



Dönen makinelerdeki dengesizlik (balanssızlık) arızasının titreşim analizi ve faz açısı yardımıyla teşhisi

Veysel Uysal^{1*}, Ömer K. Morgül²

13.06.2014 Geliş/Received, 09.10.2014 Kabul/Accepted

ÖZ

Bu çalışmada, dönen makinelerdeki dengesizlik (balanssızlık) arızalarının genel özellikleri incelenmiştir. Dengesizlik arızasının sınıfları (tipleri) özetlenerek, hangi sınıf dengesizlik arızası olduğu titreşim analizi ile spektrum grafikleri ve faz açıları yardımıyla belirlenmesi rapor edilmiştir. Böylece, elde edilen sonuçlardan titreşim analizinin dengesizlik arızasını belirlemede etkili bir şekilde kullanılabileceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: kestirimci bakım, titreşim, dengesizlik (balanssızlık), faz açısı, makine sağlığı izleme

Diagnosis of unbalance fault in rotating machineries through vibration analysis and phase angle

ABSTRACT

In this study, general properties of unbalance fault in rotating machineries are investigated. Types of unbalance fault are summarized and type of unbalance fault is determined with spectrum graphs obtained by analysis of the vibration and determination with the help of phase angles are reported. Therefore, it is seen that, the results obtained from vibration analysis in determining the unbalance fault it can be used effectively.

Keywords: predictive maintenance, vibration, unbalance, phase angle, machinery health monitoring

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya - uysal.veysel@gmail.com

2 Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya - morgul@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titreşim analizi ile kestirimci bakım uygulaması, dönme hareketi ile iş yapan makinelerin sanayide üretimi aksatmadan görevlerini yapabilmesi için kullanılan bir bakım yöntemidir. Bu bakım yönteminde makinelerin periyodik olarak yapılan ölçümlerdeki titreşim analizleri incelenir. Bu titreşim analizleri yardımıyla, oluşan arızanın sebebi ve hangi seviyede olduğu makineye zarar vermeden belirlenebilir. Elde edilen titreşim değerleri ISO 10816-1 v.b. standartlarda belirtilen veya imalatçı firmanın önerdiği değerlerle karşılaştırılarak arızanın şiddeti ve bakım takvimi belirlenebilir [1,7,8].

T. Belek, endüstriyel tesislerin bakımında modern yaklaşım olarak titreşim ölçüm aletleri ile titreşim sinyallerinden yararlanarak erken uyarıcı dinamik bakım yöntemlerini ele almıştır [1]. S. Orhan, rulmanlarla yataklanmış dönen makine elemanlarında titreşim analizi kullanılarak kestirimci bakım uygulamasını gerçekleştirmiştir [2]. S. Orhan, dönen makinelerde oluşan dengesizlik, eksen kaçıklığı, gevşeklik ve rulman arızalarının genel özellikleri ve bu arızaların sebep oldukları titreşimleri ele almıştır [4]. M.F. Karahan, demir-çelik endüstrisinde kullanılan makinelerde titreşim analizi kullanılarak kestirimci bakım uygulamasını gerçekleştirmiştir [5]. S. Açıklı, sürekli form baskı makinesine yapılan kestirimci bakım uygulamasını incelemiştir. Makine üzerinde önceden belirlenen noktalardan alınan titreşim ölçümleri zaman ve frekans tanım bölgelerinde inceleyerek arıza tespiti ve seviyeleri hakkında kestirim yapmıştır [6]. H. Dal, Ö.K. Morgül, İ. Şahin, titreşim analizi için “Orta Ölçekli Makinaların Titreşim Değerlendirme Standartları ISO-10816” tablosu kullanılarak oluşturulan eğitim setini, Yapay Sinir Ağını (YSA) eğitmek için kullanmıştır. Eğitimden sonra elde edilen çıkış değerleri gerçek tablo değerleriyle karşılaştırılarak, titreşim analizinde kullanılabilirliği saptanmıştır [7]. Y. Uysal, Descaler pompa mili ve rotor elemanlarının titreşim analizlerini yapmıştır. Teorik olarak ve deneysel yolla bu elemanların doğal frekansları bulunmuş, bulunan sonuçlar karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır [9]. B. Kiran Kumar, G. Diwakar, Dr. M. R. S. Satynarayana, döner makinelerdeki dengesizlik arızasını kestirebilmek için hazırladıkları bir rotor üzerinde deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada rotor dengesizlik durumunda ve dengesizlik arızası giderildiği durumda iken beş farklı hızda (devirde) ayrı ayrı çalıştırılarak vibrasyon hızları ölçülmüştür. Yüksek titreşim değerlerinin sebebini belirlemek için spektrum analizi ve faz analizi yapılmıştır. Farklı hızlarda ve farklı dengesizlik kuvvetleri altında yapılan bu ölçümler birbirleriyle karşılaştırılmıştır [10].

Arızalar belirli frekanslarda titreşim ürettikleri için bu frekansların bilinmesi sayesinde arızaların sebebi ve seviyesi belirlenebilir. Dönen makinelerde en sık rastlanan arızalardan bir tanesi dengesizliktir. Makine yataklarından alınan titreşim ölçümleri ile makinedeki dengesizlik arızası, devir sayısı katlarına bağlı olan frekans bilgileri, spektrum grafikleri ve faz açısı yardımıyla belirlenebilir. Statik, moment ve dinamik dengesizlik olarak üç sınıfta ele alınabilir. Hangi sınıf dengesizlik arızası olduğuna makine yataklarından titreşim ölçümleri yapılarak spektrum grafikleri ve faz açıları incelenerek karar verilebilir.

Bu çalışmada ise uygulama çalışması için hazırlanan deney cihazı üzerinde, dengesizlik arızası çeşitleri ayrı ayrı oluşturularak yataklardan alınan titreşim ölçümleri, spektrum analizleri ve faz açıları incelenmiştir. Yataklardan alınan bu ölçümler karşılaştırılarak dengesizliğin hangi sınıfta olduğu teşhis edilmiştir. Sonuç olarak titreşim analizi ve faz açısı yardımıyla bir makinede dengesizlik arızasının ve çeşitlerinin nasıl teşhis edilebileceği formüle edilerek sunulmuştur.

