

Kriyojenik ve Temperleme İşlemi Uygulanmış AISI 4140 Çeliğinden İmal Edilen Millerin Yuvarlanmalı Yataklarda Çalışma Kararlılığının Deneysel İncelenmesi

*¹Menderes KAM and ²Hamit SARUHAN

*¹Cumayeri Vocational School, Mechanical Division, Düzce University, Turkey

²Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Düzce University, Turkey

Özet

Dönen makine sistemleri miller, yuvarlanmalı yataklar ve diskler olmak üzere çeşitli mekanik bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin kullanıldığı makine sistemlerinin çalışma kararlılıklarının belirlenmesinde en önemli ve ayrıntılı verilerin elde edilmesi titreşim analizi ile yapılabilmektedir. Bu sistemlerin kararlılığı için titreşimlerin azaltılması uygun malzeme seçimi ve malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile yapılmaktadır. Bu çalışmada; makine ve otomotiv endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahip AISI 4140 (42CrMo4) çeliğinden imal edilmiş kriyojenik ve temperleme işlemi uygulanmış millerin çalışma kararlılığı deneysel olarak incelenmiştir. Bu bağlamda, aynı yüklemeye ve çalışma şartlarında yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiş uç kısmına fan takılmış millerin çalışma kararlılığının incelenmesi için titreşim analizleri karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Sonuçlar, kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi uygulanmış millerin çalışma kararlılığında anlamlı farklılıklar olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Mil, AISI 4140, kriyojenik işlem, yuvarlanmalı yatak, titreşim analizi

Experimental Analysis for Stability of Cryogenic and Tempering Treated Shafts (AISI 4140) Supported By Rolling Element Bearings

Abstract

Rotating machinery systems are composed of various components, such as shafts, disks, and rolling element bearings. The most important and comprehensive data for determining the dynamic behavior of these mechanical elements used in machine systems can be obtained and utilized by the vibration analysis. One way to increase operational reliability of the systems is to use proper materials. For shaft supported by rolling element bearing since breakdowns in the systems are due to failure of the shaft materials. In this experimental work, AISI 4140 steel (42CrMo4) materials used widespread in the rotating machinery and automotive industry is studied. The effects of cryogenic treatment on the dynamic behavior of shafts were investigated. In this context, stability analysis of cryogenic treated and tempering shafts supported by rolling element bearing for same running speeds and load levels were experimentally studied, analyzed, and compared. The results showed that working stability of cryogenic treated and tempering shafts differs significantly.

Key words: Shaft, AISI 4140, cryogenic treatment, rolling element bearing, vibration analysis

1. Giriş (Introduction)

Dönen makine sistemleri endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde titreşimlerin tamamen giderilebilmesi mümkün olmamakla birlikte, tasarım ve geliştirme aşamasında alınacak önlemlerle azaltılması mümkündür [1]. Makine sistemlerinden beklenen en önemli özellik öngörülen çalışma ömrü boyunca sorunsuz olarak işlevini yerine getirmeleridir. Bu durum sistemde kullanılan makine elemanlarının malzemelerinin uygun seçilmiş olmasıyla ve malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesiyle doğrudan ilişkilidir [2-3]. Makine sistemlerinin dinamik performanslarının takibi ve sorunların tespiti için sistemin dinamik davranışını karakterize eden, en önemli ve ayrıntılı veriler sunan titreşim karakteristikleridir. Titreşim analizi; dönen makine sistemlerinin işletme şartlarındaki performansları, oluşan mekanik sorunlar ve mekanik sistemler hakkında bilgi edinmek için kullanılan oldukça yaygın bir tekniktir [4-5].

Makine sistemlerinin mekanik bileşenlerinden olan miller, endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. Millerin imalatında yaygın olarak kullanılan ıslah çelikleri; kimyasal bileşimindeki karbon miktarı bakımından, sertleştirilmeye elverişli ve ıslah işlemi sonunda çekme dayanımında yüksek tokluk özelliği gösteren çeliklerdir [2]. Makine ve otomotiv sanayisinde kullanılan ıslah çeliklerinin en yaygın kullanım alanına sahip olan çelik türü AISI 4140 (42CrMo4) çeliğidir. Bu çelik malzeme ısıtılı işlemler sonrasında kazandığı üstün mekanik özelliklerinden dolayı endüstride çeşitli makine ve motor parçaları, uçak parçaları, krank mili, aks mili, fan mili, dişli-mil bileşenleri imalatında [6-7] ve soğuk çekme mil, yaylar, türbin motorları, turbo jeneratörleri, fren halka ve kolları, demir yol tekerlekleri ve milleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Çelik malzemeye doğru bir ısıtılı işlemle çok çeşitli özellikler kazandırmak mümkündür. Genellikle mekanik özelliklerini iyileştirmek için geleneksel ısıtılı işlem, kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi uygulanmaktadır. Bu bağlamda, soğuk (sıfır altı) işlem yöntemi olan kriyojenik işlem; son yıllarda çelik malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan geleneksel ısıtılı işlemi tamamlayıcı bir işlemdir. Kriyojenik işlemde malzeme belirlenen bir bekletme süresince belirlenen sıcaklıkta tutulur ve sonra da kademeli olarak oda sıcaklığına kadar ısıtılır. Düşük sıcaklıklarda genellikle $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında derin kriyojenik işlem ile yapının tamamının martenzite dönüştürülmesi sağlanır. Bu sayede sertlikten feragat etmeden tokluğu arttırmakta mümkün olur [9-10]. Senthikumar ve ark. (2011), AISI 4140 çeliğine derin kriyojenik işlem ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat) uygulamışlar ve kalıntı gerilme durumu üzerine kriyojenik işlemin etkisini incelemişlerdir. Kriyojenik işlem sıcaklığındaki azalma daha fazla östenitin martenzite dönüşmesine yol açmıştır. Bundan dolayı temperlenmemiş kriyojenik işlem numunesinde daha büyük basma kalıntı gerilmelerinin oluştuğu yönünde sonuç bulunmuştur [11].

