



DÜZ DIŞLI ÇARK SİSTEMİNDEKİ AŞINMA HATASININ İSTATİSTİKSEL PROSES KONTROL METODU İLE BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF THE WEAR FAULT IN SPUR GEAR SYSTEM USING STATISTICAL PROCESS CONTROL METHOD

Sinan MARAŞ^{1*}, Hakan ARSLAN²

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bayburt Üniversitesi, 69000, Bayburt.
smaras@bayburt.edu.tr

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi, 71000, Kırıkkale.
arslan@kku.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 17.04.2013, Kabul Tarihi/Accepted: 28.07.2013

doi: 10.5505/pajes.2014.28247

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Özet

Titreşim analizi, makine elemanları ve yapılarda oluşan arızalar hakkında bilgi edinmede yaygın bir şekilde kullanılan erken uyarıcı metodlarının başında gelmektedir. Bu yöntemde, titreşim analiz sonuçları sinyal işleme, yapay zeka, istatistiksel analiz yöntemleriyle işlenerek dişli hata tespiti yapılabilmektedir. Bu çalışmada amaç, düz dişlilerdeki aşınma hatasının sebep olduğu titreşimlerdeki değişimlerin istatistiksel proses kontrol grafiklerinde analiz edilerek aşınmanın varlığını tespit etmektir. Dişli test düzeneğinde incelenmek üzere, düz dişli yüzeylerinde suni olarak aşındırma işlemi uygulanmış ve sonra bu dişliler takılıp sistem çeşitli ön yük ve devir şartlarında çalıştırılarak titreşim verileri kaydedilmiştir. Sağlam dişli ile aşınmış dişli verileri istatistiksel proses kontrol grafiklerinde analiz edilerek hatanın tespiti gerçek zamanlı deneysel çalışma ile grafiksel olarak gösterilebilmiştir.

Anahtar kelimeler: Düz dişli çarklar, Dişli arızaları, Arıza tespiti, İstatistiksel proses kontrol.

Abstract

Vibration analysis is one of the early warning methods widely used in obtaining information about faults occurring on the machine elements and structures. In this method, gear fault detection can be performed by analyzing of the vibration test results using signal processing, artificial intelligence and statistical analysis methods. The objective of this study is detection the existence of wear by examining changes in the vibrations of spur gears due to wear faults in statistical process control carts. In this study, artificial wear was created on the surfaces of spur gears in order to be examined in gears test rig. Then, these gears were attached and vibrations data were recorded by operating the system at various loading and number of cycles conditions. Detection of fault was demonstrated by analyzing undeformed and worn gears data in statistical process control carts by means of real-time experimental studies.

Keywords: Spur gears, Gear faults, Fault diagnosis, Statistical process control.

1 Giriş

Dönen makinelerde titreşim analizi ile hata tespiti yıllardır başarıyla uygulanmaktadır. Makinenin içyapısında gelişmekte olan hatalar yatakların dış yüzeyinden gerçekleştirilen titreşim ölçümü ile algılanabilmektedir. Bu şekilde dişlide oluşan hata, riskli bir duruma gelmeden önce makineyi durdurmadan başlangıç safhasında iken belirlenebilmektedir. Dişliler makinelerde hareket ve güç iletiminde yaygın olarak kullanılan vazgeçilmez makine elemanlarıdır. Yapılan işin hassasiyeti ve maddi kayıplar (üretim kaybı, zaman kaybı, makinelerin tamamen bozulması, iş kazaları) açısından bakıldığında dişli arızalarını henüz tehlikeli bir hale gelmeden, başlangıç aşamasında iken belirlemek büyük önem arz etmektedir. Endüstriyel uygulamada dişlilerde oluşan arızaların titreşim analizi ile belirlenmesi için arızaların karakteristik titreşim davranışlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Dişlilerin, arızaların oluşmasında ve bakım masraflarında önemli katkıları vardır. Dönen makinelerde genellikle bozulmayla sonuçlanan arızaların % 60'ı dişlilerle ilgilidir. Bu yüzden dişli titreşimleri ile ilgili birçok çalışma yapılmış olup, bu çalışmalarda genellikle bir dişli kutusu test düzeneğinde yapay hatalar oluşturularak bu hataların neden olduğu titreşim davranışları incelenmektedir. Elde edilen titreşim analiz sonuçları sinyal işleme, yapay zeka, istatistiksel analiz yöntemleriyle işlenerek dişlilerde hata tespiti yapılmaktadır [1]. Dişli hata tespitinde, titreşim verilerinin

istatistiksel analiz yöntemlerinde kullanılması ile ilgili çalışmalara günümüzde rastlamak mümkündür.

