görülen nispeten yüksek 3 tepelik, ki bu kadar yüksek görünme sebepleri eksen bölüntüsünün küçük olmasıdır, yine gürültü olarak

tanımlanabilir. Bu tip tepeciklerin arıza frekansı olarak değerlendirilebilmesi için harmonik olması ve dönüş frekansının belirli katlarıyla çakışması gerekmektedir. Ortada böyle bir durum olmadığından, tepecikler arıza frekansı olarak değerlendirilemez.

Elektrik motoru rulman ölçümleri, fener mili rulman ölçümlerine paralel olarak görülmektedir. Spektrum grafiğinde “ski slope” durumu gözlemlenmektedir ancak daha önce de anlatıldığı gibi bir önemi yoktur.

Çizelge 4.3. MAZAK FH 6000 CNC İşleme merkezi fener mili rulmanları titreşim ölçüm raporu

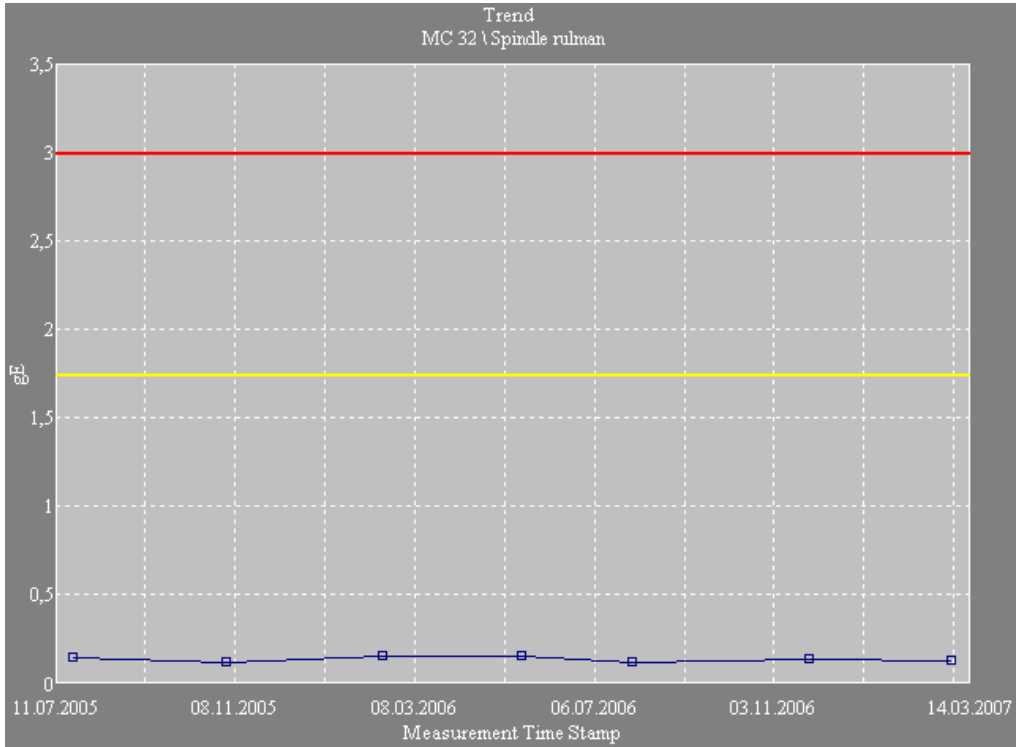