Literatürde çoğu araştırmacı kriyojenik işlemin malzemelerin mekanik özelliklerine etkilerini incelemek üzere; geleneksel ısıtılı işlem sonrası malzemelere farklı bekletme sürelerinde kriyojenik işlem uygulamışlar ve kriyojenik işlemin malzemelerin mekanik özelliklerinde önemli gelişmeler gösterdiğini tespit etmişlerdir [9-13].

Literatürde mil-yatak sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde; 1960'lı yıllarda birçok araştırmacı Tamura ve Shimizu (1967), Gupta ve ark. (1977), Meyer ve ark. (1980), Yamamoto ve ark. (1974), McFadden ve Smith (1984) gibi titreşim karakteristikleri üzerinde çok sayıda eser vermişlerdir [14-18].

Aktürk ve ark. (1997), yuvarlanmalı yatak destekli mil sisteminde eksenel ve radyal titreşimleri incelemek için matematiksel model oluşturmuşlardır [19]. Tiwari ve ark. (2000) bir milin doğrusal olmayan davranışlarını incelemişler [20]. Dai ve ark. (2002) ise bir milin dinamik davranışlarını analiz etmişlerdir [21]. Taplak ve Uzmay (2004) yaptıkları çalışmada, dönen mekanik sistemlerin dinamik davranışının analizini gerçekleştirmek için bir düz bağlantılı mil sistemi imal ederek çeşitli işletme şartları için sistemi, titreşim parametreleri yönünden araştırmışlardır [22]. Karahan (2005), yapmış olduğu çalışmada titreşim analizi ile makinelerde arıza teşhisini analiz etmişlerdir [23]. Whalley ve Abdul-Ameer (2009), bir mil-yatak sisteminin kritik hızını, dönme frekansını ve rezonansını hesaplamışlardır [24]. Öztürk ve Karabulut (2012), tek silindirik dört zamanlı bir dizel motorun piston, biyel, krank ve bloğunun dinamik modelini oluşturarak krank milinin çevrimlik açısal hız değişimleri ve bloğun titreşimlerini incelemiştir [25]. Kumar ve ark. (2012), dönen makine sistemlerinde dengesizlik (balanssızlık) arızası için hazırladıkları bir mil üzerinde, mil dengesizlik durumunda ve normal durumda iken beş farklı hızda çalıştırarak deneysel çalışma yapmışlardır. Yüksek titreşim değerlerinin nedenlerini belirlemek için spektrum analizi ve faz analizi yapmışlar ve karşılaştırmışlardır [26]. Taplak ve ark. (2013), çalışmalarında mil-yatak sistemini incelemişlerdir. Sistemin düşey yönde deneysel titreşim analizleri uygulayarak ve spektrum izleme grafiklerini titreşim kaynağını teşhis etmek için kullanmışlardır. Her yataktan elde ettikleri titreşim değerleri, titreşim kaynaklarının mekanik gevşeklik ve kaymadan kaynaklandığını göstermiştir [27]. Nembhard ve ark. (2015), mil ile ilgili hatalar için mil orbit (yörünge) tepkisi üzerinde deneysel çalışma yapmış ve çalışma ile pratik mil arıza teşhisi için yararlı sonuçların yanı sıra görülen mil arızaları ile ilgili analitik çalışmalara kaliteli bilgi sağladığı yönünde sonuç elde etmiştir [28]. Kam ve Saruhan (2016), kriyojenik işlem görmüş millerin titreşim analizlerini deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir [29].

Literatürde mil-yatak sistemleri ilgili birçok bilimsel çalışma yapılmış ve günümüzde de bilimsel çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Bu sistemlerin dinamik davranışlarının deneysel olarak incelenmesi üzerine çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen herkes tarafından kabul görmüş standart bir deney metodu yoktur. Genellikle her araştırmacı kendi amacı için deney düzeneğini tasarlamış ve kullanmıştır.