Andrade v.d., Kolmogorov-Smirnov testi ile yük altındaki düz dişlilerin normal, hatalı, aşınmış, çatlak ilerlemesi gibi durumlarını tespit etmişlerdir [2]. Baydar v.d., çok değişkenli istatistiksel yöntemlerden Temel Bileşenler Analizi'ni kullanarak helisel dişlilerdeki diş kusurlarının tespitini gerçekleştirmişlerdir [3]. Birgören ve Koçer, istatistiksel proses kontrol çizelgelerinde hata teşhisinde geleneksel tek değişkenli kontrol çizelgeleri, yapay sinir ağı uygulamaları ve çok değişkenli kontrol çizelgelerinin kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır [4]. Zhan ve Mechefske, dişli kutusundaki dişli arızalarının tespiti için değişen yük koşulları altında zamanla değişen öz-bağlanımlı modeli kurmuş ve dişli durumunun bir ölçüsü olarak K-S "goodness-of-fit" test istatistiğini uygulamışlardır [5]. Zhan v.d., sağlam bir dişlinin hata tespiti için değişik yük koşullarında çalıştırılması sonucu Kolmogorov-Smirnov testi ile istatistiksel olarak analizini gerçekleştirmişlerdir [6]. Wang v.d., faz ve genlik modülasyonu, beta basınlık ve dalga dönüşümü tekniklerinin hassasiyet ve güvenilirliklerini incelemişlerdir. Bunun için deneylerinde sağlam, aşınmış, çatlak ve kırık dişlileri kullanmışlardır [7]. Djeddou and Zegadi, geliştirdikleri iki istatistiksel metodun, küçük adımli dişli çiftlerin güvenilirlik ve ömür tahmininde önemli bir uyum gösterdiğini tespit etmişlerdir [8]. Raad v.d., istatistik değerleri bazı genel değişkenler açısından periyodik olarak değişen titreşim

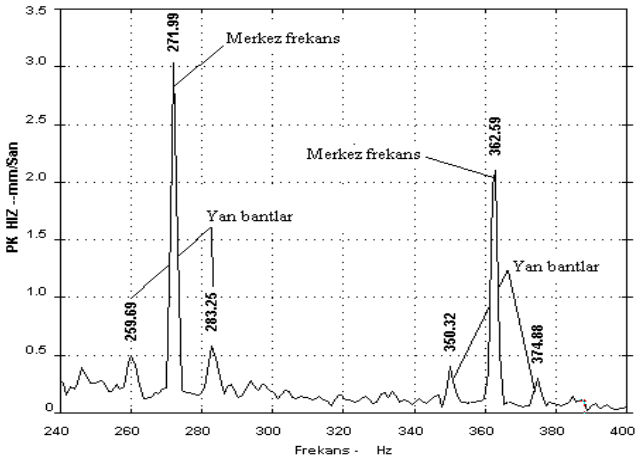
sinyallerinin sınıflandırılması için periyodikliğini yeni ve basit göstergeleri üzerinde çalışmışlardır. Dişli hata teşhisi için bu göstergelerin nasıl kullanılacağını yaptıkları uygulamalarla göstermişlerdir [9]. Yimin v.d., dişli durum izlenmesinde, değişik yük koşullarında elde edilen titreşim verilerine Kolmogorov-Smirnov testini uygulamışlardır [10].

Bu çalışmada ise, hazır bir dişli test düzeneği farklı yük ve devir şartlarında çalıştırılarak düz dişlilerden toplanan titreşim genlikleri istatistiksel proses kontrol grafiklerinde incelenmiştir. Sağlam dişli kontrol grafikleri ile aşınmış dişlilerin kontrol grafikleri karşılaştırılarak, aşınma hasarının varlığı tespit edilmiştir.

2 Titreşim Analizi

Titreşim, makinelerin içyapısında oluşan olayları en iyi yansıtan parametrelerden biri olduğu için günümüzde kestirimci bakım, titreşim ölçümü ve analizi ile gerçekleştirilmektedir [11]. Bu yöntemde, yatak gibi makine elemanlarının üzerine yerleştirilen ivmeölçerler vasıtasıyla makinelerin ilk çalışma şartlarındaki titreşim ölçümleri yapılmaktadır. İvmeölçer, titreşimin oluşturduğu basınç yüzünden elektrik sinyalleri üretmekte ve bu sinyaller şarj yükselticisinde yükseltilerek buradan A/D veri toplama kontrol kartına aktarılmaktadır. A/D veri toplama kontrol kartına elektrik sinyali (analog) olarak gelen ölçüm değerleri burada bilgisayar yazılımı vasıtasıyla ivme değerlerine dönüştürülmekte ve böylelikle referans titreşim ölçümleri gerçekleştirilmektedir.