2. MAKİNELERDEKİ DENGESİZLİK ARIZASI

(MACHINERY UNBALANCE FAULT)

Dönen makine elemanlarında dönme ekseninin geometrik merkezi ile ağırlık merkezinin çakışmadığı durumlarda ortaya çıkan soruna dengesizlik (balanssızlık) denir. Teorikte mükemmel dengelenmiş bir makinede titreşim oluşmaz. Fakat pratikte mükemmel olarak dengelenmiş makine olamayacağı için tüm makineler az da olsa dengesizdirler. Dengesizliğin nedenleri elemanlardaki malzemenin homojen olmaması, parçanın geometrik olarak simetrik olmaması, çalışma şartlarında meydana gelen değişimler (aşınma, korozyon, ısıl genleşme, madde birikimi) ve montaj hatalarından olabilir (Şekil 1) [6].

$$F_{deng} = \text{Dengesizlik kuvveti (N)}$$

$$m = \text{Dengesizlik kütlesi (kg)}$$

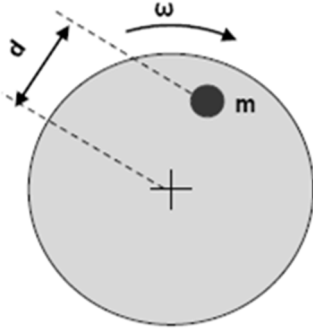
$$d = \text{Dengesizlik kütlesi ile dönme eksenini arasındaki uzaklık (m)}$$

$$\omega = \text{Açısal hız (rad/sn)}$$

$$N = \text{Makinenin dönme devri (d/dk)}$$

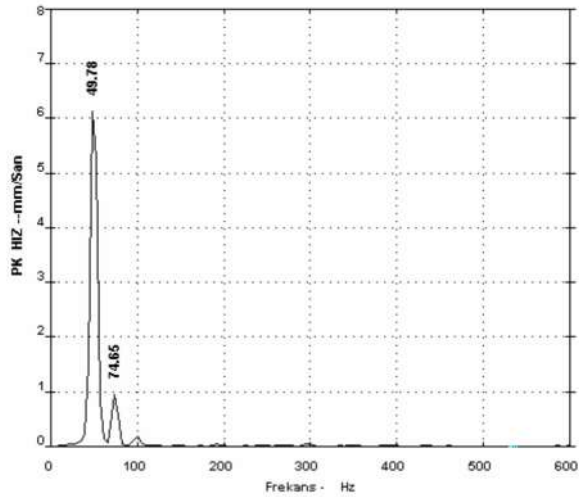
$$\omega = \frac{2\pi \times N}{60} \quad (1)$$

$$F_{deng} = m \times d \times \omega^2 \quad (2)$$

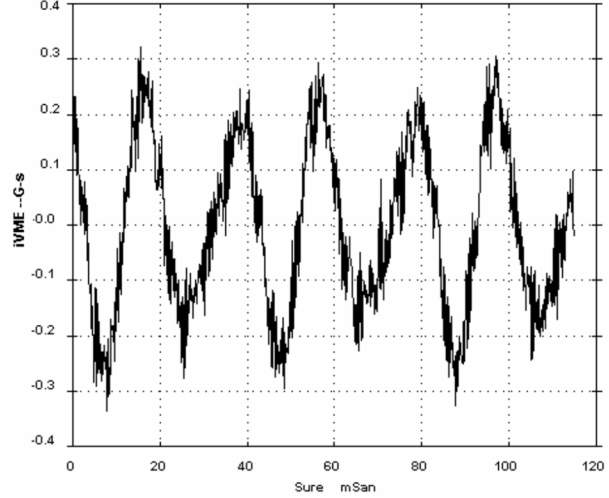


Şekil 1. Dengesizlik kütlelerinin şematik gösterimi (Schematic display of unbalance mass)

Makinelerde dönen elemanlar tarafından oluşturulan tüm kuvvetlerin denge halinde olması gerekir. Bu kuvvetlerdeki herhangi bir değişim sistemde dengesizliği oluşturur. Dengesizlik sonucu oluşan titreşimler, makinelerde görülen en yaygın titreşim şeklidir. Sistemdeki bu dengesizlik, spektrum grafiğinde devir sayısının eş değeri olan frekansta ($1 \times \text{RPM}$) bir tepe oluşturur (Şekil 2). Dalga formu periyodik, basit, vuruntusuz ve sinüs deseni şeklinde Şekil 3'teki gibi oluşur [2, 3, 4]. Ayrıca makinenin yataklarından alınan ölçümlerde aynı yatağın radyal yatay ve radyal dikey ölçümündeki faz farkı yaklaşık olarak $90^\circ (\pm 30^\circ)$ dir [11]. Dengesizlik arızası olan 2987 d/d (49,78 Hz) devirle çalışmakta olan bir pompanın spektrum grafiği (Şekil 2) ve dalga form grafiği (Şekil 3) incelendiğinde arızanın dengesizlik olduğu açıktır [4].



Şekil 2. Dengesizlik spektrum grafiği (Unbalance spectrum graph) [4].

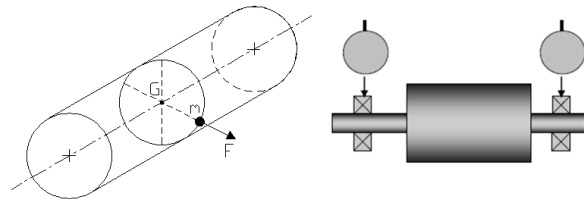


Şekil 3. Dengesizlik dalga form grafiği (Unbalance waveform graph) [4].

Dengesizlik arızası radyal doğrultuda titreşim spektrum grafiğinde devir sayısının eş değeri olan frekansta ($1 \times \text{RPM}$) baskın olan titreşim genliği oluşturur. Dengesizlik arızası, statik dengesizlik, moment dengesizliği ve dinamik dengesizlik olmak üzere üç sınıfta ele alınabilir. Yataklardan alınan faz ölçümleri karşılaştırılarak dengesizliğin hangi sınıfta olduğu teşhis edilebilir.

2. 1. Statik Dengesizlik (Static Unbalance)

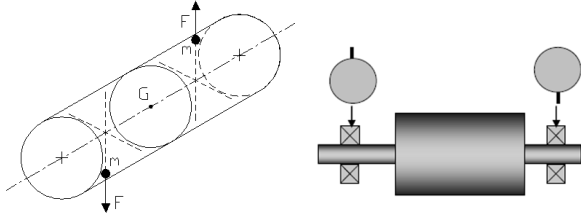
Statik dengesizliğe ağırlık merkezi ile çakışmayan dengelenmemiş bir kütle neden olur. Yalnızca bir nokta dengesiz olduğu için rotorun her dönüşünde yalnızca bir işaret oluşur. Statik dengesizlik radyal yatay ve dikey doğrultuda devir sayısının eş değeri olan frekansta ($1 \times \text{RPM}$) baskın olan titreşim genliği oluşturur. Genellikle radyal yatay düzlem daha hareket serbestisine sahip olduğu için dikey düzleme göre ($1 \times \text{RPM}$) titreşim genliği daha büyüktür. Faz ölçümleri yapılarak teşhisi yapılabilir. Makinenin karşılıklı iki yatağından (ön ve arka yatak) dikey-dikey veya yatay-yatay alınan ölçümlerde faz kayması olmaz yani faz farkının yaklaşık 0° olması gerekir (Şekil 4) [2,11].