Literatürde kriyojenik işlem uygulanmış millerin çalışma kararlılığı üzerine çalışma yapılmadığı görülmektedir. Literatüre katkı sağlamak amacıyla, bu çalışmada aynı yükleme ve çalışma şartlarında uç kısmına fan takılmış kriyojenik işlem uygulanmış ve kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi uygulanmış millerin çalışma kararlılığı incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metod (Materials and Method)

Bu çalışmada kullanılan AISI 4140 (42CrMo4) ıslah çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Deney için AISI 4140 çeliği malzemeden imal edilmiş 25,4 mm çapında ve 320 mm uzunluğunda miller hazırlanmıştır.

Tablo 1. AISI 4140 Çeliğinin Kimyasal Bileşimi

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
(%)	0,39	0,27	0,74	0,008	0,01	1,06	0,2	0,03

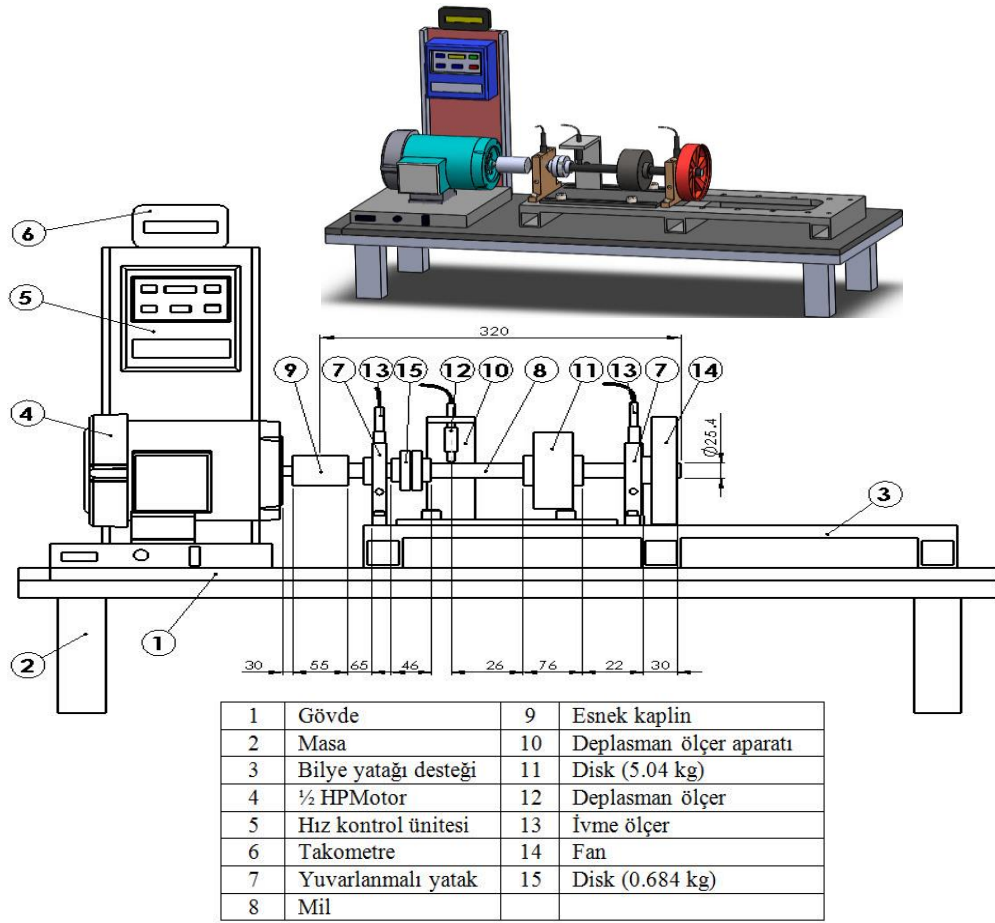
Bu millerden, ilk mil ısıt işlemsiz (Raw Material - RM) olarak kullanılmıştır. İkinci mile ise geleneksel ısıt işlem (Conventional Heat Treatment - CHT) uygulanmıştır. Geleneksel ısıt işlem için ilk olarak atmosfer kontrollü fırında 420 °C sıcaklığa 30 dakika ısıtılarak ön ısıtma, 850 °C sıcaklığa 30 dakika ısıtılarak östenitleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 70 °C sıcaklıktaki yağda 20 °C sıcaklığa soğutularak yağda su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Soğutma hızının en verimli olduğu yağ sıcaklığı 50 °C ile 80 °C arasında olduğundan (Kara 2014), bu çalışmada sertleştirme işleminde yağın sıcaklığı 70 °C olarak alınmıştır Yağda su verme işlemi ile sertleştirilen millere 320 °C sıcaklıkta 2 saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Geleneksel ısıt işlem uygulanan üçüncü ve dördüncü mile, ısıt işlemi tamamlayıcı bir işlem olan derin kriyojenik işlem (Deep Cryogenic Treatment - DCT24) -140 °C' de 24 saat süre uygulanmıştır. Derin kriyojenik işlem sonrasında dördüncü mile ise 200 °C'de temperleme işlemi (Deep Cryogenic Treatment and Tempering - DCTT24) uygulanmıştır.