Makinelerdeki titreşim seviyesi, periyodik veya sürekli olarak ölçülerek bilgisayar programları vasıtasıyla dalga form (genlik-zaman) ve spektrum (genlik-frekans) grafikleri ile takip edilmektedir. Makine elemanlarında arıza oluşmaya başladığı anda ölçülen titreşim genlikleri, referans ölçümlerle karşılaştırılarak ölçülen titreşimlerin genlik değerlerinde bir artışın olup olmadığının, varsa kabul edilebilirlik sınırları içinde kalıp kalmadığının analizi ile makinelerde oluşan arızaların tehlikeli bir hal almadan önce belirlenmesi mümkün olmaktadır. Dişli çarklarda frekans analizi ile hata tespiti yapılırken dişli hatalarının (aşınma, dengesizlik, gevşeklik, kırılma vb.) hata türüne özgün belirgin titreşimleri oluşmaktadır. Bu sebeple diğer makine elemanlarında olduğu gibi dişli hataları da titreşim analizi ile dişli kavrama frekansı (DKF), Şekil 1'de görüldüğü gibi DKF'nin yan bantları ve yan bantların aralıkları yorumlanarak hangi dişte arıza oluştuğu belirlenebilmektedir.

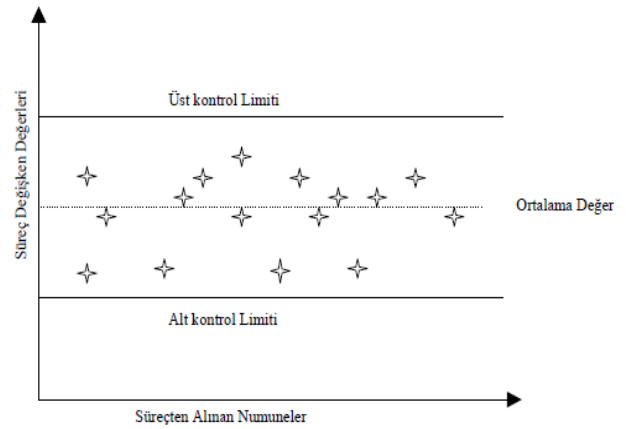


Şekil 1: Tipik yan bant oluşumu [11].

3 İstatistiksel Proses Kontrol

İstatistiksel proses kontrol, bir ürünün üretim sürecinde (proses) istenilen kalite şartlarının sağlamak, süreç içerisinde ürünlerde hata oluşumunu tespit etmek ve süreci iyileştirmek amacıyla kullanılan istatistiksel yöntemleri içermektedir. İstatistiksel proses kontrol; çap, boy, ağırlık, açı, titreşim genliği gibi bir ürünün süreç içerisindeki kalite göstergelerinin İPK grafiklerinde çizelgenerek sürecin gözlemlenmesinden ibarettir.

Bir proses kontrol grafiği Şekil 2'de görüldüğü gibi genel olarak, bir merkezi hat olan proses ortalaması ile bunun altına ve üstüne çizilen alt kontrol ve üst kontrol limitlerinden oluşmaktadır. Merkezi hat, karakteristiğinin hedef değerini; limitlerle sınırlanmış alan ise müsaade edilen kontrollü alanı göstermektedir. Süreç devam ettikçe elde edilen değerler çizelgeye işlenmektedir.



Şekil 2: Örnek süreç kontrol grafiği [12].

Çizelgelerde üründen alınan ölçüm değerleri ya da bunlardan üretilen bir istatistik değer kullanılmakta ve bu değer, kontrol bölgesi olarak adlandırılan bir değer aralığındaysa sürecin kontrol altında olduğu kabul edilmektedir. Değer kontrol bölgesi dışında ise bu durum bir kontrol-dışı sinyal olarak nitelenir ve süreçte hataya yol açan bir özel nedenin (hata kaynağının) etkili olduğuna hükmedilir. Süreç, mümkünse durdurularak, bu neden araştırılır, saptanır ve ortadan kaldırılması için gerekli önlemler alınır [13].

3.1 Sürecin Kontrol Altında Olduğu Durumlar

1. Sınırlar dışında nokta yok,
2. Noktaların çoğu süreç ortalaması civarında,
3. Proses ortalama çizgisinin altında ve üstünde eşit sayıda nokta,
4. Noktalar rasgele sıralanmış yani şüpheli bir davranış yok ise süreç kontrol altında demektir [14].

