

KÜÇÜK BOY POMPALARDA GÜRÜLTÜ KAYNAKLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

F. Ceyhun ŞAHİN*

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü
ceyhunsahin@gmail.com*

Prof. O. Cahit ERALP

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü
ceralp@metu.edu.tr*

ÖZET

Bu çalışma, pompa gürültüsü ve bunun basınç salınımları ile ilişkilerinin deneysel olarak araştırılması üzerinedir. Küçük boyda pompa yarı yankısız bir oda içinde, değişik sistem koşullarında ve değişik dönme hızlarında çalıştırılmıştır. Pompa çalışma verileri, ses verileri ve zamana bağlı basınç verileri kaydedilmiştir. Gürültü ve basınca ait FFT spektrumları karşılaştırılmıştır. Ses basınç düzeyleri ve hidrolik basınç arasındaki eşevre spektrumu çıkarılmıştır. Deneysel sonucunda pompanın su basma yüksekliği gibi sistem karakteristiğinde yapılan değişikliklerin pompa gürültüsü üzerinde etkili olmadığı tespit edilmiştir. Diğer yandan pompa karakteristiğine dahil olan dönme hızı ses spektrumlarında kanat geçme frekansı ile orantılı frekanslardaki sıçramalarla fark edilmektedir. Aynı zamanda çapraz korelasyon sonuçları göstermiştir ki pompa çıkış basıncı pompa giriş basıncından daha önemli bir gürültü kaynağıdır.

Anahtar Kelimeler: Santrifüj pompa, gürültü, basınç salınımı

An Experimental Study on Source of Noise For Small Pumps

ABSTRACT

The object of this study is experimentally investigating pump noise and its relations with pressure fluctuations. Small size pump is tested in a semi-anechoic chamber at different system conditions and different rotational pump speeds. Pump operational data, noise data and time dependent pressure data are recorded. Fast Fourier Transform spectra of noise and pressure data are compared. Coherence spectrum between sound pressure level and hydraulic pressures are obtained. The experiments have indicated that system characteristics such as geometric head do not have any influence on the noise of pump. On the other hand rotational speed which is a parameter of pump characteristics is distinguished on the sound spectra with peak frequencies proportional to the blade passing frequency of the pump. Results of cross correlations also show that, pump outlet pressure is a more significant source of noise than pump inlet pressure.

Keywords : Centrifugal pump, noise, pressure fluctuation.

** İletişim yazarı

Geliş tarihi : 23.03.2009

Kabul tarihi : 03.11.2009

GİRİŞ

Ev tipi cihazlardan kaynaklanan gürültünün araştırılması amacıyla bu çalışmada özgül hızı 1'den küçük olan ve ev tipi cihazlarda kullanılan bir pompanın çalışma gürültüsü incelenmiştir.

Cihazlardaki gürültü daha çok titreşimden kaynaklanır. Mekanik titreşimlerin yanında pompanın taşıdığı su da bir gürültü kaynağıdır. Suyun kanatlara çarpışı sonucu ses spektrumlarında kanat geçiş frekansı ve harmoniklerinde baskın tonlar gözlenir. Kanat geçiş frekansı, sabit bir noktadan kanatların geçme sıklığıdır. Bunun dışında, sınır tabakasındaki türbülans, tasarım noktası dışında çalışan pompalarda kanattan ayrılan akış geniş spektrumda sıçrama yaratacak gürültü kaynaklarıdır [1]. Makinanın içindeki akıştan kaynaklanan gürültünün tespitinde basınç salınımları önemli bir rol oynar. Literatürde akustik ölçümlerin değerlendirilmesinde tavsiye edilen yöntem; bunların, akış ölçümleri ile birlikte değerlendirilmesidir [2]. Bu şekilde yapılmış deneylerde, fanlar için varılan neticelerden biri; fan girişindeki düzensiz akışın ses seviyesini yükselttiğidir [3]. Santrifüj bir pompa içinse, pompa çıkışındaki düzensizliğin ses spektrumlarının düşük frekanslarında sıçramalara sebep olduğu görülmüştür [2].

Çark kanatlarının yanı sıra, mil dönmesi ve motor üzerindeki döner parçalar da birer gürültü kaynağıdır. Özellikle hasarlı rulmanlar makinaların ses düzeyinde yükselmeye sebep olur.