Şekil 4. Statik dengesizlik ve faz ölçümlerinin şematik gösterimi (Schematic display of static unbalance and phase measurements)

2.2. Moment Dengesizliği (Couple Unbalance)

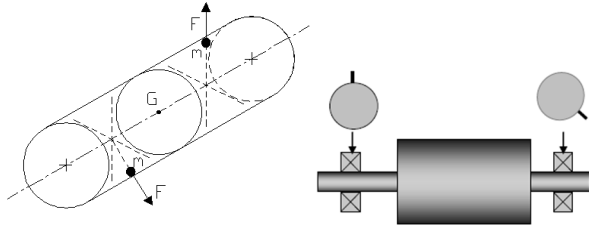
Moment dengesizliği özellikle uzun rotorlarda birbirine 180° açı yapacak şekilde şaftın çapraz noktalarında bulunan dengelenmemiş kütleler nedeniyle oluşur. Moment dengesizliğinde, statik balans alınmaz. Dönme sırasında radyal doğrultuda devir sayısının eş değeri olan frekansta ($1 \times \text{RPM}$) baskın olan titreşim genliği oluşturur. Faz ölçümleriyle teşhisi konulabilir. Makinenin karşılıklı iki yatağından (ön ve arka yatak) alınan ölçümlerde faz farkının yaklaşık 180° olması gerekir (Şekil 5) [11].



Şekil 5. Moment dengesizliği ve faz ölçümlerinin şematik gösterimi (Schematic display of couple unbalance and phase measurements)

2.3. Dinamik Dengesizlik (Dynamic Unbalance)

Dinamik dengesizlik, statik dengesizlik ve moment dengesizliğinin birleşimi olarak tanımlanabilir. Pratikte dinamik dengesizlik en çok rastlanan dengesizlik çeşididir. Dönme esnasında dinamik dengesizlik radyal doğrultuda devir sayısının eş değeri olan frekansta ($1 \times \text{RPM}$) baskın olan titreşim genliği oluşturur. Makinenin karşılıklı iki yatağından (ön ve arka yatak) alınan ölçümlerde faz farkının dengesizliği yaratan kütlelerin eksen üzerindeki dağılımına göre değişebilir (Şekil 6) [5].



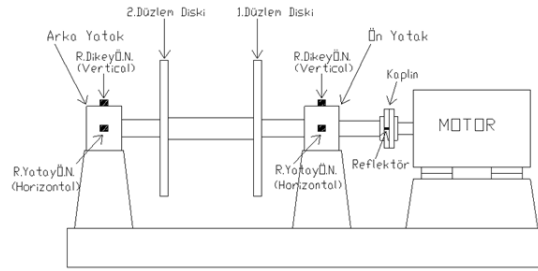
Şekil 6. Dinamik dengesizlik ve faz ölçümlerinin şematik gösterimi (Schematic display of dynamic unbalance and phase measurements)

3. UYGULAMA ÇALIŞMASI (EXPERIMENTAL STUDY)

Dengesizlik çeşitlerini oluşturmak için yapacağımız uygulama çalışması sisteminde devri 1497 d/dk (24,95 Hz) elektrik motor gücü 4kW olan, çift düzlemsel diskli mil olarak tasarlanan deney cihazının şematik çizimi Şekil 7'de görülmektedir. Boyu 720 mm, çapı 45mm, St 37 kalitesinde çelik mil üzerine çapı 350 mm, kalınlığı 20

mm, St 37 kalitesinde 2 adet çelik disk monte edilmiştir. Balans ağırlıklarını bağlayabilmek için bu 2 adet çelik disk üzerinde 160 mm yarıçapında olmak üzere çevresinde 32 adet delik vardır. Cihazın ön ve arka yatak arası merkezden merkeze mesafesi 560 mm, ön yatak ile 1. düzlemsel disk arası mesafe 165 mm, 2. düzlemsel disk arası mesafe 240 mm ve 2. düzlemsel disk ile arka yatak arası mesafesi ise 155 mm'dir.

Bu uygulamada sistem önce denge durumunda dengesizlik problemi yokken çalıştırılmış ve titreşim ölçümleri 0–400 Hz arasında alınmıştır. Daha sonra sistem üzerinde dengesizlik oluşturmak için düzlemsel disklerin üzerine merkezinden 160 mm uzaklığa 160 g ağırlıklar farklı açılara eklenmiştir. Bu şekilde dengesizlik çeşitleri olan statik, moment ve dinamik dengesizliğin her biri sistem üzerinde ayrı ayrı oluşturulmuş ve titreşim ölçümleri 0–400 Hz arasında alınmıştır. Faz açılarını ölçebilmek için motor ve çift düzlemsel diskli mili birbirine bağlayan kaplinin diskli mil tarafı üzerine reflektör yapıştırılmış ve bu nokta deney cihazının referans (sıfır) noktası olarak belirlenmiştir. Bu cihazın ön ve arka yataklarından radyal yatay ve radyal dikey yönlerde titreşim ölçümleri ve faz açıları alınarak kaydedilmiştir. Alınan ölçümlerin spektrum grafikleri ve faz açıları incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. Deney cihazının şematik çizimi (Line diagram of experimental setup)

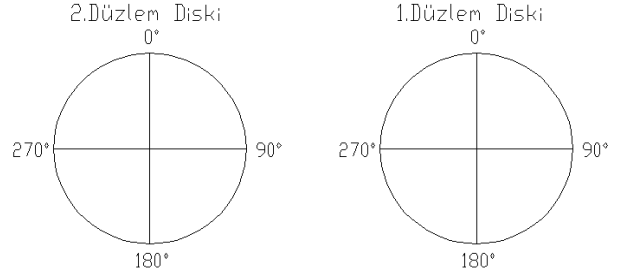
Şekil 8'de deney cihazından titreşim ölçümü alınırken fotoğrafı görülmektedir



Şekil 8. Titreşim ölçümü yapılırken deney cihazının fotoğrafı (Photo graph of experimental setup while vibration measures)

3.1. Sistem Denge Durumunda (System in Balance Condition)

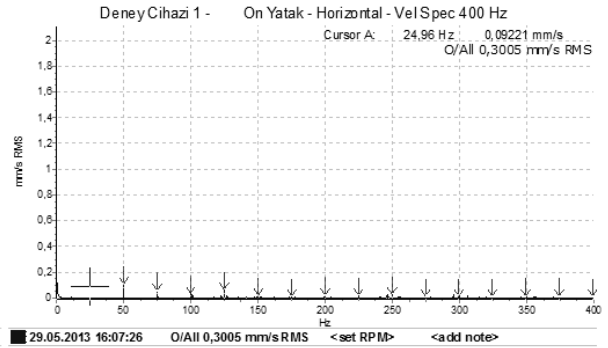
Sistem denge durumunda, açısal olarak şematik gösterimi Şekil 9'da yapılan deney cihazı düzlemsel disklerle herhangi bir ağırlık eklenmeden yani dengesizlik problemi yokken çalıştırılmıştır. Cihazın ön ve arka yataklarından radyal yatay ve radyal dikey yönlerde titreşim ölçümleri ve faz açıları alınarak kaydedilmiştir. Titreşim ölçümleri incelendiğinde sistemde dengesizlik problemi olmadığı için spektrum grafiğinde devir sayısının (1×RPM) eş değeri olan frekansta (24,95 Hz) baskın bir titreşim genliği görülmemiştir (Şekil 10,11). Cihaz devir sayısının (1×RPM) eş değeri olan frekansta (24,95 Hz) titreşim genliği oldukça düşük ve faz açısının sabit olmadığı devamlı farklı değerler gösterdiği tespit edilmiştir (Tablo 1). Örneğin ön yatak radyal yatay yönde alınan ölçümlerde faz açısının 79° ile 148° arasında devamlı değiştiği görülmüş ve bu şekilde (79°-148°) olarak Tablo 1'e işlenmiştir. Faz açısının sabit olmaması devamlı değişmesi sistemde dengesizlik problemi olmadığına göstergesidir. Dengesizlik problemi olmadığından sistemde tek bir noktada baskın bir değer ortaya çıkmadığı için ön ve arka yatak faz açıları birbirinden farklı ve değişkendir. Bu farklılığın ve değişkenliğin sebebi ise yataklardan, kaplından, yataklar ile düzlemsel diskler arası mesafeden, şasi ankrajlardan ve elektrik motorundan kaynaklı olabilir. Titreşim değerleri çok düşük olduğu için bu farklılıklar gayet normaldir.