Last Measurement Report

Source: MC 32 Spindle rulman

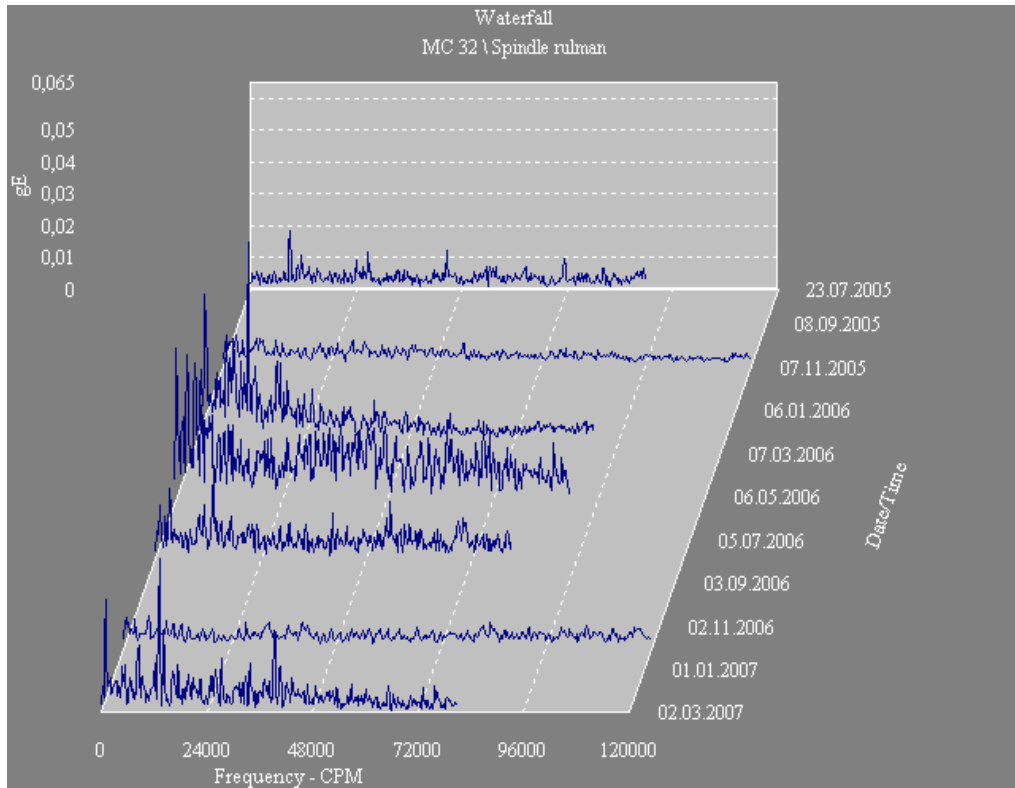
06.03.2007 16:32:28

Last Measurement					
Machine name	POINT name	Date/Time	Last value	Previous value	% change
MC 32	Spindle rulman	02.03.2007 09:41:06	0,1263466 gE	0,1324503 gE	-4,61
---	---	27.11.2006 14:55:35	0,1324503 gE	0,1161229 gE	14,1
---	---	01.08.2006 09:04:16	0,1161229 gE	0,1574755 gE	-26,3
---	---	19.05.2006 12:49:30	0,1574755 gE	0,1541185 gE	2,18
---	---	15.02.2006 10:50:56	0,1541185 gE	0,1173437 gE	31,3
---	---	02.11.2005 14:05:37	0,1173437 gE	0,1481674 gE	-20,8
---	---	23.07.2005 10:33:46	0,1481674 gE	---	---

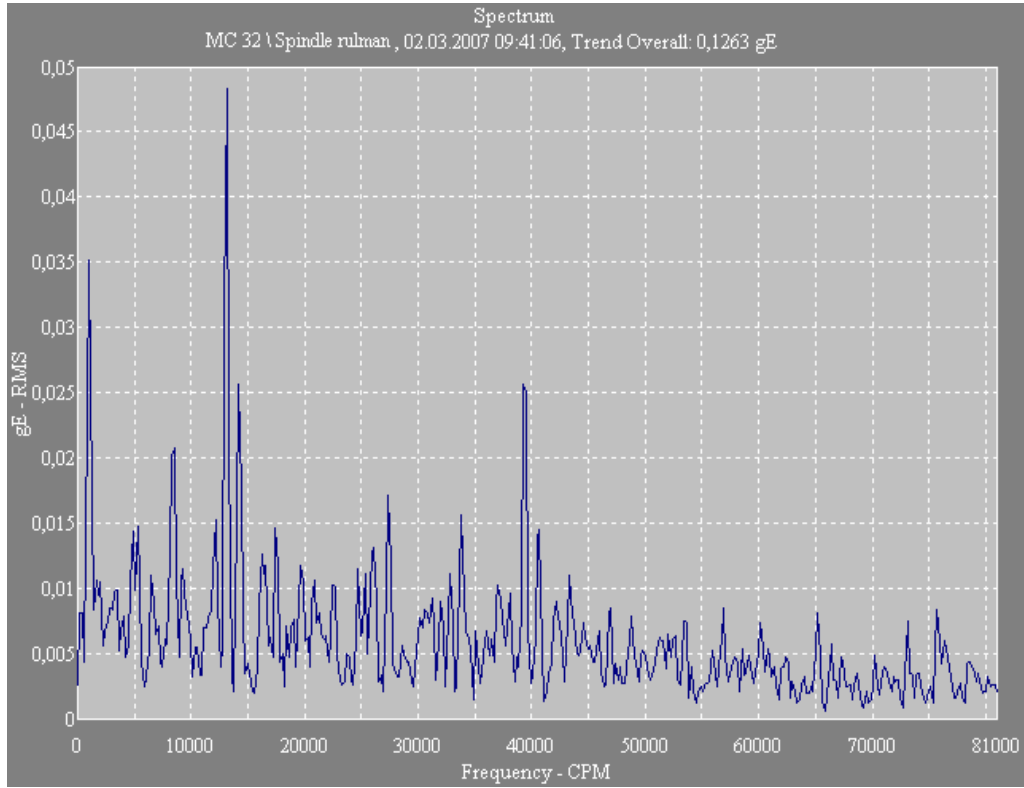
Çizelge 4.3. (devam)
MC 32 \ Spindle rulman