Tablo 2. AISI 4140 Çeliğinden İmal Edilen Millerin Isıl İşlem Prosesi

No	Mil kodu	Uygulanan Isıl İşlemler		
1	RM	-	-	-
2	CHT	Geleneksel Isıl İşlem	-	-
3	DCT24	Geleneksel Isıl İşlem	Kriyojenik İşlem (-140 °C 24 saat)	-
4	DCTT24	Geleneksel Isıl İşlem	Kriyojenik İşlem (-140 °C 24 saat)	Temperleme (200 °C)

Tablo 2' de verilen 4 (dört) farklı mil kullanılarak Şekil 1'de verilen deney düzeneği oluşturulmuştur. İlk deney serisi için RM mil, ikinci deney serisi için CHT mil, üçüncü deney serisi için DCT24 mil ve dördüncü deney serisi için ise DCTT24 mil kullanılmıştır. Titreşim genliğini artırmak için 126,25 mm çapında 5040 gr ağırlığında ve 65 mm çapında 684 gr ağırlığında diskler kullanılmıştır. VibraQuestTM yazılım ve donanım sistemi kullanılarak veriler toplanmıştır.

Şekil 1'de gösterilen deney düzeneğinde aynı yükleme ve çalışma şartlarında yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiş uç kısmına fan takılmış millerin titreşim verileri toplanmış ve veriler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği ve şematik gösterimi

3 Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Şekil 2’de milin kritik devrinin belirlenmesi için Bode eğrisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi düşey doğrultuda (Ch1) RM mili için maksimum titreşim genliği 2830.2 rpm (dakikadaki devir sayısı) 0.106 mil (1 mil=0.0254 mm), CHT mili 2095.42 rpm’de 0.215 mil, DCT24 mili 2317.1 rpm’de 0.196 mil ve DCTT24 mili ise 2959.1 rpm’de 0.116 mil olarak bulunmuştur. Yatay doğrultuda (Ch2) ise RM mili için maksimum titreşim genliği 2817.06 rpm’de 0.107 mil, CHT mili 2315.0 rpm’de 0.219 mil, DCT24 mili 2931.1 rpm’de 0.198 mil ve DCTT24 mil ise 590.0 rpm’de 0.109 mil olarak bulunmuştur. Miller kıyaslandığında düşey ve yatay doğrultuda DCTT24 milin CHT ve DCT24 millere göre titreşim genliği daha düşük değerde olduğu görülmektedir.