Bu çalışmada, santrifüj pompanın tasarım noktasında ve tasarım dışı çalışma akustik gürültüsü deneysel olarak saptanmıştır. Ses basınç spektrumu ile pompa giriş ve çıkış hidrolik basınç spektrumu arasında çapraz doğrulama yapılmıştır. Bu spektrumlardaki frekansların pompa çarkı, mil dönmesi ve rulman hasarlarıyla ilgili olduğu gözlenmiştir.

Deneyler, yarı yankısız bir odada iki farklı deney düzeneği ile iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada sadece pompa gürültüsü ölçülmüş, ikinci aşamada doğrulama işlemleri için pompa giriş ve çıkış basınçları da ölçülmüştür.

TEORİ VE DENEY EKİPMANI

Santrifüj Pompa

Çalışmada test edilen pompanın çarkı üzerinde yedi kanat bulunmaktadır. Pompa iki farklı dönme hızında çalıştırılmıştır. Bunlar; 2375 d/d ve 2965 d/d'dir. Pompanın bu iki çalışma hızında genel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Pompa kapağı ve çarkın resimleri Şekil 1'de görülmektedir. Giriş kısmında çarkın çapı 35,6 mm çıkışta ise 72,0 mm'dir.

Tablo 1. Pompanın Genel Özellikleri [4].

Dönme hızı (d/d)	Q _d (l/s)	H _d (m)	Özgül hız $\frac{\omega Q^{1/2}}{(gH)^{3/4}}$
2375	0.61	2.57	0.55
2965	0.8	4	0.56



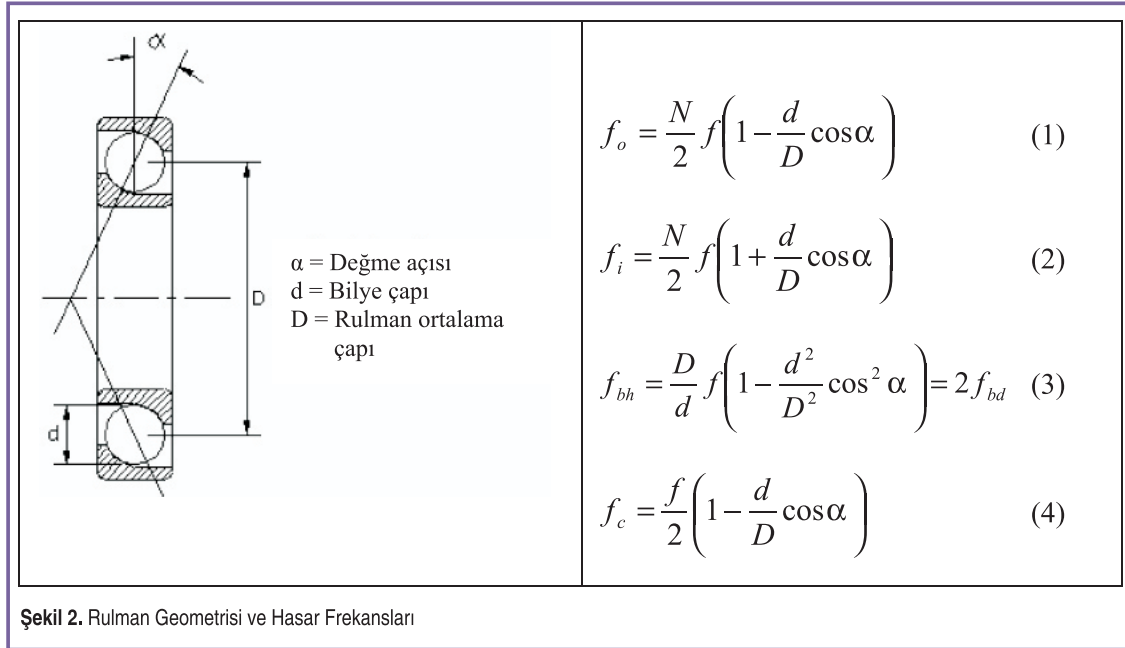
Şekil 1. Pompa Kapağı ve Çark

Radyal Bilyeli Rulman

Deneylerde kullanılan pompayı çeviren AC motorun üzerinde 24 adet sabit kanatçık vardır. Motor, mil üzerinde iki adet NMB 608Z tipi radyal rulman ile dönmektedir. Rulmanın özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. NMB 608Z Rulman Özellikleri