3.2 Sürecin Kontrol Dışına Çıktığı Durumlar

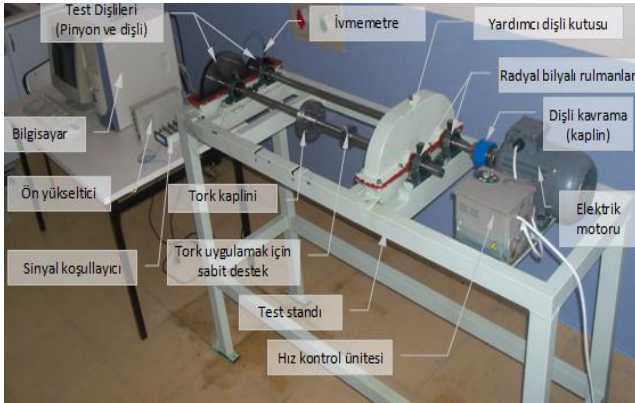
1. Bir veya daha fazla noktanın kontrol limitleri dışına çıkması,
2. Art arda yedi noktanın hepsinin merkez çizginin altında ya da üstünde kalması,
3. Art arda yedi noktanın artan veya azalan eğilim göstermesi,
4. 3σ çizgisi yakınındaki her üç noktadan ikisinin 2σ çizgisi dışına taşması,
5. Noktaların periyodik olarak değişim göstermesi [14].

3.3 \bar{X} ve S Grafikleri

Tüm \bar{X} ve S kontrol grafikleri alt grup ortalamaları ve alt grup standart sapmalarını gösteren iki grafikten oluşur. Örnek hacmi n'nin, n>10 veya n>12 gibi orta büyüklükte olması durumunda ve örnek hacminin örnekten örneğe değişkenlik gösterdiği durumlarda \bar{X} ve S kontrol grafikleri alternatifi olan \bar{X} ve R kontrol grafiklerine tercih edilir. Grafikte S değeri her bir grubun standart sapmasını gösterirken merkezi çizgi değeri \bar{S} ise her grubun standart sapmalarının ortalamasını belirtmektedir. Alt kontrol sınırı ve üst kontrol sınırı bulunurken örnekleme büyüklüğüne göre kontrol grafiklerini düzenlemede kullanılan faktörler standart tablosundan seçilerek belirlenmektedir. ÜKS= $\bar{X} + A_3\bar{S}$ ve AKS= $\bar{X} - A_3\bar{S}$ ifadeleri ile bulunmaktadır.

4 Deney Düzenegi

Kapalı devre güç iletim sistemine sahip dişli test düzenekleri, dişlilerin deneysel çalışmalarında çok yaygın olarak kullanılan bir düzendir. Bu amaçla kapalı devre güç iletim sistemine sahip bir dişli test düzenegi kurulmuş, sağlam ve hasarlı dişliler takılarak belirli bir yüklemeye ve devir sayısında sistem çalıştırılmış ve rulmanlı yataklar üzerinden ivmeölçerler vasıtasıyla alınan titreşim genlikleri dijital analog çevirici ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır.



Şekil 3: Deney düzenegi.

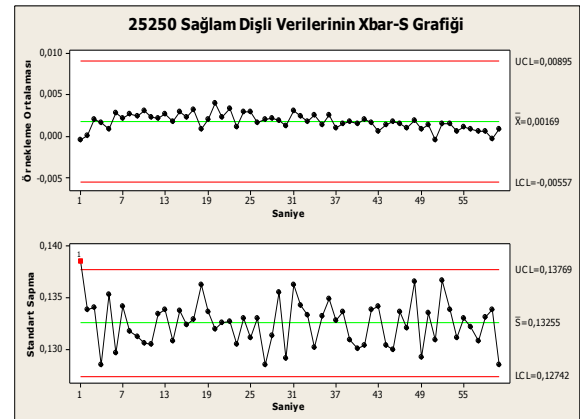
Şekil 3'e bakıldığında deney düzenegi aynı çevrim oranına sahip iki dişli kutusu bulunmaktadır. Sisteme yüklemeye, dişli kutuları arasındaki çıkış milinin burulmasıyla yapılmaktadır ve bu işlem sırasında düzenek hareketsiz konumdadır. Test dişli kutusu ve yardımcı dişli kutusu arasında iki parça halinde bulunan ve tork kaplini ile birbirine bağlanan milin yardımcı dişli kutusu tarafında bulunan parçasının üzerine metal bir bilezik ve bu bileziğin üzerine açılmış olan deliğe bir civata takılması ve civatanın boyu, konstrüksiyona yerleştirilen ayarlanmış sabit desteğe getirilmesi suretiyle sistem hareketsiz kılınmaktadır. Daha sonra iki parça halinde olan milin, test düzenegi tarafında bulunan parçasına bir moment kolu vasıtasıyla ağırlık asılır. Böylece söz konusu mil parçası burulmuş olur. Ağırlık asılı haldeyken, tork kaplini üzerinde bulunan civatalar sıkılarak kapalı devre tamamlanır. Ardından sabitleme civatası çıkarılır. Bu sayede burulan milin uğradığı açılmalık deformasyon kapalı devredeki tüm millere ve dolayısıyla dişlilere iletilmiş olmaktadır.