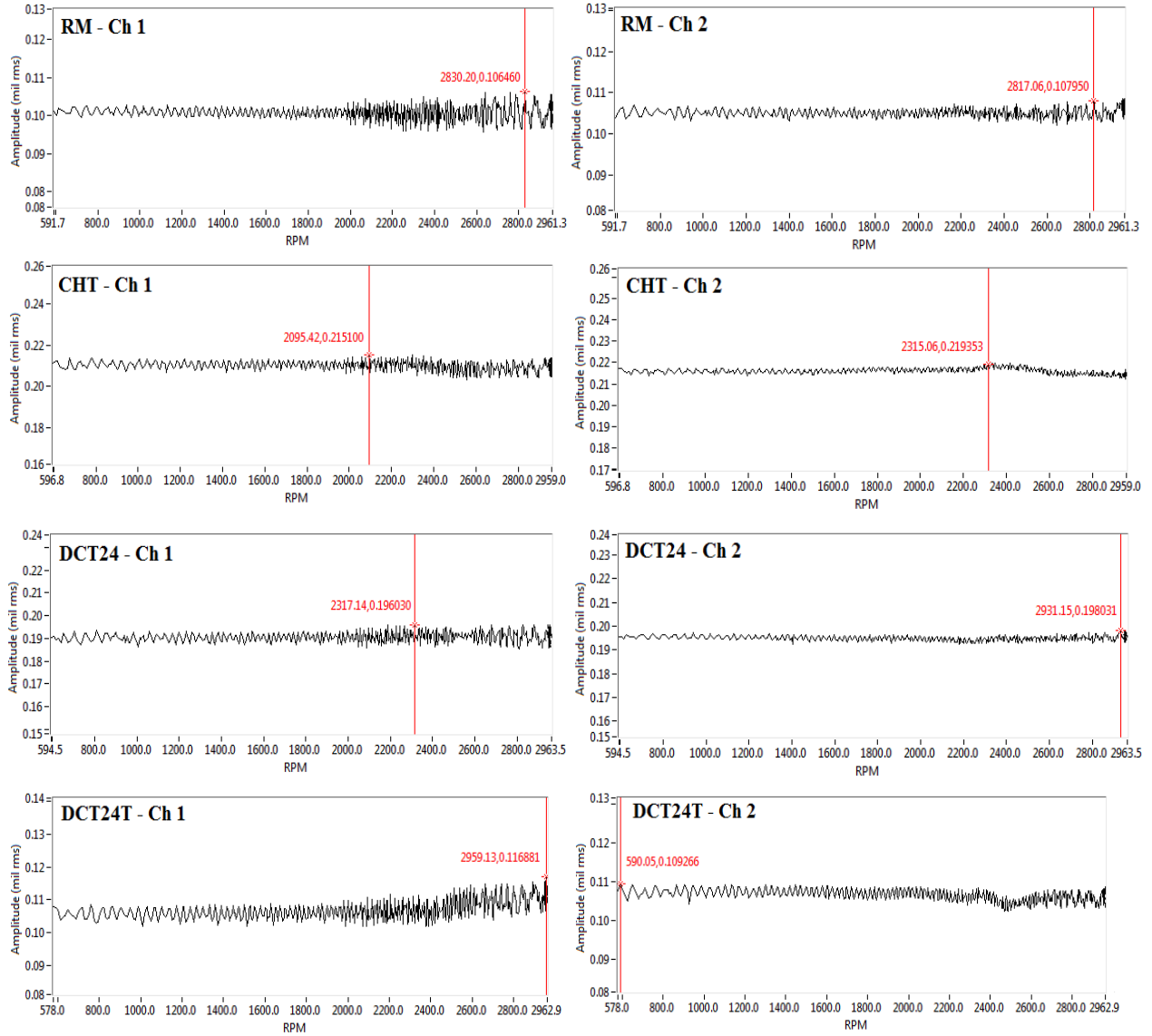
Şekil 3’de deplasman ölçer (proxy probe) sensörleri ile miller için elde edilen şelale (waterfall) titreşim spektrumları verilmiştir. Miller için düşey (Ch1) ve yatay (Ch2) doğrultuda 0-250 Hz frekans aralığında çalışma hızlarının durma (0 rpm) durumundan 3000 rpm’e yükselerek tekrar durma noktasına gelmesi sırasında yakalanan titreşim spektrumu verileri karşılaştırıldığında DCTT24 milin DCT ve DCT24 millerine göre daha az rezonansa girdiği görülmektedir.

Motora yakın yatak yuvası için düşey doğrultuda (Ch1) ve yatay doğrultuda (Ch2) kullanılırken motordan uzak yatak yuvası için düşey doğrultuda (Ch3) ve yatay doğrultuda (Ch4) kullanılmıştır. Kanallara bağlı ivme ölçerler aracılığıyla mil çalışma hızı 10, 20, 30, 40, 50 Hz

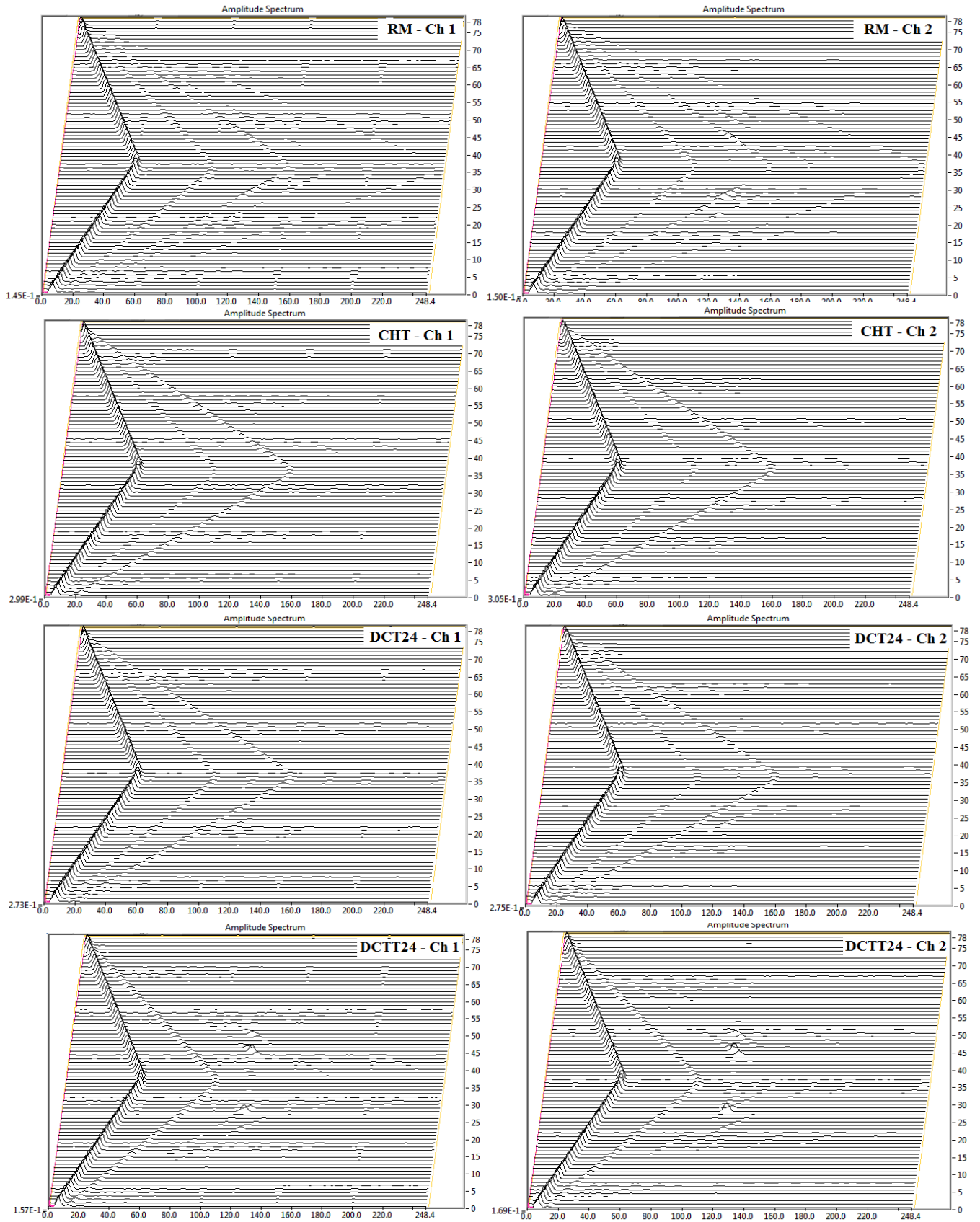
için veriler toplanmıştır. En kritik verilerin toplandığı 50 Hz olduğu için kıyaslama referansı olarak alınmıştır.

