
	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 27-01-2016		
	<u>Kabul/Accepted</u> 25-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.221303	

Düz dişlilerdeki aşınma ve kırık diş hatalarının tespit edilmesinde titreşim verileri kullanılarak istatistiksel proses kontrol uygulaması

Sinan Maraş¹, Hakan Arslan^{2*}

ÖZ

Dişli çarklar güç ve hareket iletimi için endüstrinin her alanında, değişik ortam ve koşullarda kullanılan makine elemanlarıdır. Makinelerin bu önemli elemanlarının zorlayıcı şartlar altında çalışması sonucu, dişlerde hasarlar meydana gelmekte ve daha büyük olumsuzlukları önleyebilmek için bu hasarların bilinmesi ve oluşum nedenlerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada amaç, dişli arızalarının sebep olduğu titreşimlerin istatistiksel proses kontrol grafiklerinde analiz edilerek düz dişli hata tespitini gerçekleştirmektir. Bu amaçla bir deney düzeneği kurulmuş, önce sağlam dişlilerin kullanılması ile farklı yükleme ve devir sayıları durumları için rulmanlı yataklar üzerinden radyal yöndeki titreşimler kaydedilerek referans spektrumları elde edilmiştir. Daha sonra sağlam dişliler üzerinde yapılan işlemlerle suni olarak aşınma ve kırık hasarları oluşturulmuştur. Düzenek çeşitli ön yük ve devir sayılarında çalıştırılarak rulman yataklarındaki titreşimler kaydedilmiştir. Bu titreşimlerin frekans spektrumları ve istatistiksel proses kontrol grafikleri çizdirilmiştir. Sağlam ve hasarlı dişli durumları için oluşturulan grafikler karşılaştırıldığında aşınmış dişli, tek diş kırık pinyon dişli ve tek diş kırık pinyon ve tekerlek dişli hasarlarının varlığı tespit edilebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: düz dişli çarklar, dişli hasarları, titreşimler, istatistiksel proses kontrol, hata teşhisi

Application of statistical process control method to monitor wear and broken tooth faults in spur gears using vibration data

ABSTRACT

Gears are machine elements used extensively in many areas of industry to transmit power and motion. Damage occurs due to working under compulsive conditions effective gear fault detection is crucial to prevent greater drawbacks and economic losses. The objective of this study is to monitor the existence of different types of gear defects by examining changes in the vibrations of spur gears due to faults using vibrations analysis and statistical process control methods. For this purpose, a closed-loop test rig was constructed. Firstly, good gears were attached to the test assembly and vibrations data which received at radial direction via sensors on the bearings were recorded by operating the system at various loading and number of cycle's conditions. Thus, a reference spectrum was obtained. Then the system was operated with

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

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

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

artificial wear and fracture which were created on the surfaces of spur gears at various loading and number of cycles conditions. Vibrations data which were received from the bearings were recorded. These data were plotted on statistical control charts and frequency spectrum. Graphs of data obtained from good gears and defective gears were compared with each other. Thus it was possible to detect the existence of worn gear, one tooth broken pinion gear and one tooth broken from each pinion and wheel gears.

Keywords: spur gears, gear faults, vibrations, statistical process control, fault diagnosis

1. GİRİŞ(INTRODUCTION)

Dişliler, hareket ve güç iletimi için sanayide birçok alanda kullanılmaktadır. Dişlilerde aşınma, kırılma v.b. istenmeyen hasarlar meydana geldiği zaman makinelerde istenmeyen, ani durdurular oluşmakta ve bu durum zamanla daha büyük arızalara yol açmaktadır. Böyle bir durumda, dişli çarklardaki hasarların erken tespiti son derece büyük önem arz etmektedir. Titreşim, makine içyapısında oluşabilecek durumları yansıtmada en etkin göstergelerden biridir. Bu sebeple dişlilerde hasar teşhisi titreşim analizi ile yapılabilmektedir. Titreşim verileri sinyal işleme, yapay zeka, istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek dişlilerdeki hasarlar teşhis edilebilmektedir. Günümüzde, frekans analizi ve istatistiksel metotların dişli hasar teşhisinde uygulanması ile ilgili yapılan çalışmalar bulunmaktadır.

Fakhfakh v.d. [1] dişli temas sertliğini etkileyen hataları sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yerel ve dağılmış hatalar tarafından sırasıyla çatlak ve pullanma (spalling) başlangıcını spektrum ve dalgaform grafiklerinde modellemişlerdir. Ai ve Li [2] Hilbert-Huang dönüşümü ile titreşim sinyallerinin spektrum grafiğini elde ederek dişli çatlak hasarını incelemişlerdir. Öztürk v.d. [3] dişli çark oyukçuk arızasını dalga form, spektral analiz ve istatistiksel analiz metotlarını kullanarak tespit edilebilirliğini incelemişlerdir. Baydar ve Ball [4] titreşim sinyalleri ile akustik sinyaller karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar, dişli kutularında birkaç tip ilerleyen hataların erken algılanmasında akustik sinyallerin geçerli bir yöntem olduğunu göstermiştir. Park ve Lee [5] çeşitli tipte hasarlı olan helisel dişlilerde, etki eden tork ile devir hızının titreşim artışındaki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Loutridis [6] dişli hataları gelişiminin izlenmesi için yeni geliştirilmiş bir metot olan deneysel ayrışım modundan bahsetmiştir. Wang [7] diş çatlaklarının erken algılanması için rezonans çözme tekniğinin,

eşzamanlı sinyal ortalama tekniği olarak geçerliliğini kanıtlamıştır. Parey ve Tandon [8] dişlideki diş kusuru büyüklüğünü, ölçülebilir titreşim sinyali ile ilişkilendirilerek bir çarpma hızı modeli sunmuş ve analitik modeli deneysel olarak doğrulamıştır. Sung v.d. [9] dalgacık dönüşümü metodu ile dişlilerde hasar tespiti üzerinde çalışmışlardır. Amabili ve Fregolent [10] model parametrelerini tanımlayan, yeni bir yöntem olan doğal frekans ile sönüm ikilisini ve düz dişli çiftinin eşdeğer dişli hatasını sunmuştur. Andrade v.d. [11] aşınma, kırık v.b. diş kusurları tespitinde Kolmogorov-Smirnov testini kullanmışlardır. Birgören ve Koçer [12] tek değişkenli kontrol şeması, yapay sinir ağı ve çok değişkenli kontrol şemalarını İstatistiksel Proses kontrol (İPK) grafiklerinde hasar tespiti için kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Zhan v.d. [13] farklı yükleme koşullarında, sağlam dişlilerden elde edilen titreşim verilerini sinyal işleme yöntemlerinde kullanarak kırılma hasarı tespiti üzerinde çalışmışlardır. Kolmogorov-Smirnov istatistiksel analizi ile verilerin normal dağılıma sahip olduğunu göstermişlerdir. Wang v.d. [14] sağlam, aşınma, çatlak ve kırılma hasarına sahip dişliler için faz ve genlik modülasyonu, beta basıklık ve dalga dönüşümü metotlarının hasar teşhisinde kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Djeddou ve Zegadi [15] ortaya koydukları istatistiksel metotların dişlilerin güvenilirlik ve ömür tahmininde iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Yimin v.d. [16] dişlilerden çeşitli yükleme durumlarında ölçülen titreşim verilerini Kolmogorov-Smirnov testi ile incelemişlerdir.