Parça Numarası	608
Delik Çapı	8.000 mm
Dış Çap	22.000 mm
Genişlik	7.000 mm
Köşe yarıçapı	0.30 mm
Referans İç Çap	10.800 mm
Referans Dış Çap	19.10 mm
Bilye Boyu	3.969 mm
Bilye Sayısı	7
Dinamik Yük Payı	3297 N
Statik Yük Payı	1368 N



Her rulmana ait karakteristik dönme frekansları vardır. Rulman elemanlarındaki bir hasar, o elemana ait hasar titreşim frekansındaki yüksek enerji sayesinde takip edilebilir. Karakteristik hasar titreşim frekansları rulman geometrisi ve dönme hızına bağlı olarak hesaplanabilir [6]. Rulman elemanlarının karakteristik hasar frekansları için hesaplama yöntemi Şekil 2'de görülmektedir. Eşitliklerde f , mil dönme frekansıdır.

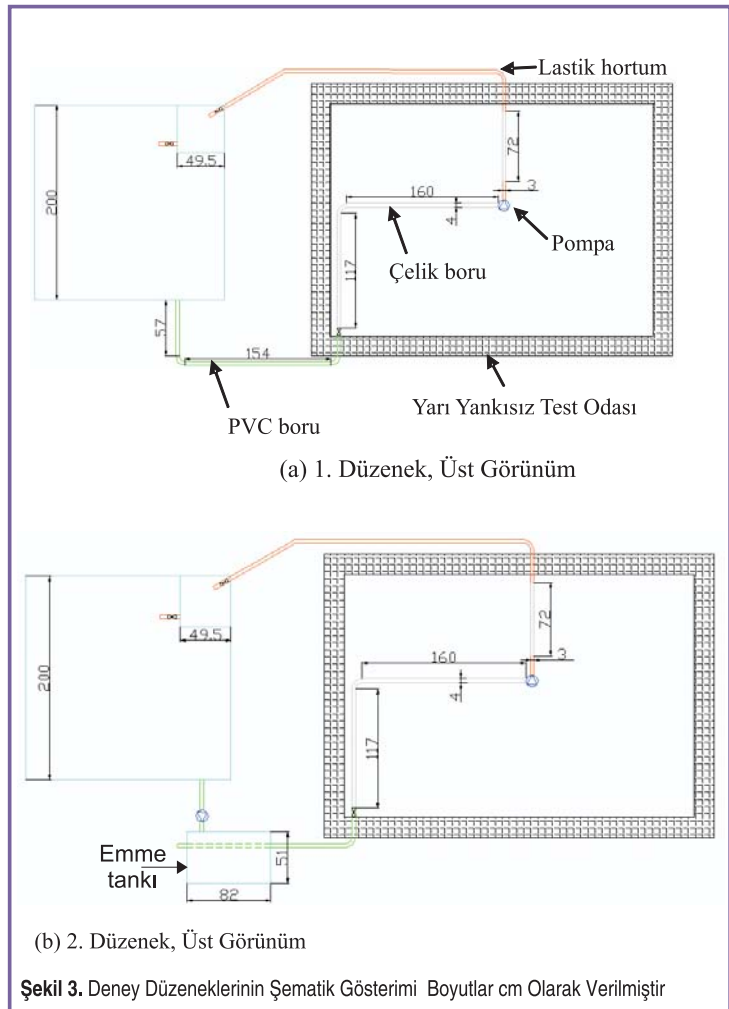
NMB 608Z rulmanın hasar titreşim frekansları Tablo 2'de verilen bilye çapı ve delik - dış bilezik çaplarının ortalaması ile hesaplanmıştır. Bu rulman için hasar titreşim frekanslarının kanat geçiş frekansına oranları; $f_o = 0.368 f_{kg}$, $f_i = 0.632 f_{kg}$, $f_{bh} = 0.502 f_{kg}$ ve kafes dönme frekansının kanat geçiş frekansına oranı; $f_c = 0.0525 f_{kg}$.