Şekil 4'te bir grafikte dört kanal alttan sırasıyla Ch1, Ch2, Ch3 ve Ch4 olmak üzere mil çalışma hızı 50 Hz için toplanan titreşim verileri 0-5 khz aralığında sunulmuştur. DCTT24 milde oluşan titreşim CHT ve DCTT24 millerine göre belirgin bir şekilde daha kararlı olduğu görülmektedir.

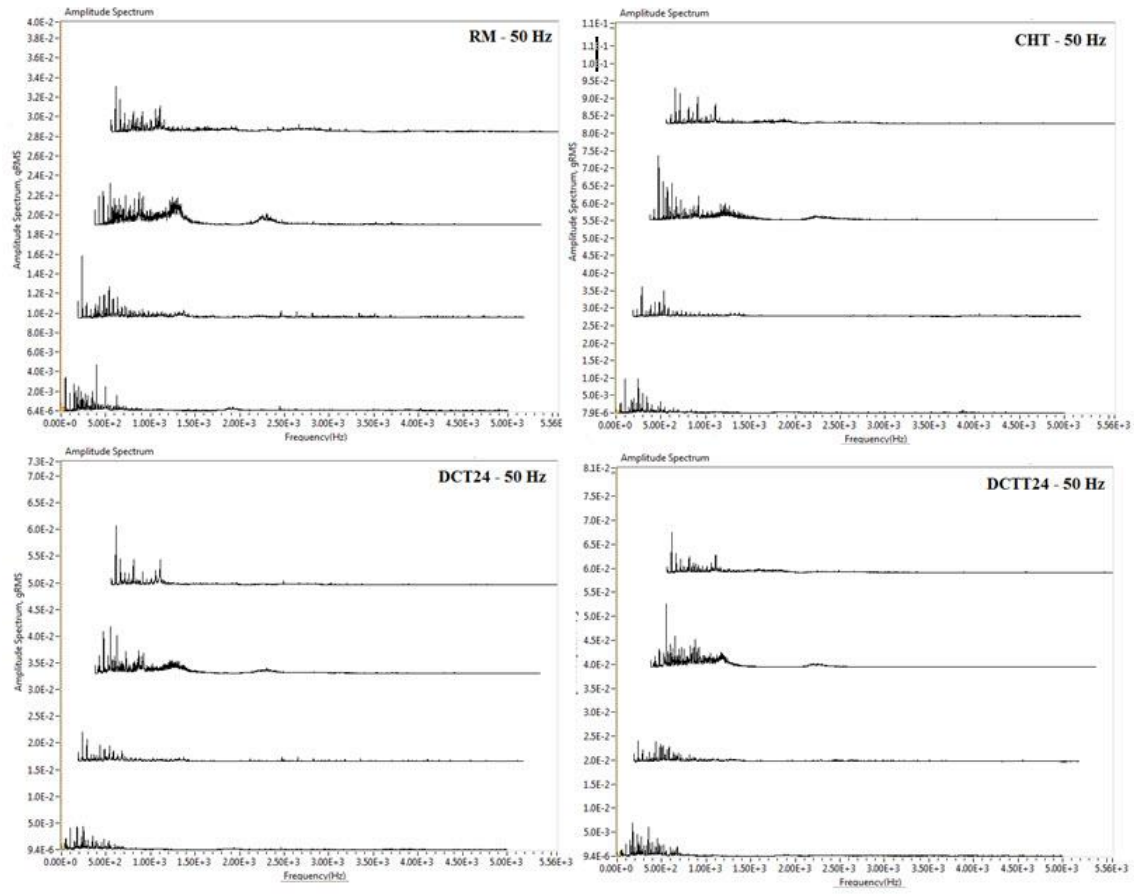
Şekil 5'de milin izlediği yörünge (orbit) verilmiştir. Bode eğrilerinde millerin maksimum titreşim genliğinin oluştuğu devirlere denk gelen orbit titreşim spektrumu grafikleri elde edilmiştir. Yörünge analizi ile düşey (Ch1) ve yatay (Ch2) doğrultuda mil eksen çizgisinin hareketi yörüngesel olarak elde edilmiştir. Yörünge üzerindeki nokta milin salınım dalgasının başlangıç noktası olarak kaydedilmiştir. DCTT24 mile ait yörünge CHT ve DCTT24 millerin hareket yörüngesine göre salınımı daha az olduğu görülmektedir.