Bu çalışmada ise, bir dişli test düzeneği çeşitli yükleme ve devir sayısı durumları için çalıştırılarak düz dişlilerden elde edilen titreşimlerin değişimleri dalgaform, spektrum ve istatistiksel proses kontrol grafiklerinde incelenmiştir. İstatistiksel proses kontrol grafiklerinden hatanın başlayıp başlamadığı ve ne tür bir hata olduğu anlaşılabilen, fakat spektrumlara bakılarak sağlam dişli-aşınmış dişli ayrımı ve tek kırık dişli-çift kırık dişli ayrımı tam olarak yapılamamaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Dişlilerde Oluşan Titreşimler (Vibrations Occuring in Gears))

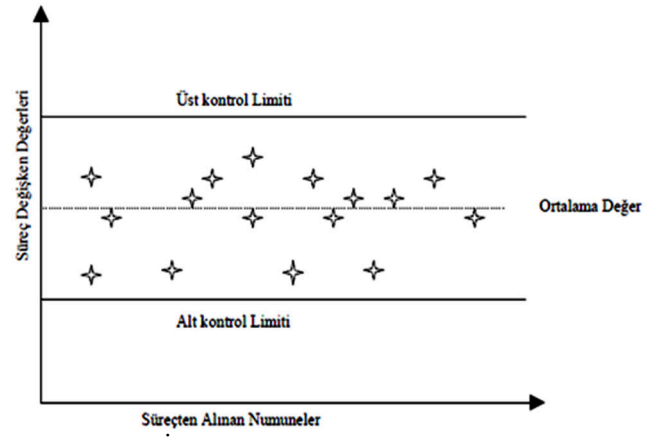
Üretim, montaj ve kavrama durumundaki rijitliğin değişmesi sebepleriyle dişlilerde titreşim meydana gelmektedir. Makine elemanları sürekli çalışma ile beraber yorulmaya uğramaktadırlar. Dişlilerde de yorulma sonucu hasarlar ortaya çıkmaktadır. Dişlilerde yorulma sebebiyle oyuklaşma ve kabarma hasarları oluşmaktadır. Gerilme dalgaları bir dişin oyuklaşmış kısmının kavramaya darbeli şekilde teması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu dalgalar düşük seviyede genliğe sahiptir ve etkin olarak ele alınırsa kusurun erken teşhisinde kullanılabilir [17].

Dişli hataları ya da arızalı dişliler, rulmanlı yataklarda olduğu gibi düşük genlikli fakat yüksek frekanslı titreşimler oluştururlar. Titreşim genellikle dişli kavrama frekansında (DKF) çok belirgin durumdadır. Diş kavrama frekansı, giriş dişlisinin diş sayısının giriş dişlisi devir sayısı ile çarpılması sonucunda elde edilir. Sağlam dişlilerde dişli kavrama frekansında titreşimler oluşmaktadır. Doğrusal olmayan şartlardan ötürü kavrama durumu için kavrama frekansı ile birlikte onun harmonikleri de meydana gelmektedir [18].

2.2. İstatistiksel Proses Kontrol (Statistical Process Control)

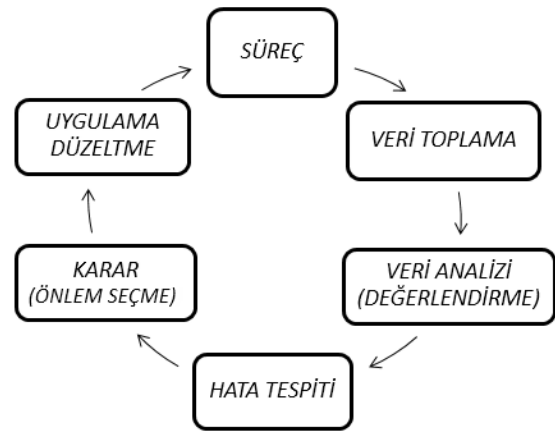
İstatistiksel proses kontrol, istenilen kalitede ürün elde edebilmek için üretim aşamasında oluşabilecek kusurların belirlenmesi, önleminin alınması ve daha etkin bir prosesin sağlanması yoluyla kullanılmakta olan istatistiksel metotları içermektedir. İstatistiksel proses kontrol, İPK grafikleri ile ürünün üretim aşamasındaki kalite verilerinin incelenmesinden oluşmaktadır.

İstatistiksel proses kontrol çizelgesi ortalama değerleri gösteren orta hat ve bu hattın altına ve üstüne çizilen alt kontrol değeri ve üst kontrol değerinden meydana gelmektedir (Şekil 1). Orta çizgi, ölçülen parametrenin amaç değerini; limitler arasındaki bölge ise müsaade edilebilir kontrollü bölgeyi ifade etmektedir. Ölçülen değerler proses boyunca İPK çizelgelerinde işaretlenmektedir.



Şekil 1. İstatistiksel proses kontrol grafiği [19].
(Example of Process Control Graph)

Grafiklerde, ölçülen değerler ve bu değerler ile elde edilen istatistik değerleri işlenmektedir ve bu değer, kontrol alanı olarak isimlendirilen bir aralıkta olursa prosesin kontrol altında olduğu sonucuna varılmaktadır. Ölçülen değer kontrol alanının dışında bulunursa proseste kontrol-dışı bir etkinin var olduğu ve proseste kusura sebebiyet veren bir kusur kaynağının sürece dâhil olduğu sonucuna varılır. Bu durumda proses durdurulup hataya neden olan sebep incelenerek bu hatanın giderilmesi için bir takım tedbirler alınır [12]. Böylelikle sürecin istatistiksel durumu görsel hale getirilmiş olur. Yapılan bu işlemle beraber operatörün kolaylıkla sürecin kontrolüne imkân sağladığı gibi çizelgelerin analiz edilmesiyle de prosesin sürekliliği sağlanmış olmaktadır. İPK uygulamasında kullanılan klasik kontrol sistemi Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. İPK uygulamasında kullanılan klasik kontrol sistemi (Classical control system used for SPC application)

2.3. \bar{X} ve S Grafikleri (\bar{X} and S Graphs)

Merkez çizgiyi ifade eden \bar{X} süreçteki her bir grubun ortalamalarının ortalaması olarak ele alınmaktadır ve alt grup standart sapma değerlerini de S kontrol grafikleri göstermektedir. Her grubun standart sapmalarının ortalaması ise merkezi çizgiyi ifade eden \bar{S} ile tanımlanmaktadır. Alt ve üst kontrol limitleri, örnekleme büyüklüğüne bakılarak standart tablodan bu değere karşılık gelen düzenleme faktörüne göre belirlenmektedir. Alt kontrol sınırı ve üst kontrol sınırı bulunurken ana kitle ortalaması bilinmediği durumlarda deneysel olarak yeterli miktarda örnekleme yapılarak bu değer tahmin edilebilmektedir. Bunun için öncelikle örnekleme hacmine (n) bakılarak, bu değer karşısındaki standart tablolarındaki değerler (A_3, B_3, B_4) seçilir ve İPK grafikleri oluşturulur [20]. A_3S değeri $3\sigma_x$ ' in uygun bir tahmini ($3\sigma_x=A_3\bar{S}$) olduğundan (σ_x =standart sapma),