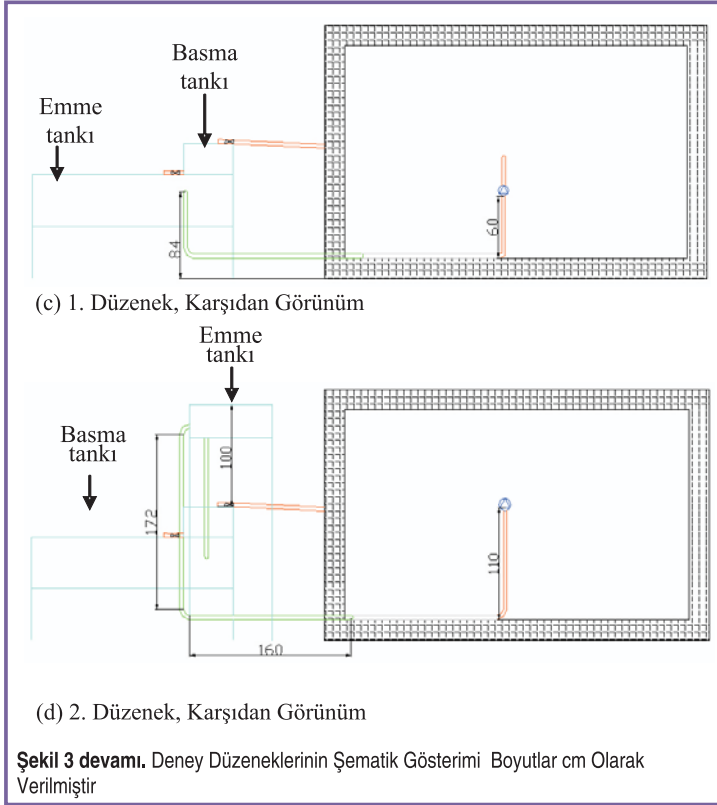
Yarı Yankısız Test Odası

Akustik testler ODTÜ-Makina Mühendisliği Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında bulunan Yarı Yankısız Test Odasında yapılmıştır. ISO 3745 Uluslararası Standartlarına göre yapılan kalibrasyon çalışmalarında, test odası 1/3 oktav bandında, 315 Hz ve 1000 Hz frekansları arasında, açık alanı tam olarak simüle etmektedir. 200 Hz ve 1600 Hz arasında yeterince doğru sonuçlar elde edilmektedir. Odanın açık alan simülasyonunun 160 Hz - 4000 Hz arasına kadar kabul edilebilir düzeyde olduğu şeklinde bir değerlendirme yapılmıştır [4].

Veri Toplama Sistemi

Pompa gürültü ölçümleri Soundbook SAMURAI veri toplama sistemi ile gerçekleştirilmiştir. GRAS 26CA-61988 ve GRAS 26CA-61989 tipi mikrofonlar veri





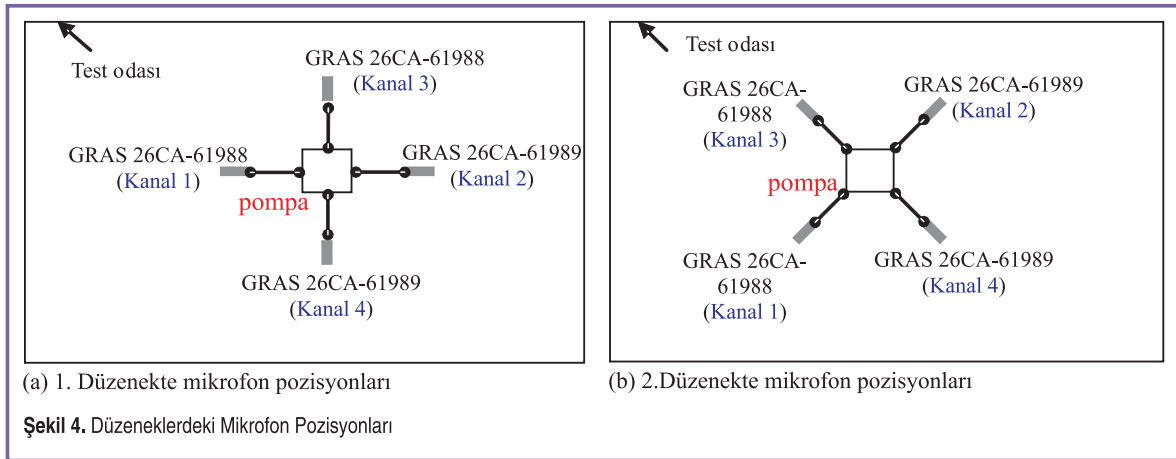
toplama sistemine bağlanmış ve pompa gürültüsünün FFT spektrumları kaydedilmiştir. Basınç salınımlarını araştırmak için de FGP XPM5 2900 ve FGP XPM5 2899 tipi basınç algılayıcıları sisteme bağlanmış, su basıncının FFT spektrumu da kaydedilmiştir. Bu algılayıcıların en yüksek ölçüm yapacağı frekans 200 kHz'dir.