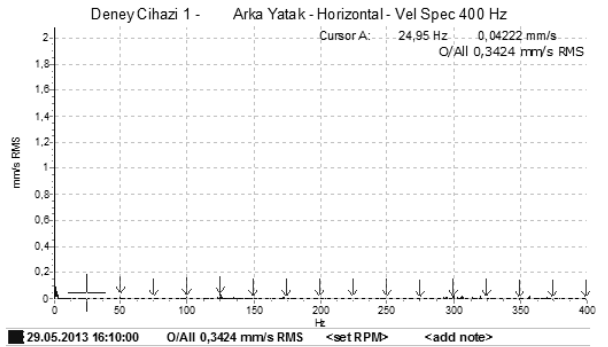
Şekil 9. Deney cihazındaki düzlemsel disklerin açısal gösterimi (The plane discs angular display of the experimental setup)

Tablo 1. Denge durumundaki faz açıları ve titreşim değerleri (Phase angles and vibration values in the balance condition)

Sistem denge durumunda	Radyal yatay			Radyal dikey		
	Faz açısı (°)	(1×RPM) Titreşim genliği (mm/s)	Titreşim hızı (mm/s) RMS	Faz açısı (°)	(1×RPM) Titreşim genliği (mm/s)	Titreşim hızı (mm/s) RMS
Ön yatak	79-148	0,09	0,3	131-161	0,06	0,34
Arka yatak	326-342	0,04	0,34	285-300	0,02	0,15



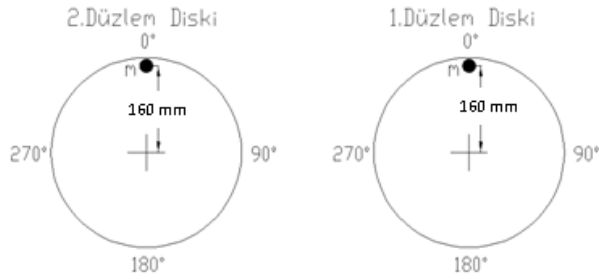
Şekil 10. Ön yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in drive end horizontal direction)



Şekil 11. Arka yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in non drive end horizontal direction)

3.2. Sistem Statik Dengesizlik Durumda (System in Static Unbalance Condition)

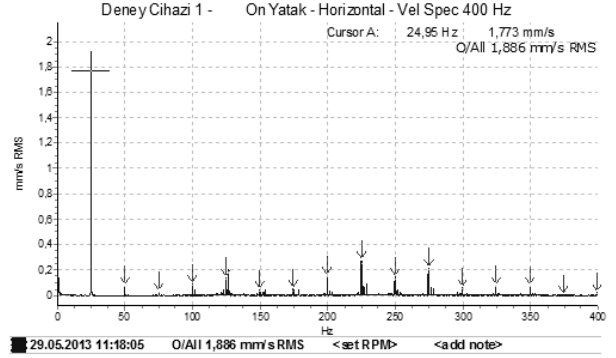
Sistemde statik dengesizlik oluşturmak için çift düzlemsel diskli milin birinci düzlemine 0° ye 160 g ağırlık ve ikinci düzlemine de 0° ye 160 g ağırlıklar merkezden 160 mm uzaklığa eklenmiştir (Şekil 12). Böylece sistem statik dengesizlik arızası durumundadır. Cihazın ön ve arka yataklarından radyal yatay ve radyal dikey yönlerde titreşim ölçümleri ve faz açıları alınarak kaydedilmiştir. Titreşim ölçümleri incelendiğinde sistemde statik dengesizlik problemi olduğu için spektrum grafiğinde devir sayısının (1xRPM) eş değeri olan frekansta (24,95 Hz) çok yüksek seviyede titreşim genliği görülmüştür (Şekil 13,14). Cihaz devir sayısının (1xRPM) eş değeri olan frekansta (24,95 Hz) titreşim genliği yüksek ve faz açısının sabit olduğu tespit edilmiştir (Tablo 2).



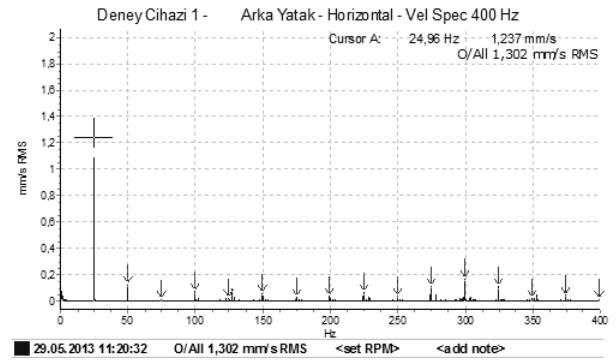
Şekil 12. Düzlemsel disklere eklenen ağırlıkların açısal gösterimi (Angular display of added masses to the plane discs)

Tablo 2. Statik dengesizlik durumundaki faz açıları ve titreşim değerleri (Phase angles and vibration values in the static unbalance condition)

Sistem statik dengesizlik durumu	Radyal yatay			Radyal dikey		
	Faz açısı ($^\circ$)	(1xRPM) Titreşim genliği (mm/s)	Titreşim hızı (mm/s) RMS	Faz açısı ($^\circ$)	(1xRPM) Titreşim genliği (mm/s)	Titreşim hızı (mm/s) RMS
Ön yatak	296	1,77	1,89	209	0,75	0,80
Arka yatak	293	1,24	1,30	225	0,71	0,76



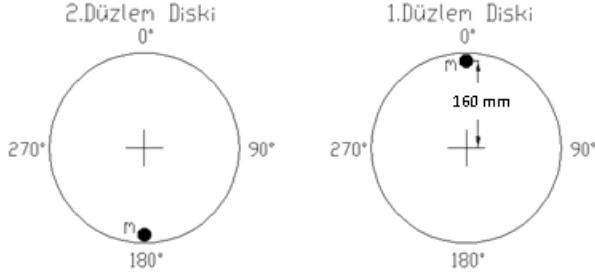
Şekil 13. Ön yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in drive end horizontal direction)