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i \quad (2)$$

Üst Kontrol Limiti:

$$\bar{ÜKL} = \bar{X} + A_3\bar{S} = B_4\bar{S} \quad (3)$$

Merkez Çizgi:

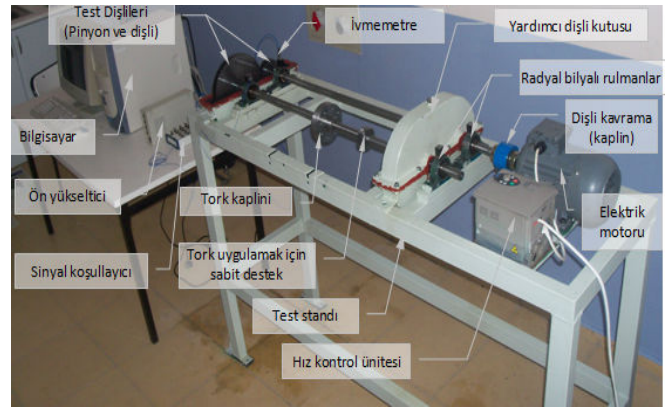
$$MÇ = \bar{X} = \bar{S} \quad (4)$$

Alt Kontrol Limiti:

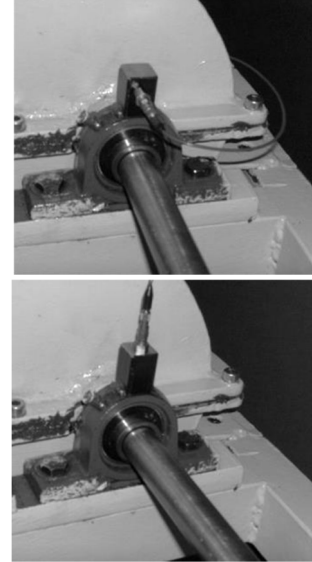
$$\bar{AKL} = \bar{X} - A_3\bar{S} = B_3\bar{S} \quad (5)$$

2.4. Deney Düzenegi (Experimental Set-Up)

Dişlilerin deneysel olarak incelenmesinde genellikle kapalı devre güç iletim düzenegi kullanılmaktadır. Bu bakımdan Şekil 3'te görüldüğü gibi kapalı devre güç iletim sistemi kurularak, çeşitli yükleme ve devir sayılarında sistem çalıştırılmıştır. Sağlam ve aşınmış dişlilerin sistemde kullanılması sonucu elde edilen titreşim genlikleri, rulmanlı yataklar üzerinde bulunan ivmeölçerler ve dijital analog çevirici sayesinde bilgisayara kaydedilmiştir. Deney sisteminde kullanılan üç fazlı AC motor 220-240 Volt, 50-60 Hz, 1.1 kW güç ve 1460 d/d hıza çıkma gibi çalışma şartlarına sahiptir. TELEMENIQE marka hız kontrol cihazı sayesinde istenilen devir sayısında motorun çalıştırılmasına imkân verilebilmektedir.



Şekil 3. Deney düzenegi (Test rig)



Şekil 4. Rulmanlı yataklar üzerine ivmeölçerlerin radyal ve eksenel yönde yerleştirilmesi (Magnetically fixed accelerometer on ball bearing at radial and axial directions.)

Şekil 4'e bakıldığında giriş dişli kutusu tarafında bulunan pinyon dişli rulmanlı yatağı üzerine manyetik olarak sabitlenen piezo-elektrik ivme alıcısının yerleştirildiği görülmektedir. PCB 352C68 model ivmeölçer (Ölçüm aralığı 0.5 Hz-10 kHz ve hassasiyeti 9.27 mV/g olan) titreşimin sebep olduğu basınç nedeniyle elektriksel sinyalleri oluşturmakta ve ivme alıcısından gelen sinyaller PCB 482A16 model sinyal koşullayıcı da elektrik sinyali taşınabilir bir voltaj sinyaline çevrilmekte ve filtreleme işlemi yapılmaktadır. Elektrik sinyalleri olarak A/D veri toplama kartına gelen veriler, çevrim hızı 1 MS/s olan 16-Bitlik NI PCI-6251 A/D veri toplama kontrol kartına aktarılmakta ve ivme verileri haline bilgisayar ortamındaki yazılım vasıtasıyla getirilmektedir. Bu veriler, Fourier analizi vasıtasıyla zaman ortamından frekans ortamına aktarılmaktadır.

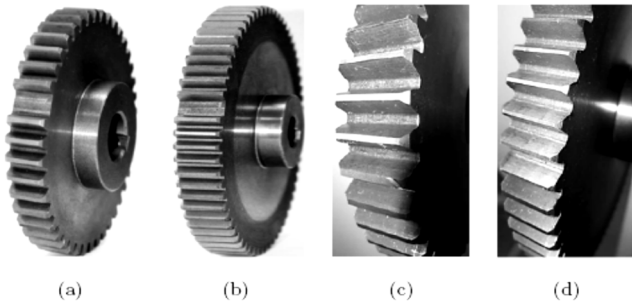
Deneylerde Çizelge 1'de özellikleri verilen dişliler kullanılmıştır. Öncelikle, herhangi bir kusura

sahip olmayan düz dişliler kullanılarak farklı yüklemeler (25, 50 ve 75 Nm) ve devir sayıları (250, 500 ve 750 d/d) durumlarındaki referans genlikleri elde edilmiştir. Deney sistemindeki karşılıklı dişlilerde sonrasında suni olarak kusurlar meydana getirilmiştir (Şekil 4).