MC 32 \ Spindle rulman



Çizelge 4.3. (devam)
MC 32 \ Spindle rulman



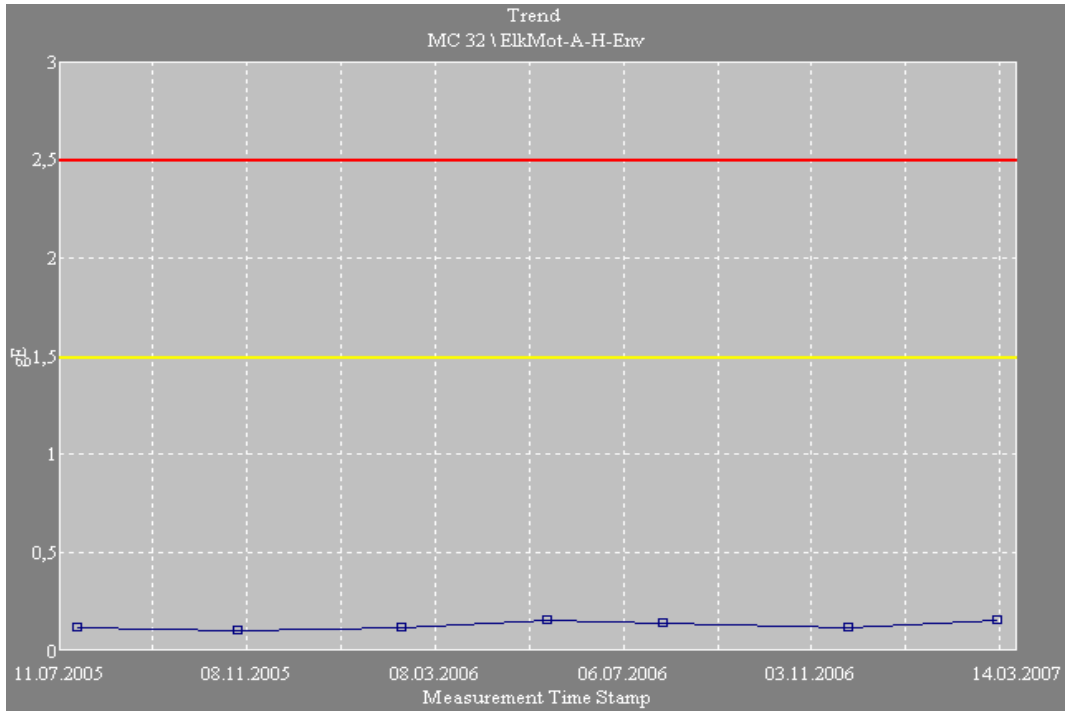
Çizelge 4.4. MAZAK FH 6000 CNC İşleme merkezi elektrik motoru ön rulmanı
titreşim ölçüm raporu