Deneylede öncelikle, GG25 dökme demir malzemeden imal edilmiş sağlam durumdaki düz dişliler takılarak sistem çalıştırılmış ve sistemin çeşitli ön yük (25, 50 ve 75 Nm) ve devir sayıları (250, 500 ve 750 d/d) için rulmanlı yataklar

üzerinden titreşim genlikleri kaydedilmiştir. Daha sonra deney düzenegiindeki karşılıklı dişlilerde suni olarak hata oluşturulan aşınmış dişliler aynı ön yük ve devir sayıları için çalıştırılarak yataklardaki titreşimler kaydedilmiştir. Motor devri sabit değerde iken, yük değeri değiştirilmiş, yük sabit değerde iken, motor devri değiştirilerek deneyler yapılmıştır.

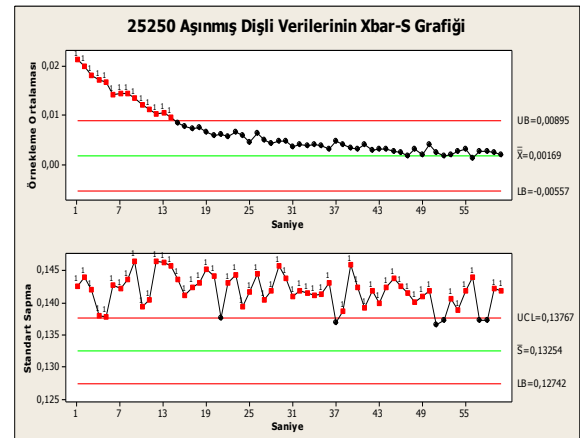
5 \bar{X} ve S Grafikleri ve Yorumları

Elde edilen titreşim verileri MINITAB programı ile bir dakikalık çalışma sonucu ve örnekleme hacmi olarak saniyede 3000 veri alınarak istatistiksel proses kontrol grafikleri ile analiz edilmiştir. Sağlam dişli verileriyle alt ve üst kontrol limitleri belirlenmiştir. Süreç içerisinde hasarlı dişlilerden elde edilen veriler İPK grafiklerinde analiz edilerek kusurların tespiti istatistiksel olarak ortaya konmuştur.



Şekil 4: 25 N, 250 d/d durumu sağlam dişli \bar{X} - S grafiği.

Şekil 4'de 25 Nm yüklemeye ve 250 d/d çalışma şartlarında, sağlam durumdaki bir düz dişliden bir dakikalık çalışma sonucunda elde edilen titreşim verilerinin kullanılması ile çizilen X-bar ve S grafiği görülmektedir. Bu grafikte ortalama değer 0,00169 ve standart sapma değeri 0,13255 olarak bulunmuştur.

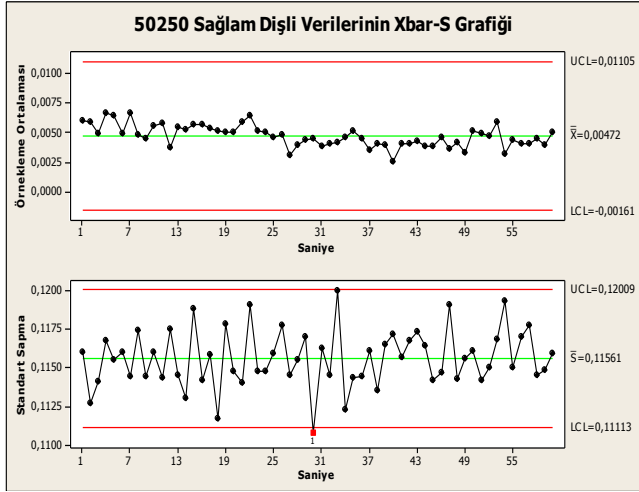


Şekil 5: 25 N, 250 d/d durumu aşınmış dişli \bar{X} - S grafiği.

Şekil 5'de sağlam durumdaki dişliden elde edilen ortalama, standart sapma ve kontrol limitleri kullanılarak bir dakikalık çalışma sonucu aşınmış dişli titreşim verilerinin X-bar ve S grafiği görülmektedir.