Deneyler Şekil 5’ te görüldüğü gibi sağlam dişlilerle, pinyon ve çevrilen dişlide dişler aşındırıldığında, sağlam pinyon dişli ile 1 tane dişin dibinden kırıldığı çevrilen dişlide ve hem pinyon hem de çevrilen dişlilerin her birinde birer adet dişin diplerinden kırıldığı 4 farklı kategoride yapılmıştır. Deneyler, devir sayısı sabitken yüklem miktarının değiştirilmesi, yüklem değeri sabitken motor devir sayısının değiştirilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan dişlilerin özellikleri
(Parameters of the used test gear pair)

	Pinyon Dişli	Çevrilen Dişli
Diş Üstü Çapı (mm)	90	228
Diş Sayısı	46	74
Modül (mm)	2.5	2.5
Diş Geniliği (mm)	23	23
Malzeme	GG25 Pik Dökme Demir	GG25 Pik Dökme Demir



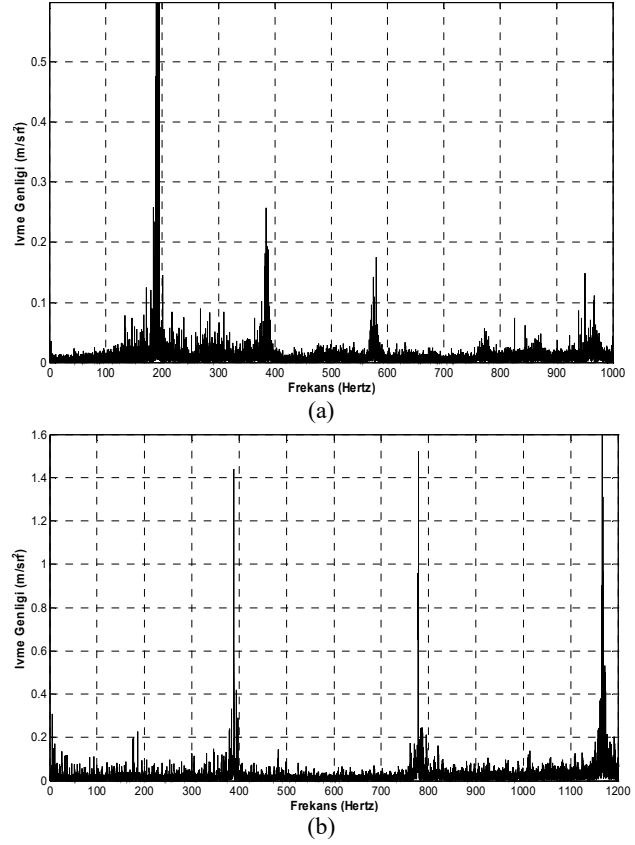
Şekil 5. Test Dişli Resimleri a) Tek diş kırık pinyon b) Tek diş kırık çevrilen dişli c) Aşınmış pinyon dişli d) Aşınmış çevrilen (tekerlek) dişli.
(Test Gear Photos a) pinion gear with one tooth broken b) wheel gear with one tooth broken c) worn pinion gear d) worn wheel gear.)

3. TARTIŞMA VE YORUMLAR (RESULT AND DISCUSSIONS)

3.1. Frekans Spektrum Grafikleri ve Yorumları (Discussion of Obtained Frequency Spectrum Graphs)

3.1.1. Sağlam Dişliler (Good Gears)

Şekil 6.a’da görüldüğü gibi sağlam dişlilerde 250 d/d mil hızı için dişlinin radyal yöndeki frekans spektrumundaki en büyük zirveler beklediği gibi çevrilen dişli DKF (195 Hz) ve onun harmoniklerinde (390 Hz, 585 Hz,..) ortaya çıkmaktadır. Sağlam dişli için mil hızı 500 d/d’ya yükseltildiğinde, dişlinin frekans spektrumundaki en büyük zirveler Şekil 6.b’de görüldüğü gibi çevrilen dişli DKF (390 Hz) ve onun harmoniklerinde (780 Hz, 1170 Hz,..) ortaya çıkmaktadır.



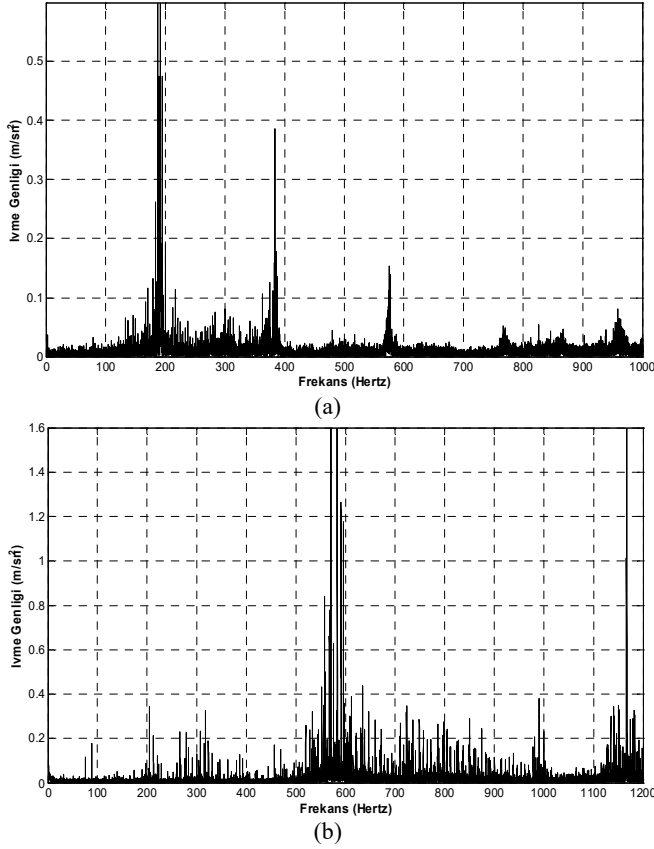
Şekil 6. 25 Nm yük ve $n=250$ d/d, 500 d/d mil hızları için sağlam dişlinin frekans spektrum grafiği (Frequency spectrum graphs of the good gears for 25 Nm loading and a) 250 rpm b) 500 rpm motor speed conditions.)

3.1.2. Aşınmış Dişliler (Worn Gears)

Şekil 7.a’da görüldüğü gibi dişleri aşındırılmış dişli için pinyon dişli hızı 250 d/d alındığında, dişlinin x yönündeki frekans spektrumundaki en büyük zirveler çevrilen dişli DKF (195 Hz), harmoniklerinde (390 Hz, 585 Hz, ...) ve DKF’nin harmoniklerinin çevrilen dişli mil dönme hızı (2,63 Hz) ile olan yan bantlarında (195 ± 2.63 Hz, ± 5.26 Hz, ± 7.89 Hz ve harmonikleri) ortaya çıkmaktadır.

Pinyon dişli hızı 750 d/d’ya yükseltildiğinde, Şekil 7.b’de görüldüğü gibi frekans spektrumundaki en büyük zirveler, çevrilen dişli DKF (584 Hz), harmoniklerinde (1168 Hz, 1752

Hz,...) ve DKF' nin harmoniklerinin çevrilen dişli mil dönme hızı (7.89 Hz) ile olan yan bantlarında ($584 \pm 7.89 \text{ Hz} \pm 15.78 \text{ Hz} \pm 23.67 \text{ Hz}$) görülmektedir.