Last Measurement Report

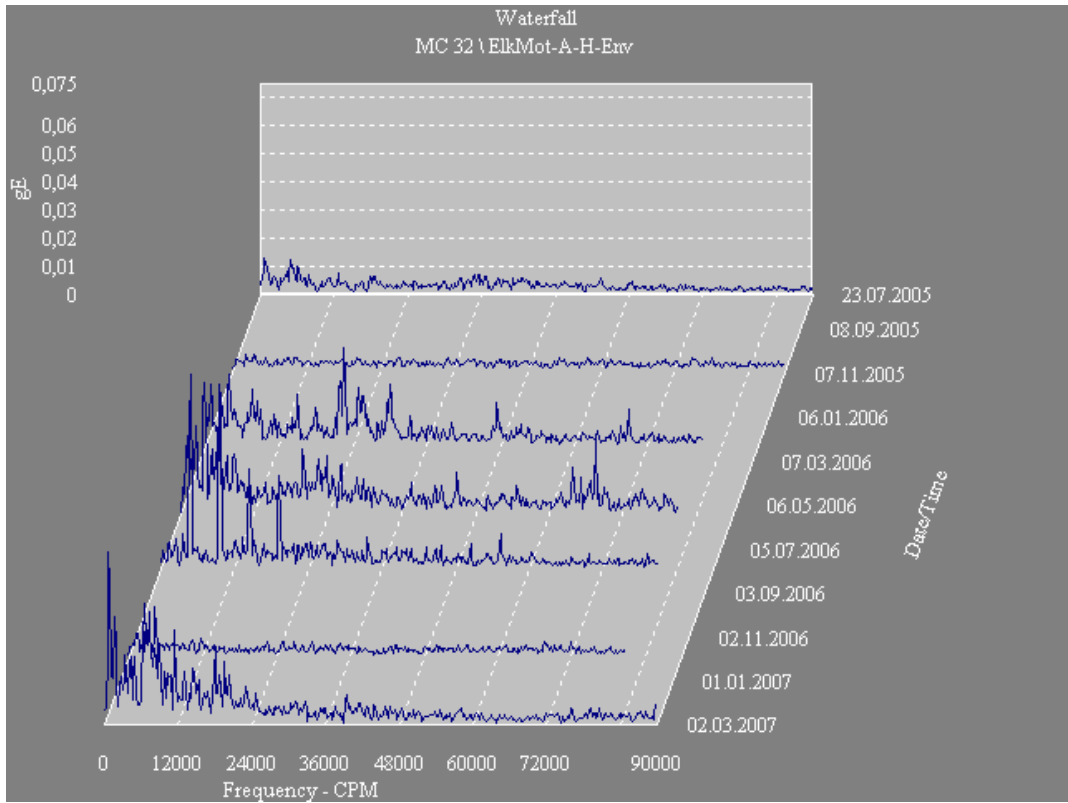
Source: MC 32 ElkMot-A-H-Env
06.03.2007 16:31:22

Last Measurement					
<u>Machine name</u>	<u>POINT name</u>	<u>Date/Time</u>	<u>Last value</u>	<u>Previous value</u>	<u>% change</u>
MC 32	ElkMot-A-H-Env	02.03.2007 09:38:04	0,1574755 gE	0,113834 gE	38,3
---	---	27.11.2006 14:51:01	0,113834 gE	0,1380963 gE	-17,6
---	---	01.08.2006 09:00:14	0,1380963 gE	0,1541185 gE	-10,4
---	---	19.05.2006 12:46:22	0,1541185 gE	0,1165807 gE	32,2
---	---	15.02.2006 10:47:15	0,1165807 gE	0,1023896 gE	13,9
---	---	02.11.2005 14:03:30	0,1023896 gE	0,1181066 gE	-13,3
---	---	23.07.2005 10:30:05	0,1181066 gE	---	---

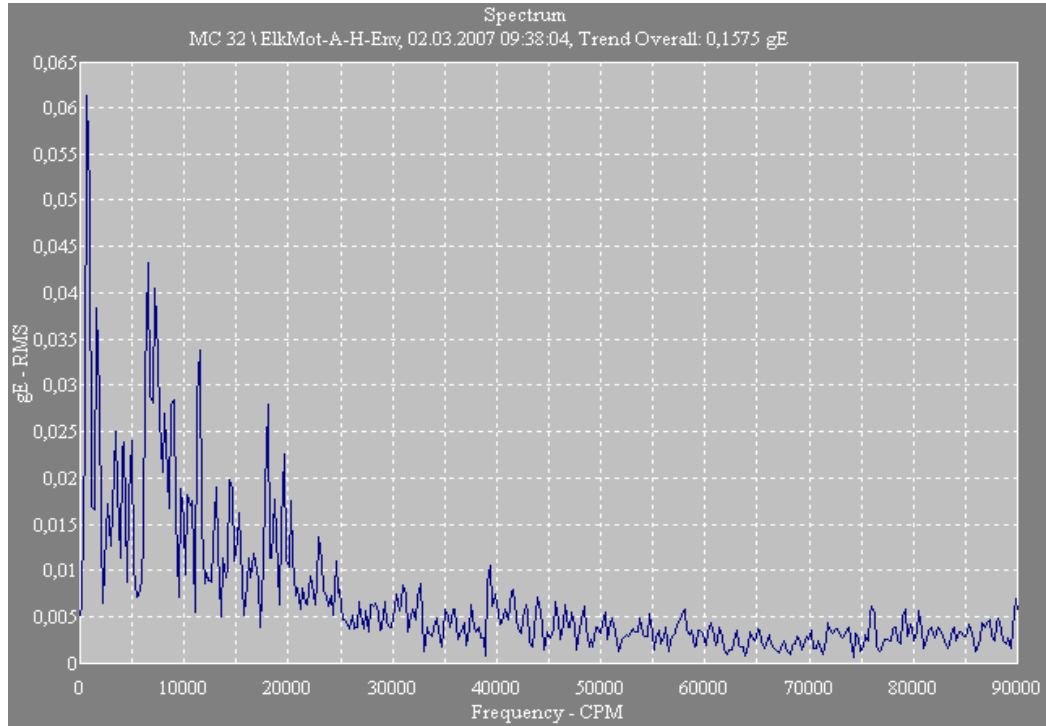
Çizelge 4.4. (devam)
MC 32 \ ElkMot-A-H-Env