Şekil 14. Arka yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in non drive end horizontal direction)

3.3. Sistem Moment Dengesizliği Durumda (System in Couple Unbalance Condition)

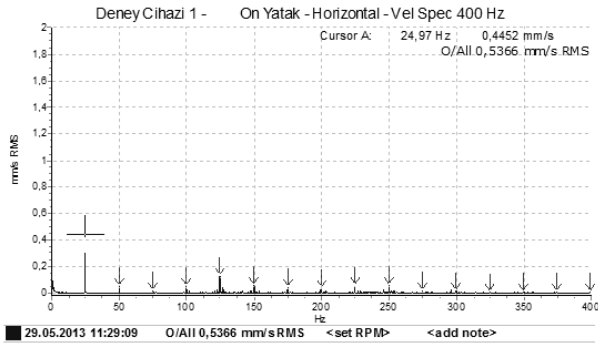
Sistemde moment dengesizliği oluşturmak için çift düzlemsel diskli milin birinci düzlemine 0° ye 160 g ağırlık ve ikinci düzlemine 180° ye 160 g ağırlıklar merkezden 160 mm uzaklığa eklenmiştir (Şekil 15). Böylece sistem moment dengesizliği arızası durumundadır. Cihazın ön ve arka yataklarından radyal yatay ve radyal dikey yönlerde titreşim ölçümleri ve faz açıları alınarak kaydedilmiştir. Titreşim ölçümleri incelendiğinde sistemde moment dengesizliği problemi olduğu için spektrum grafiğinde devir sayısının (1xRPM) eş değeri olan frekansta (24,95 Hz) orta seviyede titreşim genliği görülmüştür (Şekil 16,17). Cihaz devir sayısının (1xRPM) eş değeri olan frekansta (24,95 Hz) titreşim genliği orta seviyede ve faz açısının sabit olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3).



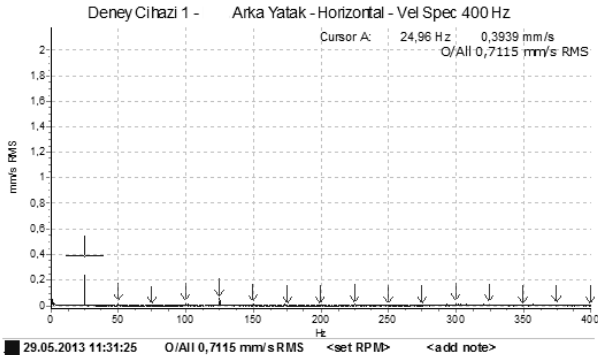
Şekil 15. Düzlemsel disklere eklenen ağırlıkların açısal gösterimi (Angular display of added masses to the plane discs)

Tablo 3. Moment dengesizliği durumundaki faz açıları ve titreşim değerleri (Phase angles and vibration values in the couple unbalance condition)

Sistem moment dengesizliği durumunda	Radyal yatay			Radyal dikey		
	Faz açısı (°)	(1xRPM) Titreşim genliği (mm/s)	Titreşim hızı (mm/s) RMS	Faz açısı (°)	(1xRPM) Titreşim genliği (mm/s)	Titreşim hızı (mm/s) RMS
Ön yatak	284	0,45	0,54	182	0,18	0,28
Arka yatak	109	0,40	0,71	45	0,18	0,32



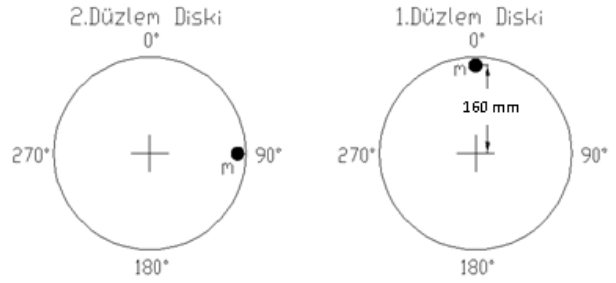
Şekil 16. Ön yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in drive end horizontal direction)



Şekil 17. Arka yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in non drive end horizontal direction)

3.4. Sistem Dinamik Dengesizlik Durumunda (System in Dynamic Unbalance Condition)

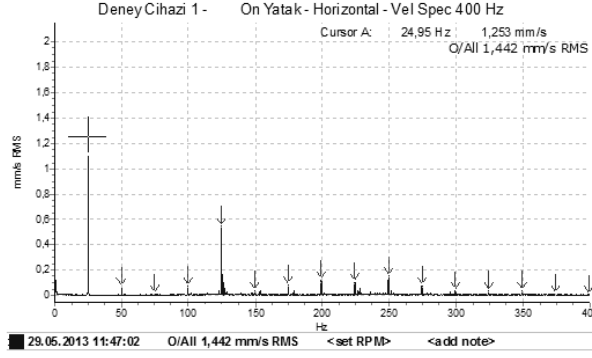
Sistemde dinamik dengesizlik oluşturmak için çift düzlemsel diskli milin birinci düzlemine 0°'ye 160 g ağırlık ve ikinci düzlemine de 90°'ye 160 g ağırlıklar merkezden 160 mm uzaklığa eklenmiştir (Şekil 18). Böylece sistem dinamik dengesizlik arızası durumundadır. Cihazın ön ve arka yataklarından yatay ve dikey yönlerde titreşim ölçümleri ve faz açıları alınarak kaydedilmiştir. Titreşim ölçümleri incelendiğinde sistemde dinamik dengesizlik problemi olduğu için spektrum grafiğinde devir sayısının (1×RPM) eş değeri olan frekansta (24,95 Hz) yüksek seviyede titreşim genliği görülmüştür (Şekil 19,20). Cihaz devir sayısının (1×RPM) eş değeri olan frekansta (24,95 Hz) titreşim genliği yüksek ve faz açısının sabit olduğu tespit edilmiştir (Tablo 4).



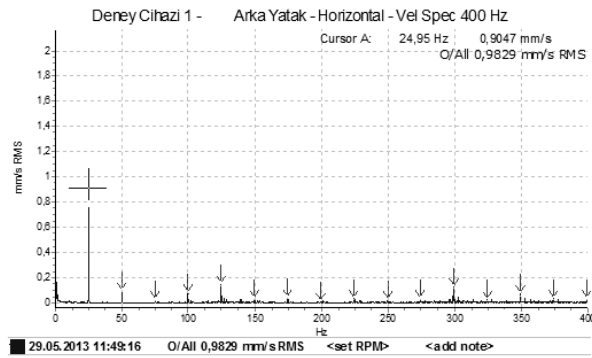
Şekil 18. Düzlemsel disklere eklenen ağırlıkların açısal gösterimi (Angular display of added masses to the plane discs)

Tablo 4. Dinamik dengesizlik durumundaki faz açıları ve titreşim değerleri (Phase angles and vibration values in the dynamic unbalance condition)

Sistem dinamik dengesizlik durumunda	Radyal yatay			Radyal dikey		
	Faz açısı (°)	(1xRPM) Titreşim genliği (mm/s)	Titreşim hızı (mm/s) RMS	Faz açısı (°)	(1xRPM) Titreşim genliği (mm/s)	Titreşim hızı (mm/s) RMS
Ön yatak	326	1,25	1,44	241	0,51	0,56
Arka yatak	353	0,91	0,98	284	0,5	0,53



Şekil 19. Ön yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in drive end horizontal direction)



Şekil 20. Arka yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in non drive end horizontal direction)

4. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada titreşim analizi ve faz açısı yardımıyla makinelerdeki statik, moment ve dinamik dengesizlik arızası ele alınmıştır. Önce sistem denge durumunda dengesizlik problemi yok iken çalıştırılmıştır. Daha sonra ise sistemde her bir dengesizlik durumu ayrı ayrı oluşturularak cihazın ön ve arka yatak radyal yatay ve radyal dikey yönlerdeki titreşim ölçümleri ve faz açıları alınarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde Tablo 5 ve Tablo 6 oluşturulmuştur.