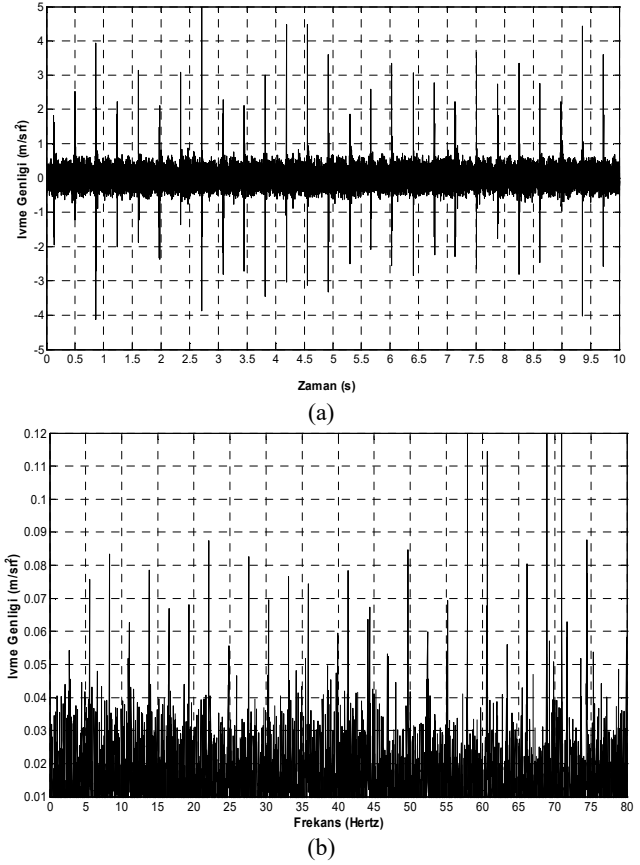
Şekil 7. 25 Nm yük ve $n=250 \text{ d/d}$, 750 d/d mil hızları için dişleri aşınmış dişlinin frekans spektrum grafiği (Frequency spectrum graphs of the worn gears for 25 Nm loading and a) 250 rpm b) 750 rpm motor speed conditions.)

3.1.3. Kırık Dişliler(Broken Gears)

Kırık dişli için elde edilen titreşim grafiği periyodik vuruntulu genlik-zaman grafiği olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu vuruntular arasındaki zaman $1/\text{kırık dişin dönme hız değerine}$ eşittir. Kırık dişli vuruntu frekansı;

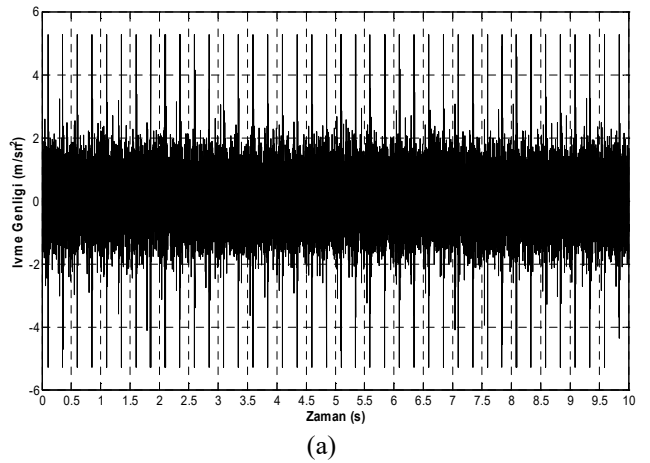
$$f = \frac{1}{n_{k.d.}} = \frac{1}{2.63 \text{ Hz}} \cong 0.38 \text{ s}$$

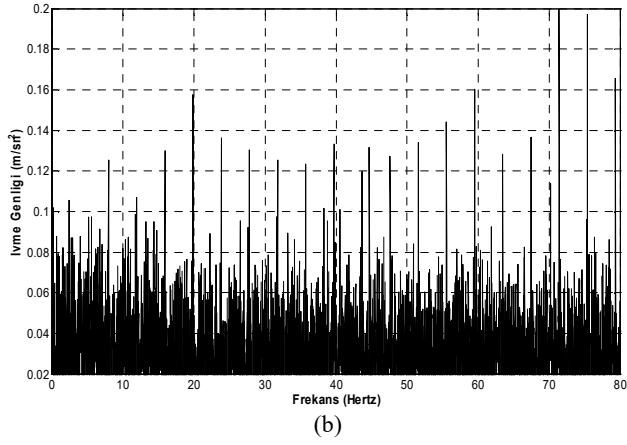
görüldüğü gibi kırık dişlisinde 250 d/d mil hızı için dişlinin x yönündeki salınımı, periyodik olarak 0.38 s aralıklarla periyodik vuruntular şeklindedir. Yani mil dönme hızına bağlı olarak kırık diş diğer dişliye temas ettiği anda vuruntular oluşmaktadır. Şekil 8.b 'de frekans spektrumu grafiğinde bu durum dişli dönme devri (2.63 Hz , 5.26 Hz ,..) ve harmoniklerinde nispeten yüksek genlikli titreşimler olarak görülmektedir.



Şekil 8. 25 Nm yük ve $n=250 \text{ d/d}$ mil hızı için tek dişli kırık dişlinin titreşim ve frekans spektrum grafiği (Vibration signals and frequency spectra graphs of the one tooth broken gear for 25 Nm loading and 250 rpm motor speed conditions.)

Şekil 9.a 'da görüldüğü gibi kırık dişlisinde 500 d/d mil hızı için dişlinin x yönündeki salınımı, periyodik olarak 0.2 s aralıklarla vuruntular şeklindedir. Yani mil dönme hızına bağlı olarak kırık diş diğer dişliye temas ettiği anda vuruntular oluşmaktadır. Şekil 9.b 'de frekans spektrumu grafiğinde bu durum gürültü genliklerinin yüksek olması nedeniyle açık olarak görülememektedir.

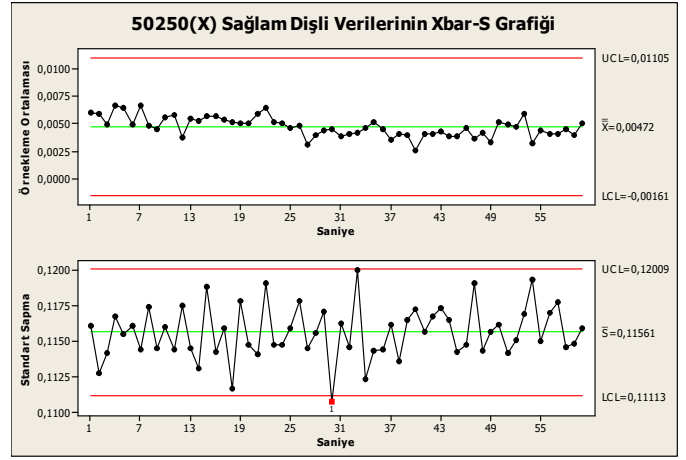




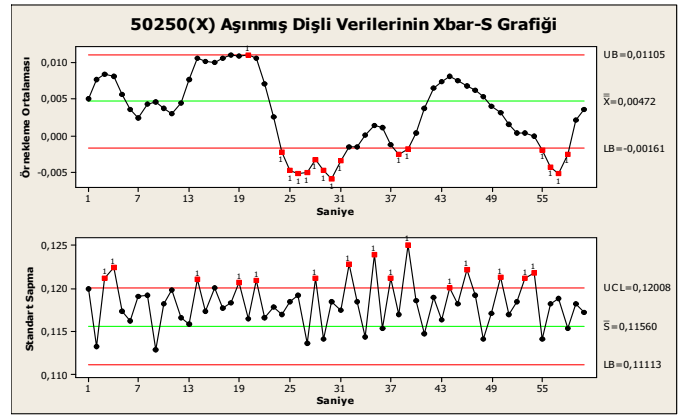
Şekil 9. 75 Nm yük ve $n=500$ d/d mil hızı için tek dişi kırık dişlinin titreşim ve frekans spektrum grafiği (Vibration signals and frequency spectra graphs of the one tooth broken gear for 75 Nm loading and 500 rpm motor speed conditions.)