MC 32 \ ElkMot-A-H-Env



Çizelge 4.4. (devam)
MC 32 \ ElkMot-A-H-Env



5. KESTİRİMCİ BAKIMIN İŞLETME VERİMLİLİĞİNE VE EKONOMİYE KATKISI

Kestirimci bakım her ne kadar yatırım isteyen bir bakım sistemi olsa da, kendini amorti etme süresi uygulamalara bağlı olmakla birlikte oldukça kısadır. Kestirimci bakım sayesinde gereksiz stok yapılması gerekmeyeceği için bu para daha farklı şekilde değerlendirilebilir.

Uygulama örnekleri kısmında verilen OKUMA CNC torna tezgâhının fener mili rulmanlarındaki arıza daha da ciddileşerek tezgâhı durdurmadan önce fark edilip giderilmesi için gereken malzeme siparişi ve ayarlamalar yapılmamış olsaydı işletme için büyük zararlara sebep olabilirdi.

Bu tarzdaki beklenmedik bir arıza sonucu, arızanın tespitiyle malzemenin yurt dışından ithal edilmesi ve tezgâha monte edilmesi arasında geçen süre 20-25 gün arasında değişmektedir. Resmi tatil günlerine denk gelen arızalarda bu süreler 2-9 gün daha eklemek gerekebilmektedir. Daha hızlı kargo türlerinin kullanılması istendiğinde de çok yüksek taşıma ücretleriyle karşılaşılabilir. Adı geçen örnek olayda işletme 25 gün tezgâhta iş yapamayacak, ancak tezgâh operatörünün işletmeye mâliyetinde bir değişim olmayacaktır. Bunun dışında, işlenen ürünün operasyon sırasına göre bu tezgâhın önündeki hatta şişmeler, arkasındaki hatlarda ise boşluklar oluşacak ve üretim planı revizyonundan, tezgâhın kritikliğine göre, parçaların işletme dışında ürettirilmesine kadar bir dizi alternatifin değerlendirilmesi zorunluluğu ortaya çıkacaktır. Üretimdeki gecikmeler ve/veya kalitesizlikler sonucu işletmenin prestij kaybına uğraması ve bazı gecikme cezalarıyla karşılaşması da söz konusudur.

Aşağıda yapılan hesaplamalarda öncelikle, tezgâhın çalışmamasından dolayı oluşacak maliyetlerin meydana getirdiği senaryo, sonrasında ise stok yapma durumunda ortaya çıkacak senaryo incelenmiştir.

Torna tezgâhının ürettiği ürünün kabul edilen ortalama satış birim fiyatı=21.50 YTL/saat

Ort. operatör net işçilik gideri=4.18 YTL/saat*0,5 (her operatör 2 tezgâh işletmektedir)

Yedek parça temin süresi=25 gün =600 saat

Yedek parça bedeli= 10.500 YTL

Servis süresi= 2 gün

Servis ücreti= 1.350 YTL

Arıza sonucunda tezgâhta yapılamayan üretimin satış bedeli;

$$21,50 \text{ YTL} / \text{saat} \times 600 \text{ saat} = 12.900,00 \text{ YTL}$$

Bu ürünlerin satışından elde edilecek net kâr;

$$12.900,00 \text{ YTL} \times 0,08 = 1.032,00 \text{ YTL}$$

işçilik mâliyeti;

$$600 \text{ saat} \times 4.18 \text{ YTL} / \text{saat} \times \frac{1}{2} = 1254,00 \text{ YTL}$$

Arızanın giderilmesi ile ilgili işlerin tamamı ortak olduğu için, kestirimci bakımın işletmeye olan faydası, parça bekleme sırasındaki kâr ve işçilik maliyetiyle sınırlıdır.