Sistem denge durumunda dengesizlik problemi yok iken cihaz devir sayısının (1xRPM) eş değeri olan frekansta (24,95 Hz) titreşim genliği oldukça düşük ve faz açısının sabit olmadığı devamlı farklı değerler gösterdiği tespit edilmiştir. Örneğin ön yatak radyal yatay yönde alınan ölçümlerde faz açısının 79° ile 148° arasında devamlı değiştiği görülmüştür (Tablo 5,6). (1xRPM) eş değeri olan frekansta titreşim genliğinin düşük olması ve faz açısının sabit olmaması devamlı değişmesi sistemde dengesizlik problemi olmadığını göstergesidir. Sistem herhangi bir dengesizlik durumunda ise aynı yatağın radyal yatay (a,c) ve radyal dikey (b,d) faz açısı ölçümleri arasında beklenen bir durum olan yaklaşık 90° ($\pm 30^\circ$) (a – b) ve (c – d) arasında faz açısı farkı olduğu görülmüştür.

Örneğin sistem statik dengesizlik durumunda iken ön yatak radyal yatay ile radyal dikey faz açısı farkı ($a - b = 296^\circ - 209^\circ = 87^\circ$) olarak tespit edilmiştir (Tablo 5). Statik dengesizlik durumunda (1xRPM) eş değeri olan frekansta titreşim genliğinin seviyesinin en yüksek olduğu ve cihazın ön ve arka yatak arasında radyal yatay yöndeki faz açısı farkının ($a - c = 3^\circ$) yaklaşık 0° olduğu görülmüştür. Moment dengesizliğinde ise (1xRPM) eş değeri olan frekansta titreşim genliğinin orta seviyede olduğu ve cihazın ön ve arka yatak arasında radyal yatay yöndeki faz açısı farkının ($a - c = 175^\circ$) yaklaşık 180° olduğu görülmüştür. Dinamik dengesizlikte ise (1xRPM) eş değeri olan frekansta titreşim genliğinin seviyesinin yüksek olduğu ve cihazın ön ve arka yatak arasında radyal yatay yöndeki faz açısı farkının $a - c = 27^\circ$ olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5 ve 6).

Tablo 6 ve 7’de herhangi bir dengesizlik durumunda yataklardan alınan radyal yatay ve radyal dikey titreşim ölçümlerinde beklendiği üzere cihaz devir sayısının (1xRPM) eş değeri olan frekansta (24,95 Hz) titreşim genliğinin yükseldiği görülmüştür. Bu değer beklediği gibi sistem statik dengesizlik durumda iken en yüksek olduğunu da belirtmek gerekir.

Tablo 5. Denge ve dengesizlik durumlarında faz açılarının karşılaştırılması (Comparisons of phase angles in the balance and unbalance conditions)

	Cihaz ön yatak		Cihaz arka yatak				
	Radyal yatay Faz açısı ($^\circ$) (a)	Radyal dikey Faz açısı ($^\circ$) (b)	Radyal yatay Faz açısı ($^\circ$) (c)	Radyal dikey Faz açısı ($^\circ$) (d)	(c-d) ($^\circ$)	(a-c) ($^\circ$)	
Sistem denge durumunda	79-148	131-161	Değişken	326-342	285-300	Değişken	Değişken
Sistem statik dengesizlik durumunda	296	209	87	293	225	68	3
Sistem moment dengesizliği durumunda	284	182	102	109	45	64	175
Sistem dinamik dengesizlik durumunda	326	241	85	353	284	69	-27

Tablo 6. Denge ve dengesizlik durumlarında (1×RPM) titreşim genlikleri ((1×RPM) vibration amplitudes in the balance and unbalance conditions)

	Cihaz ön yatak		Cihaz arka yatak	
	Radyal yatay 1×RPM Titreşim genliği (mm/s)	Radyal dikey 1×RPM Titreşim genliği (mm/s)	Radyal yatay 1×RPM Titreşim genliği (mm/s)	Radyal dikey 1×RPM Titreşim genliği (mm/s)
Sistem denge durumunda	0,09	0,06	0,04	0,02
Sistem statik dengesizlik durumda	1,77	0,75	1,24	0,71
Sistem moment dengesizliği durumunda	0,45	0,18	0,4	0,18
Sistem dinamik dengesizlik durumunda	1,25	0,51	0,91	0,5

Tablo 7. Denge ve dengesizlik durumlarında titreşim değerlerinin karşılaştırılması (Comparisons of vibration values in the balance and unbalance conditions)

	Cihaz ön yatak			Cihaz arka yatak		
	Radyal yatay 1×RPM Titreşim genliği (mm/s) (e)	Radyal yatay Titreşim hızı (mm/s) RMS (f)	(e/f) (%)	Radyal yatay 1×RPM Titreşim genliği (mm/s) (g)	Radyal yatay Titreşim hızı (mm/s) RMS (h)	(g/h) (%)
Sistem denge durumunda	0,09	0,31	29	0,04	0,34	11,8
Sistem statik dengesizlik durumda	1,77	1,89	93,7	1,24	1,3	95,4
Sistem moment dengesizliği durumunda	0,45	0,54	83,3	0,4	0,71	56,3
Sistem dinamik dengesizlik durumunda	1,25	1,44	86,8	0,91	0,98	92,9

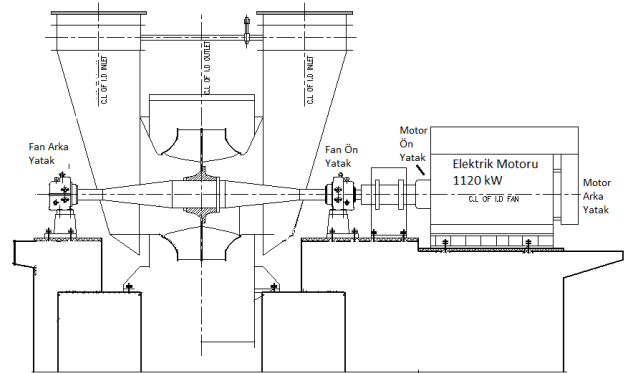
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

Bir makinede dengesizlik arızasının olup olmadığının teşhisi aşağıdaki şekilde formüle edilebilir.