3.2. $\bar{X}-S$ Grafikleri ve Yorumları ($\bar{X}-S$ Graphs and Their Discussion)

Yapılan deneyler sonucu toplanan titreşim verileri MINITAB paket programı kullanılarak istatistiksel proses kontrol şemaları çizdirilmiştir. Grafiklerde 1 dakikalık çalışma skalası ve örnekleme büyüklüğü olarak saniyede 3000 veri alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. Hasarlı olmayan sağlam durumdaki dişliden elde edilen verilerin kullanılması sayesinde alt ve üst kontrol sınırları tespit edilmiştir. Hatalı dişlilerin çalıştırılması sonucu toplanan veriler İPK grafiklerinde incelenerek hasarların tespit edilebilirliği istatistiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 10 'da 50 Nm ve 250 d/d çalışma durumundaki, herhangi bir hasarı olmayan düz dişlinin çalıştırılması sonucu elde edilen titreşim verileri kullanılarak çizilen $\bar{X}-S$ grafiği yer almaktadır. Alt ve üst kontrol limitleri, örnekleme hacmine (n) bakılarak bu değer karşısındaki standart tablolarındaki değerlerden (A_3, B_3, B_4) seçilip, bu değerlerin (3-5) numaralı ifadelerde kullanılmasıyla belirlenmektedir [20]. Grafikte örnekleme ortalaması ve standart sapma değerleri sırasıyla 0.00472 ve 0.11561 olarak hesaplanmış, sağlam durumdaki dişliden elde edilen verilerin merkezi hat etrafında rastgele bir şekilde dağıldığı, AKL ve ÜKL ihlallerinin olmadığı sadece standart sapma grafiğinde 30. saniyede bir ihlalin olduğu görülmektedir.

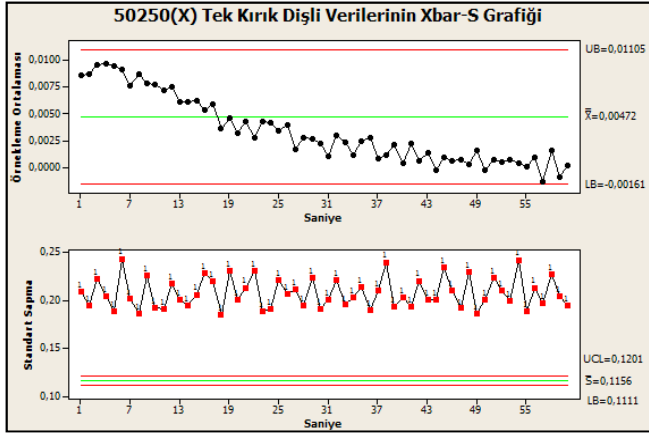


Şekil 10. 50 Nm yük ve 250 d/d motor hızı için sağlam dişli $\bar{X}-S$ grafiği ($\bar{X}-S$ graph obtained from good gear for 50 Nm loading and 250 rpm motor speed)



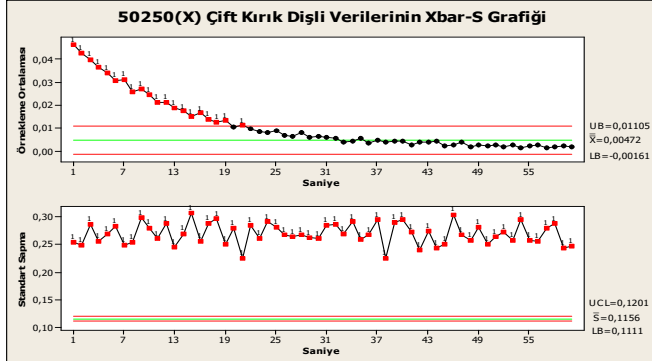
Şekil 11. 50 Nm yük ve 250 d/d motor hızı için aşınmış dişli $\bar{X}-S$ grafiği. ($\bar{X}-S$ graph obtained from worn gears for 50 Nm loading and 250 rpm motor speed.)

Şekil 11'de sağlam dişli verileriyle hesaplanan örnekleme ortalaması, standart sapma ve kontrol sınırları dikkate alınarak bir dakika çalışma skalası için oluşturulmuş aşınmış dişli titreşim verilerinin $\bar{X}-S$ grafiği yer almaktadır. Grafikte aşınmış dişli titreşim verilerinin normal olmayan bir eğilim izlediği ve örnekleme ortalaması şemasında zaman olarak 20. saniyeden sonra AKL değerinin dışına çıkmaların olduğu görülmektedir. Standart sapma grafiğinde ise, titreşim verilerinin merkez çizgi etrafında inişli-çıkışlı bir davranış içerisinde olduğu ve ÜKL sınır ihlallerinin gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 12. 50 Nm yük ve 250 d/d motor hızı için tek diş kırık pinyon dişli \bar{X} -S grafiği (\bar{X} -S graph obtained from one tooth broken pinion gear for 50 Nm load and 250 rpm motor speed)

Şekil 12’de sağlam dişli limit değerleri kullanılarak bir dakikalık çalışma sonucu tek diş kırık dişlinin titreşim verilerinin \bar{X} -S grafiği görülmektedir. Grafikte, dişli titreşim verileri kontrol grafiklerinde anormal bir davranış sergilemektedir. Örnekleme ortalaması grafiğindeki değerler, AKL ve ÜKL arasında istikrarlı bir şekilde azalma göstermektedir. Standart sapma grafiğinde ise, bütün verilerin ÜKL üzerinde inişli-çıkışlı bir davranış içerisinde olduğu görülmektedir.



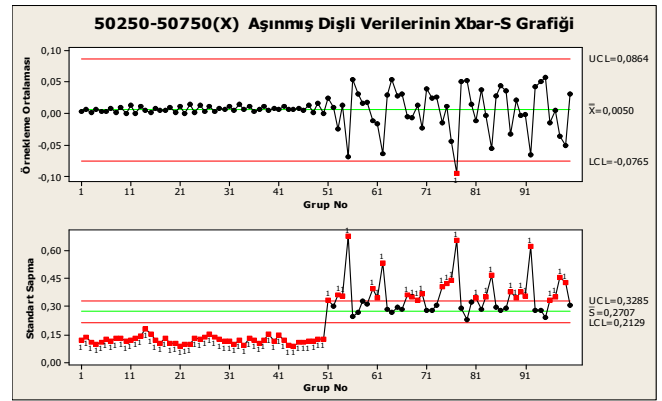
Şekil 13. 50 Nm yük ve 250 d/d motor hızı için kırık dişli çifti \bar{X} -S grafiği (\bar{X} -S graph obtained from one tooth broken from each pinion and wheel gear for 50 Nm load and 250 rpm motor speed)

Şekil 13’te sağlam dişli limit değerleri kullanılarak bir dakikalık çalışma sonucu çift diş kırık dişlinin titreşim verilerinin \bar{X} -S grafiği görülmektedir. Grafikte, kırık dişlilerin titreşim verileri normal olmayan bir eğilim izlemektedir. Örnekleme ortalaması şemasında, başlangıçta ÜKL üzerinde olan değerler 20. saniyeden itibaren kontrol sınırları içinde kalmaktadır. Standart sapma grafiğinde ise, bütün verilerin ÜKL ’nin çok

üzerinde inişli-çıkışlı bir davranış içerisinde olduğu görülmektedir.