Elde edilen kazanç;

$$1.254,00 + 1.032,00 = 2.286,00 \text{ YTL dir.}$$

Stok yapılması durumunda ortaya çıkacak senaryoda ise, 10.500,00 YTL (7.500,00 USD) değerindeki malzemenin tezgâh 5 yaşına geldiğinde satın alınarak işletme ambarına yerleştirildiğini düşünelim. Eğer kestirimci bakım dahilinde parça, gerektiği zamana kadar alınmamış olsaydı, 2007 yılına kadar bu paranın %3,50 lik yıllık faizle Amerikan Doları hesabında değerlendirilmesi sonucunda elde edilebilecek kazancı eşitlik E 19'da gösterilen bileşik faiz formülüne göre hesaplırsak;

$$\text{Faiz geliri} = A \times \left(1 + \frac{n}{100}\right)^t - A \quad \text{E 19}$$

A: Ana para

n : Faiz yüzdesi

t : Süre

$$\begin{aligned} \text{Faiz geliri} &= 7.500,00 \times \left(1 + \frac{3,50}{100}\right)^7 - 7.500,00 \\ &= 2.042,09 \text{ USD} \\ &= 2.858,92 \text{ YTL olacaktır.} \end{aligned}$$

Bu rakama, 2 günlük servis süresince oluşan işçilik maliyeti ve üretim kaybını da eklersek (182,88 YTL), toplam maliyet:

$$\begin{aligned} &=2.858,92 + 182,88 \\ &=3.041,80 \text{ YTL olarak hesaplanır.} \end{aligned}$$

Her iki durumda da ortaya çıkan rakamlar yakındır. Malzeme temin süresinin uzaması yada stok süresinin artıp azalmasıyla bu rakamlarda bir miktar değişimler olabilir ancak yaşanmış örneğe göre yapılan hesaplamalar bizleri bu sonuçlara ulaştırmaktadır.

Bu kazançların tek bir tezgâh için ve titreşim analizi ile yakalanan bir arıza olduğu göz önüne alınır, titreşim analizinin kullanımıyla elde edilebilecek kazancın sadece işletme için değil, ülke genelindeki binlerce tezgâhta uygulanması durumunda ülkemiz ekonomisi için oluşturacağı kazancın hiçte azımsanamayacak ölçüde olduğu ortaya çıkar.

Bununla birlikte, diğer kestirimci bakım tekniklerinin de kullanımıyla, tesislerin kullandığı kompresörlerden endüstriyel fırınlara, buhar kazanlarından elektrik ekipmanlarına kadar binlerce tezgâhtaki bir çok arıza daha başlangıç aşamasında yakalanarak giderilecek ve hem tezgâhların beklenmeyen arızaları ortadan kalkacak ve plansız duruşların maliyeti bertaraf edilecek, hem gereksiz parça değişiminin önüne geçilecek, hem de dışa bağımlı bir enerji sistemi olan ülkemizde enerjinin daha verimli kullanılması sonucunda dışarıya enerji için çıkan millî servetimiz azalacaktır.

6. SONUÇLAR

Bakım sistemleri, yukarıda anlatılan tüm parametreleri tek çatı altında, birbiri ile ilişki kurarak sonuç üretme ve sonucu izleme teknolojisi aşamasına gelmiştir. Gelişmiş ülkeler, yaygın şekilde bu teknolojiyi kullanmakta ve kaynaklarını en iyi şekilde değerlendirerek hem arıza nedeni ile oluşan duruşları azaltmakta, hem de parça ve elektrik israfının önüne geçmektedir.

Bir çok durumda işletmelerde, kestirimci bakım yöntemlerinden sadece bir tanesi, fazla araştırılmadan işletmeye alınıp ilgili olarak atanan personel eğitime gönderilerek kullanılmaya başlanmakta ve cihazla kullanıcılarından mucize beklenmektedir. Oysa kestirimci bakım tekniklerinden hangisi yada hangilerinin işletmeye uygun olduğu araştırılmalı ve uygun olan yöntemlerle ilgili olarak personel yeni gelişmelerin ışığında sürekli olarak eğitilmelidir. Bu sayede kestirimci bakımdan beklenen faydalar daha süratli ve eksiksiz olarak elde edilebilir.