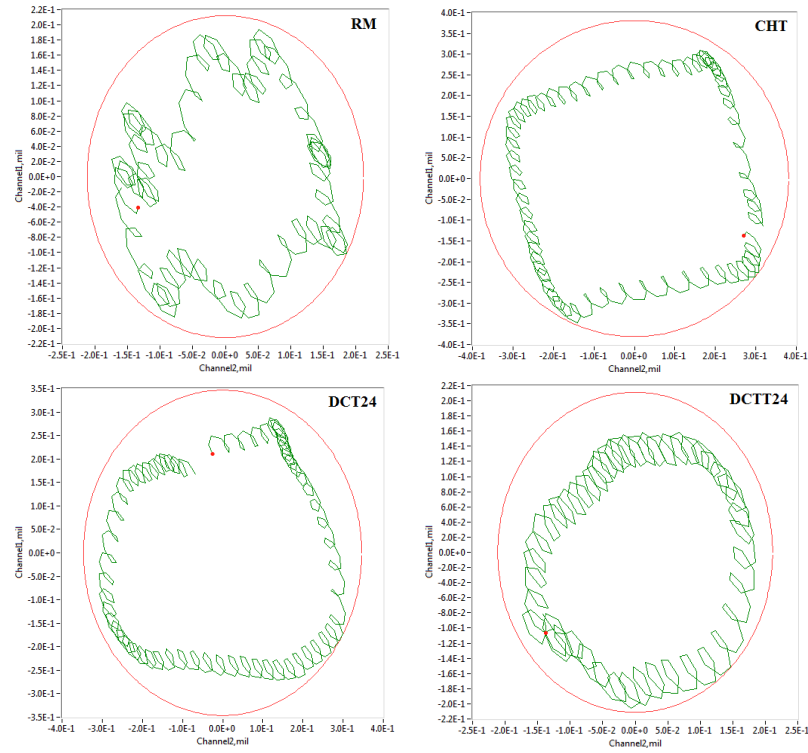
Şekil 2. Bode Eğrisi



Şekil 3. Şelale (waterfall) titreşim spektrumu



Şekil 4. Yataklardan alınan 4 kanal veriler (50 Hz)



Şekil 5. Yörünge (orbit) titreşim spektrumu

4. Sonuçlar (Conclusions)

Döner makine sistemlerinde, önemli parçalardan olan miller sistemlerin dinamik davranışı için hayati rolleri vardır. Makine sistemlerinde yaygın olarak kullanım alanına sahip AISI 4140 çeliğinden imal edilmiş millerin ısılsı işlemsiz (RM), geleneksel ısılsı işlem uygulanmış (CHT), geleneksel ısılsı işlemi tamamlayıcı bir işlem olan derin kriyojenik işlem (DCT24) -140 °C'de 24 saat uygulanmış ve derin kriyojenik işlem sonrasında 200 °C'de temperleme işlemi (DCTT24) uygulanmış durumlarda çalışma kararlılıklarının incelenmesi deneysel olarak yapılmıştır. Deneysel sonuçlarından DCTT24 milin CHT ve DCT24 millere göre titreşim genliğı daha düşük değerde olduğu, daha az salınım yaptığı ve dolayısıyla daha az rezonansa girdiğı görölmüştür. Bunun nedeninin DCTT24 milinde sönümlenme katılığının etkisi olduğu tahmin edilmektedir.

Bilgi (Acknowledgements)

Bu alışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP- 2015.06.05.351) kapsamında yapılmıştır.