İlk önce alınan ölçümlerden (1×RPM) titreşim genliği ile titreşim hızı arasındaki orana (e/f, g/h) bakmak gerekir (Tablo 7). Bu oran ne kadar yüksek ise dengesizlik arızası olma ihtimalide o kadar yüksektir. Daha sonra aynı yatağın radyal yatay (a,c) ve radyal dikey (b,d) faz açısı ölçümleri arasında (a – b) ve (c – d) faz açısı farkının yaklaşık 90° (±30°) olup olmadığına bakılır (Tablo 5). Bu şartlar sağlanıyorsa makinede dengesizlik arızası teşhisi konulabilir. Son olarak hangi sınıf dengesizlik arızası olduğunu belirleyebilmek için makinenin ön ve arka yatak arasında radyal yatay yöndeki faz açısı farkına (a – c) bakmak gerekir (Tablo 5). (a – c) faz açısı farkı yaklaşık 0° ise statik dengesizlik durumu olduğu, yaklaşık 180° ise moment dengesizliği durumu olduğu, bu değerlerden farklı ise dinamik dengesizlik durumu olduğu söylenebilir. Dinamik dengesizlik durumunda (a – c) faz açısı farkı dengesizliği yaratan kütlelerin eksen üzerindeki dağılımına göre değişebilir.

Harflerle ifade edilen bu açıklamalar, gerçek bir örnek üzerinde denenerak sayısal olarak aşağıda ifade edilmiştir.

Bu örnek bir fabrikanın baca gazı sisteminde çalışan bir baca (cebri çekme) fanıdır. Bu fan sistemde oluşan baca gazını çekerek bacaya basmaktadır. Baca fanının gücü 1120 kW, devri ise 995 d/dk (16,58 Hz) dir. Fanın özellikleri Tablo 8’de verilmiş olup şematik çizimi ise Şekil 21’de görülmektedir. Fan ön ve arka yataklarından radyal yatay ve dikey yönlerde titreşim ölçümleri ve faz açıları alınarak kaydedilmiştir. Titreşim ölçümleri ve faz açıları tablolar oluşturularak incelenmiş ve yorumlanmıştır.

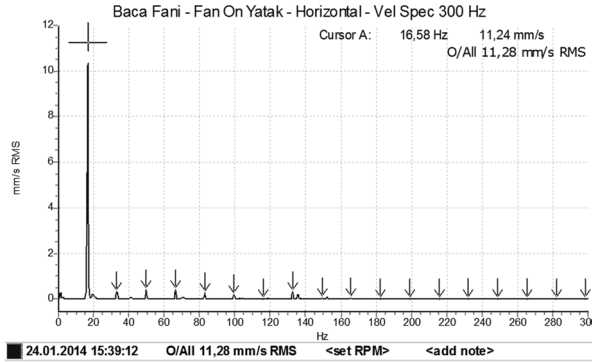


Şekil 21. Baca (Cebri Çekme) fanın şematik çizimi (Line diagram of Induced draft fan)

Tablo 8. Baca (Cebri Çekme) fanının özellikleri (Description of Induced draft fan)

Özellik	Birim	Açıklama
Elektrik Motor Gücü	kW	1120
Elektrik Motor Devri	d/dk	995
Elektrik Motor Voltajı	V	6000
Fan Tipi	-	Çift emişli santrifüj fan
Fan Basıncı	kPa	6
Fan Debisi	m ³ /h	400.000
Fan Devri	d/dk	995
Fan Çalışma Sıcaklığı	°C	140
Yataklama Sistemi	-	Rulmanlı yatak
Fan Yatak Titreşim Limitleri	mm/s (RMS)	Alarm değeri:6,3mm/s, Trip değeri:7,1mm/s
Fan Yatak Sıcaklık Limitleri	°C	Alarm değeri:80°C, Trip değeri:90°C

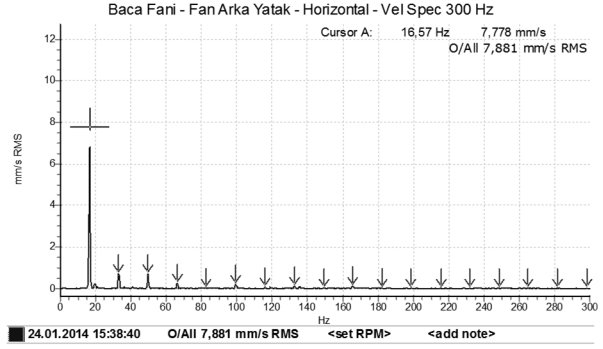
Baca fanı yataklarından radyal yatay ve dikey yönlerde faz açısı ve titreşim ölçümleri yapılmıştır. Fan ön yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu Şekil 22'de görülmektedir.



Şekil 22. Baca fanı ön yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in drive end horizontal direction of Induced draft fan)

Şekil 22'deki titreşim spektrumu incelendiğinde titreşim hızının 11,28 mm/s RMS olduğu görülmüş olup bu değer bu fan için kabul edilebilir değerlerin dışındadır. Fan devir sayısının (1xRPM) eş değeri olan frekansta (16,58 Hz) çok yüksek seviyede (11,24 mm/s) titreşim genliği görülmüştür.

Fan arka yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu ise Şekil 23'te görülmektedir. Şekil 23'teki titreşim spektrumu incelendiğinde titreşim hızının 7,88 mm/s RMS olduğu görülmüş olup bu değer bu fan için kabul edilebilir değerlerin dışındadır. Fan devir sayısının (1xRPM) eş değeri olan frekansta (16,58 Hz) yüksek seviyede (7,78 mm/s) titreşim genliği görülmüştür.



Şekil 23. Baca fanı arka yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in non drive end horizontal direction of Induced draft fan)

Fan ön ve arka yataklarından alınan titreşim ölçümleri Tablo 9'da belirtilerek birbiriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca faz açıları ölçümlerinde faz açılarının sabit bir değer gösterdiği görülmüş olup Tablo 10'da belirtilerek birbiriyle karşılaştırılmıştır

Tablo 9. Baca fanı yataklarındaki titreşim değerlerinin karşılaştırılması (Comparisons of vibration values in bearings of Induced draft fan)

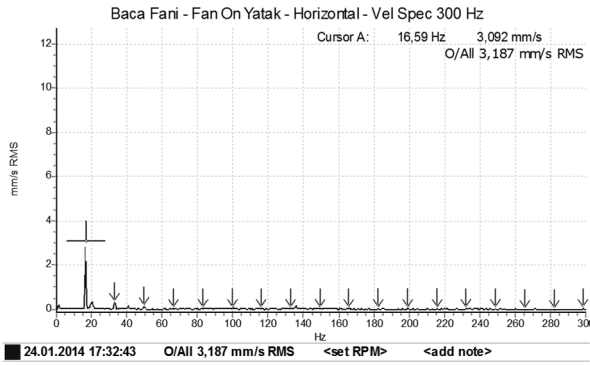
	Fan ön yatak			Fan arka yatak		
	Radyal yata y (1xRPM) Titreşim genliği (mm/s) (e)	Radyal yata y Titreşim hızı (mm/s) RMS (f)	(e/f) (%)	Radyal yata y (1xRPM) Titreşim genliği (mm/s) (g)	Radyal yata y Titreşim hızı (mm/s) RMS (h)	(g/h) (%)
Baca Fanı	11,24	11,28	99,6	7,78	7,88	98,7