Bu çalışmada, önceki çalışmalara paralel olarak, titreşim analizi ile erken teşhisi yapılan arızaların, işletmeye ve üretime olan zararlarının en aza indirilerek atlatıldığı sonucuna varılmıştır.

Özbay[43] ve Koyuncu'nun[44] hazırladıkları yüksek lisans tezlerindeki deney sonuçları, bu tez çalışmasında yapılan deneyin sonuçlarıyla örtüşmekte ve birbirlerini desteklemektedirler.

İleride yapılacak çalışmalarda, titreşim analizinde kullanılan FFT metodu ile “shock pulse” ve “peakvue” analiz metotlarının karşılaştırılmasının yapılması, konuyla ilgili daha ileri bulgular bulunmasında fayda sağlayabilir.

Yukarıda verilen örneklerde, titreşim ölçümleri, 900 d/dk dönüş hızında yapılmıştır. Daha düşük veya daha yüksek hızlarda, ölçüm sonuçlarındaki değişimin araştırılması ileriki çalışmalarda değerlendirilebilir.

7. KAYNAKLAR

- [1]Kobu, B., “Üretim Yönetimi” Avcıol basım yayın, İstanbul, 712 s. (2003)
- [2]Çeştepe, E., Eren, A. Dedektif Multimetre Arıza Erken Uyarı Sistemlerinde Uygulanabilecek En Kolay ve En Ekonomik Çözüm, http://www.artesis.com/files/DM_Article_TR.pdf [11.01.2006]
- [3]Understanding Maintenance Strategies, <http://www.plantweb.emersonprocess.com> [20/01/2006]
- [4]Mobley, R., K. “An Introduction to Predictive Maintenance”, Van Nosrand Reinhold, New York, 189 s. (1990)
- [5]Köse, K. Makine Sağlığı Yönetim Platformu, <http://www.bilesim.com.tr/tr/index.nsf?lf=tr/leftbarfuarcilik.html&rf=http://www.bilesim.com.tr/mistoportal/showmakale.nsf?xd=2024.xml> [06.11.2006]
- [6]Patton, J., D. “Preventive Maintenance”, Instrument Society of America, New York, 192 s. (1983)
- [7]Maintenance Strategies and Work Practices to Reduce Costs, <http://www.plantweb.emersonprocess.com> [20/01/2006]
- [8]Huba, A. Toplam Verimli Bakım, Erişim: <http://www.ytukvk.org.tr> [06.11.2006]
- [9]Gücin, S. “Fabrika bakım işlemleri”, Balıkesir Üniversitesi Yayın no:11, Balıkesir, 109 s. (1999)
- [10]Why oil analysis should be performed on site, http://www.mcme.nl/downloads/oil_analysis.pdf [11.01.2006]
- [11]Köse, R., K. “Kestirimci Bakım”, 2. Bakım Teknolojileri Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, MMO yayın no E/2005/370, Ankara, 95-104, (2005)
- [12]Beebe, R., S., “Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring”, Elsevier Advanced Technology, London, 192s, (2004).
- [13]Understanding the S-O-S Oil Analysis Tests, <http://www.cat.com/cda/components/securedFile/displaySecuredFileServletSSP?field=214955Qlanguage1d=7> [17.09.2006]
- [14]Oil Analysis: Common Tests, <http://www.lubes-n-filters.com/synthetics/oil-analysis/oil-analysis3.html> [12.01.2006]