Aşınma hasarına sahip dişlinin 50 Nm sabit yüklemeye, 250 ve 750 d/d motor hızı ile sistemin çalıştırılması neticesinde, toplanan titreşim verileri ile oluşturulan \bar{X} -S grafiği Şekil 14 ’deki gibidir. Grafikte her iki motor hızı için 5000 veri olmak üzere toplamda 10000 veri 100’ erli grup şeklinde ele alınmıştır. Grafiklerde ilk 50 grup 250 d/d, ikinci 50 grupta 750 d/d için titreşim kontrol verilerini göstermektedir.

Grafikte 50 Nm yük ve 250, 750 d/d motor hızları için, örnekleme ortalaması ve standart sapma parametreleri sırasıyla 0.005 ve 0.2707 olarak hesaplanmıştır. Örnekleme ortalaması grafiğine bakıldığında, ilk 50 grupta verilerin ortalama değer civarında rastgele bir dağılıma sahip olduğu, 51. gruptan itibaren ise verilerin AKL ye yaklaştığı görülmektedir. Standart sapma değerleri ilk 50 grupta AKL ’nin altında, 51. Gruptan itibaren ise sınır ihlalleri başlayarak ÜKL ’nin oldukça üzerine çıkmaktadır.

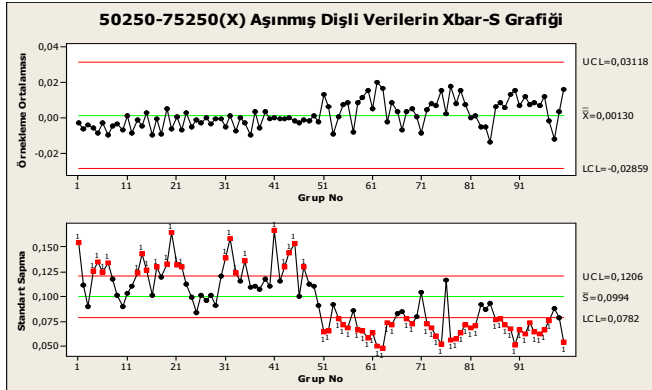


Şekil 14. 50 Nm yük ve 250, 750 d/d motor hızları durumunda aşınmış dişli verilerinin \bar{X} -S grafiği (\bar{X} -S graph obtained from worn gears for 50 Nm load and 250-500 rpm motor speeds)

250 d/d hızla dönen aşınmış dişlinin 50 N/m ve 75 N/m yüklemeye durumlarında toplanan titreşim verileri ile oluşturulan \bar{X} -S grafiği Şekil 15’deki gibidir. Grafiklerde ilk 50 grup 50 N/m, ikinci 50 grupta 75 N/m için titreşim kontrol verilerini göstermektedir.

Grafikte 50 Nm ve 75 Nm yükleri ve 250 d/d motor hızı için, örnekleme ortalamasının 0.0013 ve standart sapma değerinin 0.0994 olduğu görülmektedir. Örnekleme ortalaması grafiğine bakıldığında, ilk 50 grupta görülen verilerin normal olmayan bir şekilde dağılıma sahip olduğu ve merkez çizginin altında daha yoğun bir şekilde bulunduğu, 51. gruptan itibaren ise verilerin

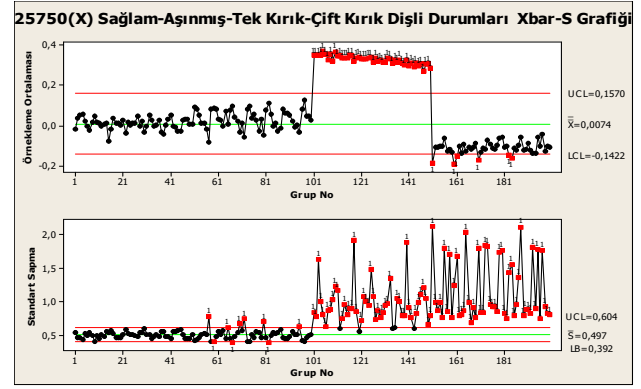
kontrol sınırlarına doğru giderek yakınsadığı görülmektedir. Standart sapma grafiğinde ise ilk 50 grupta görülen verilerin bir kısmının ÜKL 'yi geçerek sınır ihlali yaptığı, 51. gruptan sonra verilerin büyük bir kısmının AKL 'yi geçerek sınır ihlali yaptığı görülmektedir.



Şekil 15. 250 d/d motor hızı ve 50 Nm-75 Nm yüklemelerde aşınmış dişli verilerinin \bar{X} -S Grafiği (\bar{X} -S graph obtained from worn gears for 250 rpm motor speed and 50Nm-75Nm loading conditions)

Şekil 16 'da sağlam dişli limit değerleri kullanılarak 25N ve 750 d/d çalışma şartlarındaki sağlam, aşınmış, tek kırık ve çift kırık dişlilerden toplanan titreşim verileriyle oluşturulan \bar{X} -S grafiği görülmektedir. Grafikte ilk 50 grup sağlam durumundaki dişlilerden, 51. grup ile 100. grup arası çevrilen dişlide dişlerin aşındırıldığı durumdaki dişlilerden, 101. grup ile 150. grup arası, çevrilen dişlide 1 adet diş dibinden kırıldığı durumdaki dişlilerden elde edilen titreşim verilerini göstermektedir. Grafikte 25 Nm yük ve 750 d/d motor hızı için, örnekleme ortalamasının 0.0074 ve standart sapma değerinin 0.497 olduğu görülmektedir. Ortalama ve standart sapma grafiğinde, ilk 50 grupta titreşim verilerinin merkez çizgi etrafında inişli-çıkışlı bir davranış sergilediği, kontrol sınırlarını aşma gibi anormal bir sürecin kendini göstermediği görülmektedir. 51. grup ile 100. grup arası verilerin, sağlam durumdaki dişli verilerine göre, ortalama ve standart sapma değerlerinde çok büyük bir artış olduğu ve sınır ihlallerinin başladığı görülmektedir. 101. grup ile 150. grup arası kırık dişli verilerinin aşınmış dişli verilerine göre, ortalama ve standart sapma değerlerinde çok büyük bir artış olduğu ve sınır ihlallerinin sürekli bir hal alarak değerlerin ÜKL 'nin üstüne çıktığı görülmektedir. 151. grup ile 200. grup arası verilerin örnekleme ortalaması değerleri anormal bir eğilim izlemekte ve sınır ihlalleri olmaktadır. Standart sapma grafiğinde ise ani artışların ve sınır ihlallerinin sürekli bir hal

aldığı ve bütün verilerin ÜKL 'nin üstüne çıktığı görülmektedir.