Tablo 10. Baca fanı yataklarındaki faz açılarının karşılaştırılması (Comparisons of phase angles in bearings of Induced draft fan)

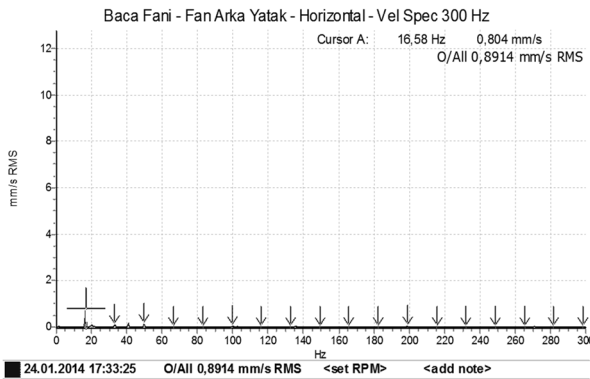
	Fan ön yatak			Fan arka yatak		
	Radyal yata y Faz açısı (°) (a)	Radyal dikey Faz açısı (°) (b)	(a - b) (°)	Radyal yata y Faz açısı (°) (c)	Radyal dikey Faz açısı (°) (d)	(c - d) (°) (a - c) (°)
Baca Fanı	193	277	84	198	290	92

Ölçümler incelendiğinde, fan devir sayısının (1xRPM) eş değeri olan frekansta (16,58 Hz) çok yüksek seviyede (11,24 mm/s) titreşim genliği görülmektedir. Ayrıca (1xRPM) titreşim genliği ile titreşim hızı arasındaki orana (e/f, g/h) bakıldığında (e/f)= %99,6 ve (g/h)= %98,7 oranının çok yüksek olduğu görülür. Fan ön yatak radyal yatay ile dikey faz açısı farkı (a-b)=84°, fan arka yatak radyal yatay ile dikey faz açısı farkı (c-d)=92° olduğu görülmektedir. Bu faz açısı farklarının yaklaşık 90° ($\pm 30^\circ$) olduğundan ve (1xRPM) titreşim

genliklerinin çok yüksek olduğundan dolayı fandaki arızanın dengesizlik arızası olduğu teşhis edilir. Hangi sınıf dengesizlik arızası olduğunun tespiti için makinenin ön ve arka yatak arasında radyal yatay yöndeki faz açısı farkına (a – c) bakmak gerekir. (a – c)= 5° olduğu görülmektedir. Bu faz açısı farkının yaklaşık 0° olduğundan dolayı fandaki dengesizlik arızasının statik dengesizlik arızası olduğu tespit edilmiştir. Bu tespit sonucu fana balans alma işlemi uygulanmıştır. Balans alma işleminden sonra fanın titreşim ölçümleri tekrar yapılmıştır. Şekil 24 ve Şekil 25 teki titreşim spektrumları incelendiğinde titreşim değerlerinin düştüğü görülmüştür. Bu değerler fanın çalışması için kabul edilebilir değerlerdir. Balans alma işleminden önce ve balans alma işleminden sonra alınan titreşim değerleri Tablo 11'e işlenmiştir.



Şekil 24. Balans alma işleminden sonra Baca fanı ön yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in drive end horizontal direction of Induced draft fan after balancing)



Şekil 25. Balans alma işleminden sonra Baca fanı arka yatak radyal yatay yöndeki titreşim spektrumu (Vibration spectrum in non drive end horizontal direction of Induced draft fan after balancing)

Tablo 11. Baca fanı yataklarındaki titreşim değerlerinin karşılaştırılması (Comparisons of vibration values in bearings of Induced draft fan)

	Fan ön yatak		Fan arka yatak	
	Radyal yatay Titreşim hızı (mm/s) RMS	Radyal dikey Titreşim hızı (mm/s) RMS	Radyal yatay Titreşim hızı (mm/s) RMS	Radyal dikey Titreşim hızı (mm/s) RMS
Baca Fanı (Balans alma işleminden önce)	11,28	4,76	7,88	3,48
Baca Fanı (Balans alma işleminden sonra)	3,18	1,41	0,89	0,46

Sonuç olarak bir makinedeki dengesizlik arızası ve çeşitleri incelenmiş olup titreşim analizi yapılarak spektrum grafikleri ve faz açısı yardımıyla hangi tür dengesizlik arızası olduğunun teşhisinin nasıl yapılabileceği sunulmuştur. Makinelerdeki dengesizlik arızasını çözmek için bu teşhise göre makineye balans alma işlemi uygulanmalıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Belek, "Endüstriyel Tesislerin Bakımında Modern Yaklaşım: Dinamik Erken Uyarıcı Bakım Yöntemleri", *Mühendis ve Makina*, 29, 29-36, 1988.
- [2] S. Orhan, "Rulmanlarla Yataklanmış Dinamik Sistemlerin Titreşim Analiziyle Kestirimci Bakımı", *Doktora Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalı, Kırıkkale, 2002.
- [3] K. Mobley, "Vibration Fundamentals", Newnes Yayınevi, USA, 1999.
- [4] S. Orhan, "Dönen Makinelerde Oluşan Arızalar ve Titreşim İlişkisi", *Teknoloji*, Yıl 6, Sayı 3-4, 41-48, 2003.
- [5] M.F. Karahan, "Titreşim Analiziyle Makinalarda Arıza Teşhisi", Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 2005.
- [6] S. Açık, "Sürekliform Baskı Makinasının Titreşim Sinyali Yardımıyla Kestirimci Bakımının Yapılması", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Ankara, 2008.
- [7] H. Dal, Ö.K. Morgül, İ. Şahin, "Yapay Sinir Ağı (YSA) Kullanarak Titreşim Tabanlı Makina Durum İzlemesi ve Hata Teşhisi", *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), s.45-50, 2006.
- [8] H. Dal, Ö.K. Morgül, "Vibration-Based Machinery Health Monitoring By Fuzzy Logic",

12th Conference for Computer Aided Engineering and System Modeling with BDM Exhibition, WOW Kremlin Palace, Antalya, 2007.

- [9] Y. Uysal, "Descale Pompa Milinin ve Rotor Gurubunun Titreşim Ve Kritik Hız Analizi", *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 2006.

- [10] K.B. Kumar, G. Diwakar, M. R. S Satynarayana., "Determination of Unbalance in Rotating Machine Using Vibration Signature Analysis", *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2(5), 3415-3421, 2012.
- [11] C. Scheffer, P. Girdhar, "Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance", Elsevier, 2004.