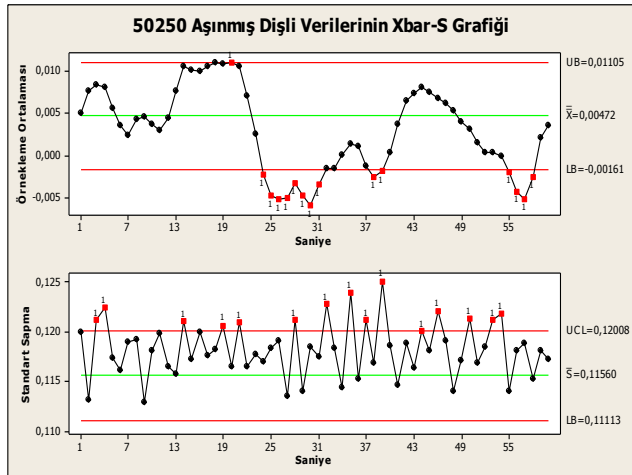
Aynı koşullarda çalışma sonucu sağlam ve aşınmış dişlilerin kontrol grafiklerine bakıldığında beklenildiği gibi sağlam dişli titreşim verilerinin merkez çizgi etrafında rasgele bir davranış

içerisinde olduğu, sınır ihlali gibi anormal bir davranış içerisinde olmadığı görülmektedir. Aşınmış dişli titreşim verilerinin ise kontrol grafiklerinde anormal bir davranış içerisinde olduğu ve örnekleme ortalaması grafiğinde istikrarlı bir şekilde azalış göstererek bir trend izlediği görülmektedir. Grafiklerde sınır ihlallerinin de gerçekleştiği gözlemlenmektedir.



Şekil 6: 50 N, 250 d/d durumu sağlam dişli \bar{X} - S grafiği.

Şekil 6'da 50 Nm yüklemeye ve 250 d/d çalışma şartlarında, sağlam durumdaki bir düz dişliden bir dakikalık çalışma sonucunda elde edilen titreşim verilerinin kullanılması ile çizilen X-bar ve S grafiği görülmektedir. Bu grafikte, ortalama değeri 0,00472 ve standart sapma değeri 0,11561 olarak bulunmuştur.



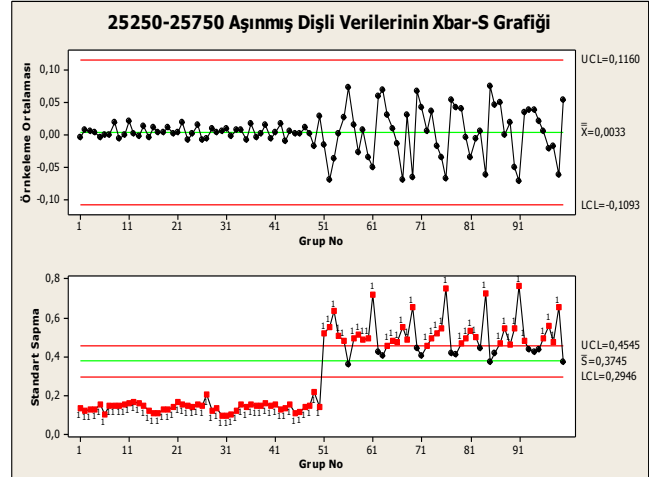
Şekil 7: 50 N, 250 d/d durumu aşınmış dişli \bar{X} - S grafiği.

Şekil 7'de sağlam durumdaki dişliden elde edilen ortalama, standart sapma ve kontrol limitleri kullanılarak aynı koşullarda, bir dakikalık çalışma sonucu aşınmış dişli titreşim verilerinin X-bar ve S grafiği görülmektedir.

Sağlam ve aşınmış dişlilerin örnekleme ortalaması ve standart sapma grafiklerine beraber bakıldığında sağlam dişliden elde edilen titreşim verilerinin anormal bir davranış içerisinde olmadığı, sürecin kontrol altında olduğu görülmektedir. Aşınmış dişliden elde edilen titreşim verilerinin ise anormal bir davranış içerisinde olduğu, 20. saniyeden itibaren örnekleme ortalaması grafiğinde kontrol sınırı ihlallerinin

gerçekleşmeye başladığı ve noktaların periyodik olarak, istikrarlı bir şekilde artış ve azalış göstererek bir trend izlediği görülmektedir. Standart sapma grafiğinde bu durum ani bir artış, sınır ihlalleri ve anormal davranış olarak rasgele bir eğilim içerisinde olmadığı şeklinde kendisini göstermektedir.

Aynı çalışma şartlarında sağlam ve aşınmış dişlilerden elde edilen verilerin istatistiksel proses kontrol grafiklerindeki analizlerinden, aşınmış dişlilerin kullanıldığı proseste hatanın varlığı tespit edilebilmektedir.