Şekil 16. 25 Nm yük ve 750 d/d motor hızı için sağlam, aşınmış, tek kırık, çift kırık dişli verilerinin \bar{X} -S karşılaştırma grafiği (Comparison \bar{X} -S graphs of test data received from good, worn, one tooth broken pinion gear, one tooth broken from each pinion and wheel gear for 25Nm load and 750 rpm motor speed)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, çeşitli tipte hasara sahip olan düz dişlilerin, farklı çalışma şartları esnasında elde edilen titreşimlerdeki değişimler irdelenmiştir. Dişlilerde oluşan aşınma, kırılma gibi hasarlar titreşim analizi yöntemi ve istatistiksel proses kontrol metodu ile analiz edilerek teşhis edilebilmiştir. Bu amaçla, kapalı devre dişli test düzeneği kurulmuştur. İlk önce hasarlı olmayan sağlam dişlilerin düzeneğe takılması ve daha sonra da hasarlı dişlilerin düzeneğe takılması ile sistem çalıştırılmış ve farklı yüklemeler ve motor devir sayısı durumları için titreşim değerleri kaydedilmiştir. Ölçülen titreşim değerleri, titreşim analizi yöntemi kullanılarak referans spektrumları ve kusurlu dişlilerden elde edilen spektrumlar elde edilmiştir. Bu spektrumlar incelendiğinde, kusurlu dişliler için spektrumlardaki kusur frekansları ve bu frekanslarda titreşim genliklerindeki artışlar gözlemlenmiştir.

Daha sonra istatistiksel proses kontrol yöntemi kullanılarak sağlam dişlilerden elde edilen verilerle kontrol grafikleri oluşturulmuş ve bu şekilde referans olarak kullanılacak olan alt ve üst kontrol sınırı değerleri tespit edilmiştir. İstatistiksel proses kontrol grafiklerinden, sağlam durumdaki dişli verilerine kıyasla, aşınma ve kırık hasarları durumlarında titreşim genlik değerlerinde ve bunun yanı sıra örnekleme ortalaması ve standart sapma değerlerinde artış olduğu, sınır ihlallerinin başladığı

görülebilir. Yani hatanın derecesi arttıkça ortalama ve standart sapma grafiklerindeki titreşim verilerinin anormal bir davranış sergilediği ve ÜKL veya AKL' nin dışına çıkmaya başladığı tespit edilmiştir.

Aşınmış dişliler için elde edilen istatistiksel \bar{X} ve S kontrol grafiklerine bakıldığında; sabit yükleme durumunda, motor devir sayısındaki artışla beraber örnekleme ortalaması ve standart sapma değerlerinde de artış olduğu, ayrıca aynı devir sayısındaki çalışma koşullarında yükleme miktarının artırılması ile beraber, yine örnekleme ortalaması ve standart sapma değerlerinde artış olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca kırık dişliler için de çalışma şartlarındaki değişime bağlı olarak benzer bir sonuç alınacağı öngörülmektedir. Kontrol grafikleri(özellikle standart sapma) dişlilerde oluşan hasarların türüne bağlı olarak farklı bir davranış sergilemekte ve bu grafiklerden hatanın türü ve mertebesi de anlaşılabilir. Fakat spektrumlara bakılarak sağlam dişli-aşınmış dişli ayırımı ve tek kırık dişli-çift kırık dişli ayırımı tam olarak yapılamamaktadır. Sonuç olarak, düz dişlilerde oluşan aşınma ve kırık hasarları istatistiksel proses kontrol metodu ile tespit edilebilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Fakhfakh, F. Chaari and M. Haddar, “Numerical and experimental analysis of a gear system with teeth defects”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, no. 5-6, pp. 542-550, 2005.
- [2] S. Ai and H. Li, “Gear fault detection based on ensemble empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform”, *5th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2008, pp. 173-177.
- [3] H. Öztürk, İ. Yeşilyurt ve M. Sabuncu, “Dişli çark oyukçuk arızasının titreşim analizi ile tespiti”, *Makine Teknolojileri Dergisi*, Aralık, pp. 72-79, 2005.
- [4] N. Baydar and A. Ball, “A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 15, no. 6, pp. 1091-1107, 2001.
- [5] C. Park and J.M. Lee, “Experimental investigation of the effect of lead errors on helical gear and bearing vibration transmission characteristics”, *KSME International Journal*, vol. 16, no. 11, pp. 1395-1403, 2002.
- [6] S.J. Loutridis, “Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition”, *Engineering Structures*, vol. 26, no. 12, pp. 1833-1841, 2004.
- [7] W. Wang, “Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 15, no. 5, pp. 887-903, 2001.
- [8] A. Parey and N. Tandon, “Impact velocity modelling and signal processing of spur gear vibration for the estimation of defect size”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 1, pp. 234-243, 2007.
- [9] C.K. Sung, H.M. Tai and C.W. Chen, “Locating defect of a gear system by the technique of wavelet transform”, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 35, no. 8, pp. 1169-1182, 2000.
- [10] M. Amabili and A. Fregolent, “A method to identify modal parameters and gear errors by vibrations of a spur gear pair”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 214, no. 2, pp. 339-357, 1998.
- [11] F.A. Andrade, L.L. Esat, and M.M. Badi, “Gear condition monitoring by a new application of the Kolmogorov-Smirnov test”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 215, no. 6, pp. 653-661, 2001.
- [12] B. Birgören, ve B. Koçer, “İstatistiksel proses kontrol çizelgelerinde hata teşhisine yönelik yaklaşımlar”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt. 17, no. 4, pp. 59-69, 2004.
- [13] Y. Zhan, V. Makis and A.K.S. Jardine, “Adaptive state detection of gearbox under varying load conditions based on parametric modelling”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 1, pp. 188-221, 2006.
- [14] W.Q.Wang, F. Ismail and M.F. Golnaraghi, “Assessment of gear damage monitoring techniques using vibrations measurements”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 15, no. 5, pp. 905-922, 2001.

- [15] F. Djeddou and R. Zegadi, “Practical statistical methods for predicting life reliability of fine pitch gear pairs”, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 2, no. 3, pp. 494-500, 2007.
- [16] S. Yimin and C.K. Mechefske, “Gearbox vibration monitoring using extended kalman filters and hypothesis tests”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 325, no. 3, pp. 629–648, 2009.
- [17] S. Orhan, ve N. Aktürk "Aktarma organı dişlilerinde oluşan fiziksel hataların titreşim analizi ile belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt. 18, no. 3, pp. 97-106, 2003.
- [18] J.I. Taylor, *The Vibration Analysis Handbook*, Vibration Consultant Inc., Florida, 1994.
- [19] M. Örümlü, “Üretim sürecinde istatistiksel proses kontrol ve işletme uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [20] D.C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2013.