- [15]The First Step Toward Better Oil Analysis -- Taking a Proper Sample, <http://www.lubes-n-filters.com/synthetics/oil-analysis/oil-analysis3.html> [12.01.2006]
- [16]A Much Closer Look at Particle Contamination, http://www.practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=781 [11.06.2006]
- [17]Clean Oil Sampling - How to Sample Oil Without Opening the Bottle, <http://www.noria.com> [24.01.2006]
- [18]Jiroutek, S., Sheble, N., "Dynamic oil system holds quirks", InTech; (53-58), May 2006.
- [19]Murphy, T., J. Understanding Ultrasonic Signal Analysis <http://www.sdtnorthamerica.com/reliabilityweb.com/tutorials.htm> [18.04.2006]
- [20]Creating an Effective Air Leak Management Program http://www.com/apps/leak_detection.htm [08.08.2006]
- [21]Fried, B., "Ultrasound for Better Lubrication", Practicing Oil Analysis, Kasim 2004.
- [22]Ultrasonic Inspection: Bearings <http://www.ctrlsys.com/library/applications/bearings-1.php> [28.09.2006]
- [23]AVM Ultranalysis Applications - Bearing Analysis, <http://www.sdtnorthamerica.com/apps/bearing.htm> [24.09.2006]
- [24]Lubrication, http://www.noria.com/learning_center/category_article.asp?Articleid=535&relatedbookgroup=lubrication [12.10.2006]
- [25]Testing steam traps, <http://www.sdtnorthamerica.com/apps/steam.htm> [24.09.2006]
- [26]AVM Ultranalysis Applications - Electrical Inspections, <http://www.ctrlsys.com/library/applications/electrical-4.php> [24.09.2006]
- [27]Types of Non-Pressurized Systems & Components, <http://www.ctrlsys.com/library/applications/non-pressurized-2.php> [26.09.2006]
- [28]Ultrasonic Testing of Gearboxes, <http://www.ctrlsys.com/library/applications/gearboxes-3.php> [26.09.2006]
- [29]<http://www.wikipedia.com> [19/04/2006]
- [30]Brown, A., Thermographic Predictive Maintenance For Enhanced Productivity, <http://www.thermoteknix.com/areaspapersdefault.htm> [20/01/2006]

- [31]Berry, J., E. “How To Implement an Effective Condition Monitoring Program Using Vibratiom Analysis-1”, Technical Associates of Charlotte, San Diego, 489s, (2002)
- [32]Mobley, R., K., “Vibration Fundamentals”, Butterworth-Heinemann, Woburn 192s,. (1999)
- [33]Özbay, A., “Predictive Maintenance and its Applications in Industry”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Balcalı, Adana, 99s, (2002)
- [34]Reporting Particle Count by ISO Code, <http://www.atlcat.ca/page.php?page=65> [17.09.2006]
- [35]Proplan Ltd Şti, Yerinde Dengeleme (Balans), s:1-5, İstanbul, (2003)
- [36]Köse, R., K. “Kestirimci Bakım”, Bakım Teknolojileri Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, MMO yayın no E/2003/334, Ankara, 83-96, (2003)
- [37]Goodwin, M., J. “Dynamics of Rotor Bearing Systems”, Unwin Hyman Ltd, London, 281 s. (1989)
- [38]Köse, R., K. “Rezonans – Kritik Hız Makina Arızalarının Temel Sorun”, Bakım Teknolojileri Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, MMO yayın no E/2003/334, Ankara, 332-342, (2003)
- [39]Köse, R., K. “Kestirimci Bakım-2”, Bakım Teknolojileri Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, MMO yayın no E/2005/370, Ankara, 96-104, (2005)
- [40]Yanabe, S., Tamura, A., “Vibration of a Rotating Shaft Passing Through Two Critical Speeds”, Vibrations in Rotating Machinery, I Mech E Conference Publications 1980-4, London, 29-35, (1980)
- [41]Lees, A. W., Pandey, P. C., “Vibration Spectra From Gear Drives”, Vibrations in Rotating Machinery, I Mech E Conference Publications 1980-4, London, 103-108, (1980)
- [42]Taylor, J. I., “Fault Diagnosis of Gears Using Spectrum Analysis”, Vibrations in Rotating Machinery, I Mech E Conference Publications 1980-4, London, 163-168, (1980)
- [43]Koyuncu, A., “Endüstriyel Tesislerde Kestirimci Bakım Açısından Kademeli Pompanın İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 72s, (2003).

[44]Özbay, A., “Predictive Maintenance and its Applications in Industry”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 99s, (2002).

ÖZGEÇMİŞ

H. Bora DENLİ, 3 Nisan 1979 yılında Isparta'da doğdu, ilkokulu Eğirdir ilçesinde, orta okul ve liseyi Isparta ve Mersin'de tamamladı. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2001 yılında tamamlayarak Makine Mühendisi unvanını aldı. Medikar Ltd Şti'inde saha mühendisi, SCT filtrede işletme mühendisi olarak çalıştıktan sonra, 2003 yılında Çukurova İnşaat Makineleri San. ve Tic. A.Ş.'de Mekanik Bakım Onarım Mühendisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir. 2004 yılında Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisansa başlayan DENLİ, evli ve iki çocuk babasıdır.