Şekil 8: 25 N, 250 - 750 d/d durumları için aşınmış dişli verilerinin \bar{X} - S grafiği.

Şekil 8'de 25 Nm yüklemeye durumundaki aşınmış dişlinin 250 d/d ve 750 d/d çalışma şartlarında elde edilen titreşim verileriyle oluşturulan X-bar ve S grafiği görülmektedir. Grafik oluşturulurken her iki devir durumu için 5000 veri alınarak, toplamda 10000 veri 100'erli olarak gruplandırılmıştır. Grafiğe bakıldığında ilk 50 grup olan 250 d/d çalışma koşullarında elde edilen verilerin merkez çizgi etrafında normal bir şekilde dağılım gösterdiği görülmektedir. 51. gruptan itibaren ise 750 d/d çalışma koşullarında elde edilen titreşim verilerinin örnekleme ortalaması ve standart sapma değerlerinde artış olduğu ve noktaların kontrol limit değerlerine doğru yaklaştığı gözlemlenmektedir. Ayrıca standart sapma grafiğinde devir sayısının artırılması durumu kendisini noktaların ani artış ve azalış şeklinde göstermektedir. Buradan, aynı yüklemeye koşullarındaki aşınmış dişlilerde devir sayısının artırılması ile beraber titreşim genliklerinin, dolayısıyla ortalama ve standart sapma değerlerinin artış gösterdiği sonucuna varılmaktadır.

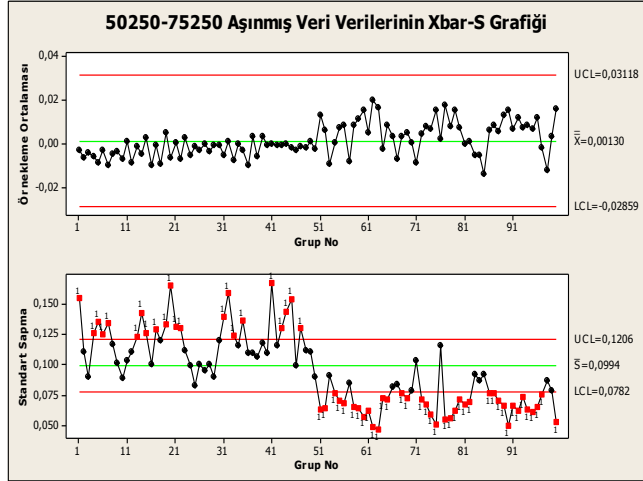
Şekil 9'da 250 devir/dakika çalışma şartlarındaki aşınmış dişlilerin 50 Nm ve 75 Nm yüklemeye durumlarında elde edilen titreşim verileriyle oluşturulan X-bar ve S grafiği görülmektedir. Grafik oluşturulurken her iki yüklemeye durumu için 5000 veri alınarak toplamda 10000 veri oluşturulmuş ve örnekleme hacmi 100 olarak gruplandırılmıştır.

Grafikte ilk 50 grup 50 Nm yüklemeye durumundaki çalışma sonucu kaydedilen titreşim verilerinin süreci görülmektedir. Örnekleme ortalaması grafiğinde noktaların anormal bir dağılım gösterdiği, merkez çizginin alt kısmında yoğunlaşmış olduğu görülmektedir. Standart sapma grafiğinde ise ani artış, azalışlar şeklinde kontrol dışı bir süreç ve sınır ihlallerinin varlığı tespit edilmektedir. 51. gruptan itibaren ise 75 Nm yüklemeye durumundaki çalışma koşullarında elde edilen titreşim verilerinin süreci görülmektedir. Grafikte bu noktadan itibaren örnekleme ortalaması ve standart sapma

değerlerinde artış olduğu ve noktaların kontrol limit değerlerine doğru yaklaştığı gözlemlenmektedir. Ayrıca standart sapma grafiğinde yük miktarının artırılması durumunun kendisini noktaların ani artış, azalış ve 50 Nm yükleme durumuna göre daha fazla sayıda sınır ihlallerinin gerçekleşmesi şeklinde göstermektedir. Buradan, aynı devir sayısında çalışma sonucu aşınmış dişlilerde yükleme miktarının artırılması ile beraber titreşim genliklerinin arttığı ve bununla birlikte ortalama ve standart sapma değerlerinin artış gösterdiği sonucuna varılmaktadır.



Şekil 10: Deneysel olarak kullanılan aşınmış dişli yüzeyi.