Kaynaklar (References)

1. Karabulut, H., Öztürk, E., ınar, C. Dynamic modeling and investigation of vibrations of a single cylinder four-stroke diesel engine. J. Fac. Eng. Arch. 2011;26(1):173-183.
2. İkinci, Ş. ve Akdemir, A. Nitrörlenmiş AISI 4140 eliğine uygulanan yükün aşınma hızına etkisi. Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi 2011; 10(1):39.
3. Kam, M. Saruhan, H. ve Kara, F. Isılsı işlem görmüş millerin dinamik davranışlarının deneysel analizi. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi 2016; 5(1):80-90.
4. Jardine, A. K., Lin, D. and Banjevic, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical systems and signal processing 2006; 20(7):1483-1510.
5. Kılınc, S. ve Saruhan, H. Kaymalı ve yuvarlanmalı yataklarda mil kritik hız analizi. 6.Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi; 2013:209-218.
6. Chalmers R.E. The friction welding advantage. Manuf Eng.2001; 126:64–65.
7. Pekgöz, B., Sarıdemir, S., Uygur, İ. ve Aslan, Y., Sementasyon işleminin farklı çeliklerin mikroyapı ve sertlik değerlerine etkileri. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi; 2013:10(1), 19-24.
8. Höke, G., Şahin, İ., Henifi, . ve Fındık, T. Kriyojenik işlemin SAE 4140 eliğın mekanik özellikleri üzerine etkisi. Teknik-Online Dergi2014; 13(2):25-37.
9. Senthilkumar, D., Rajendran I. Optimization of deep cryogenic treatment to reduce wear loss of 4140 steel", Mater. Manuf. Process. 2012; 27(5):567-572.
10. Kara, F. AISI 52100 eliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük; 2014.

11. Senthilkumar, D., Rajendran, I., Pellizzari, M. and Siirainen, J. Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel. *J. Mater. Process. Technol.* 2011; 211(3):396-401.
12. Zhirafar, S. M. Sc. Thesis, Concordia University, Montreal; 2005.
13. Çiçek, A., Kara, F., Kıvak, T., Ekici, E., & Uygur, I. Effects of deep cryogenic treatment on the wear resistance and mechanical properties of AISI H13 hot-work tool steel. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2015;24(11):4431-4439.
14. Tamura, H., Shimizu, H. Vibration of rotor based on ball bearing. *Bull. of JSME*1967; 10(41).
15. Gupta, P.K., Winn, L.W. ve Wilcock, D.F. Vibration characteristics of ball bearings. *Trans. ASME J. of Lubrication Technol.*1977; 284-289.
16. Meyer, L.D. Ahlgren, F. F., Weichbrodt, B. An analytical model for ball bearing vibrations to predict vibration response to distributed defects. *Trans. ASME J. Mechanical Design* 1980; 102:205-210.
17. Yamamoto, T.,Ishida, Y. The particular vibration phenomena due to ball bearings at the major critical speeds. *Bull. of JSME*;1974; 17(103):59-67.
18. Mcfadden, P.D. ve Smith, J.D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. *J. of Sound and Vibration*, 1984; 96(1):69
19. Aktürk, N., Uneeb, M. and Gohar, R.. The effects of number of balls and preload on vibrations associated with ball bearings. *Journal of Tribology* 1997; 119:747-753.
20. Tiwari, M., Gupta, K., Prakash, O. Effect of radial internal clearance of a ball bearing on the dynamics of a balanced horizontal rotor, *J. Sound Vib.* 2000;238:723-756.
21. Dai,X., Jin, Z., Zhang, X. Dynamic behavior of the full rotor/stop rubbing: numerical simulation and experimental verification, *J. Vib.* 2002; 251:807–822.
22. Taplak, H. Uzman, İ. Titreşim parametrelerinin dönen mekanik sistem dinamiğine etkilerinin araştırılması, *Teknoloji Dergisi* 2004; 7(3):427-434.
23. Karahan M. F., 2005. Titreşim analiziyle makinalarda arıza teşhisi. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
24. Whalley, R., Abdul-Ameer A. Contoured shaft and rotor dynamics. *Mechanism and Machine Theory* 2009;44(4):772–783.
25. Öztürk, E., Karabulut, H. Tek silindirli bir dizel motorun dinamik ve titreşim analizleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2012; 27(3).
26. Kumar, B. K., Diwakar, G., & Satynarayana, M. R. S.Determination of unbalance in rotating machine using vibration signature analysis. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)* 2012; 2(5):3415-3421.
27. Taplak, H., Erkaya, S. and Uzman, I. Experimental analysis on fault detection for a direct coupled rotor-bearing system. *Measurement* 2013; 46(1):336-344.
28. Nembhard, A. D., Sinha, J. K. and Yunusa-Kaltungo, A. Experimental observations in the shaft orbits of relatively flexible machines with different rotor related faults. *Measurement* 2015; 75:320-337.
29. Kam, M., Saruhan, H. Kriyojenik İşlem Görmüş Millerin Titreşim Analizi. ICETAS2016; ISBN: 978-605-4444-05-02:1207-1213.