Şekil 9: 250 d/d, 50 N-75 N durumları için aşınmış dişli verilerinin \bar{X} -S Grafiği.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, düz dişlilerde çalışma esnasında kaydedilen titreşimlerdeki değişimler incelenerek, dişlilerde en temel hasar olan aşınma hasarının istatistiksel proses kontrol metotları ile analiz edilerek tespiti gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla kapalı devre dişli test düzeneği kurulmuş ve öncelikle sağlam dişliler takılarak sistem çalıştırılmıştır. Sistemin çeşitli yükleme ve devir sayıları için titreşim genlikleri kaydedilerek kontrol grafikleri elde edilmiş ve böylelikle referans değerleri olan alt ve üst kontrol limitleri belirlenmiştir. Daha sonra deney düzeneğindeki karşılıklı dişlilerde Şekil 10'da görüldüğü üzere suni olarak aşınma hasarı oluşturulmuştur. Sistem bu şartlar altında çeşitli yükleme ve devir sayıları için çalıştırılarak titreşim genlikleri kaydedilmiş ve kontrol grafikleri çizdirilmiştir. Sonuç olarak, sağlam dişlilerden elde edilen verilerin grafikleri ile kusurlu (aşınmış) dişlilerden elde edilen verilerin grafikleri karşılaştırıldığında aşınma hasarının varlığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca yükleme durumu ve motor devri sabit tutularak aşınmış dişlilerde yük miktarının ve devir sayısının artışının kontrol grafiklerinde kendisini nasıl gösterdiği analiz edilmiştir. Yük sabit değerde iken devir artırıldığında ve devir sayısı sabit değerde iken yük miktarı artırıldığında titreşim genlikleri artmaktadır. İstatistiksel proses kontrol grafiklerinde bu durumlar, örnekleme ortalaması değerlerinde artış, limit değerlerine doğru yaklaşma ve standart sapma değerlerinde ani artış ve azalış şeklinde daha düzensiz bir süreç şeklinde kendisini göstermektedir.

Bu deneysel çalışma sayesinde, düz dişli aşınma hasarı istatistiksel proses kontrol metodu ile tespit edilmiş ve daha ucuz maliyetle hatanın kaynağı büyük arızalara sebep olmadan, saptanmaya çalışılmıştır.

7 Kaynaklar

- [1] Maraş, S., Duman, Ö., Arslan, H., Yüzükırmızı, M., "Dişlilerden elde edilen titreşim sinyallerinde istatistiksel proses kontrol uygulaması" 32. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi, İstanbul, 2012.
- [2] Andrade, F. A., Esat, L. L., Badi, M. M., "Gear condition monitoring by a new application of the Kolmogorov-Smirnov test", *Journal of Mechanical Engineering Science*, 215, 653-661, 2001.
- [3] Baydar, N., Chen, Q., Ball, A., Kruger, U., "Detection of incipient tooth defect in helical gears using multivariate statistics", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15 (2), 303-321, 2001.
- [4] Birgören, B. ve Koçer, B., "İstatistiksel proses kontrol çizelgelerinde hata teşhisine yönelik yaklaşımlar", *G. Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17 (4), 59-69, 2004.
- [5] Zhan, Y. M., Mechefske, C.K., "Load-independent condition assessment of gears using Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test and autoregressive modeling", *Word Congress on Engineering Asset Management*, Australia, 2006.
- [6] Zhan, Y., Makis, V., Jardine, A. K.S., "Adaptive state detection of gearbox under varying load conditions based on parametric modelling", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20 (1), 188-221, 2006.
- [7] Wang, W. Q., Ismail, F., Golnaraghi, M. F., "Assessment of gear damage monitoring techniques using vibrations measurements", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15 (5), 905-922, 2001.
- [8] Djedou, F., Zegadi, R., "Practical statistical methods for predicting life reliability of fine pitch gear pairs", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2 (3), 494-500, 2007.
- [9] Raad, A., Antoni, J., Sidahmed, M., "Indicators of cyclostationarity: Theory and application to gear fault monitoring", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22 (3), 74-587, 2008.
- [10] Yimin, S., Mechefske, C. K., "Gearbox vibration monitoring using extended kalman filters and hypothesis tests", *Journal of Sound and Vibration*, 325, 629-648, 2009.
- [11] Orhan, S., "Rulmanlarla yataklanmış dinamik sistemlerin titreşim analizi ile kestirimci bakımı", Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.

- [12] Örümlü, M., "Üretim sürecinde istatistiksel proses kontrol ve işletme uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [13] Birgören, B., ve Koçer, B., "İstatistiksel proses kontrol çizelgelerinde hata teşhisine yönelik yaklaşımlar", *G. Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17 (4), 59-69, 2004.
- [14] Çolak, T., "İstatistiksel süreç kontrolü ve uygulamalar", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.