düşük bir yüksekliğe su basmaktadır. Pompanın yansıtma yüzeyinden yüksekliği 60 cm'dir. İkinci düzenekte kavitasyonu engellemek için emme tankının seviyesi yükseltilmiş ve basma tankı ile arasında negatif kot farkı yaratılmıştır. Pompanın yansıtma yüzeyinden yüksekliği 1.1 m'dir. Mikrofonlar pompadan 1 m uzağa yerleştirilmiştir. İkinci düzenekte mikrofonların oda duvarından uzaklığının artırılmasıyla ses düzey ölçümünde iyileştirmeye gidilmiştir [4]. Deneyler sırasındaki mikrofon pozisyonları Şekil 4'te görülmektedir. Oda tabanında, tabanın yansıtma özelliğini engellemek için, çelik borular kullanılmıştır. Bunun dışındaki yüzeylerde, sesi yansıtması için lastik hortum bağlantıları kullanılmıştır.

DENEYLER VE DENEY SONUÇLARI

İlk deney düzenğinde pompa gürültüsü iki farklı dönme hızında, farklı çalışma noktalarında ölçülmüştür. İkinci düzenekte, önceki deneyler tekrar edilmiş ve pompa giriş-çıkışındaki hidrolik basınç verileri de kaydedilmiştir. Pompanın tasarım dışı noktalarda çalışması ses odaklı olarak incelenmiştir. Ses basıncı ve hidrolik basınçlar tasarım noktasında ve yarı yüklü çalışmada karşılaştırılmıştır. Deneyler sırasında arka plan gürültüsü kabul edilebilir bir düzeyde tutulmuştur.

FFT çevirimi ve çapraz doğrulama analizi SAMURAI yazılımı ile yapılmıştır. FFT için Hanning window kullanılmış, çapraz doğrulama için de doğrusal yineleme ile ortalama hesaplanmıştır. Frekanslar kanat geçme frekansı ile normalize edilmiş, ses ve basınç spektrumları tüm deney setleri için karşılaştırılmıştır.



DENEY DÜZENEKLERİ

Deneyler iki farklı düzenekte yapılmıştır. Bu düzeneklerde, pompanın su basma yüksekliği ve yansıtma yüzeyinden uzaklığı farklıdır. Şekil 3'te iki düzenekğin de çizimleri görülmektedir. İlk düzenekte pompa yaklaşık 40 cm kadar

Pompa Gürültüsü

Dört mikrofonun ses basınç ortalaması hesaplanmıştır. İki pompa hızı için de kanat geçiş frekansı gözlemlenmiştir. Kanat geçiş frekansının harmonikleri ve 3,5 katındaki sıçramalar, çoğu çalışma koşulunda tespit edilmiştir. Ses

spektrumunda baskın sıçrama frekansları Tablo 3'te işaretlenmiştir.

Tablo 3. Pompa Ses Spektrumlarında Gözlenen Baskın Sıçramaların Kanat Geçiş Frekansına Oranları [4]

Dönme Hızı (d/d)	f/f_{kg}			
	1	2	3,5	7
2375	✓	✓	✓	✓
2965	✓		✓	✓

Rulman Gürültüsü

Rulmanlar içerisinde 7 bilye olduğu için bunların geçiş frekansı 7 kanatlı pompanın kanat geçiş frekansına eşittir. Rulman hasar frekanslarında görülen sıçramalar Tablo 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Motor gürültüsü pompa gürültüsü ile mukayese edildiğinde düşüktür. Fakat pompa gürültü spektrumunda $1,7f_{kg}$, $3,5f_{kg}$ ve mil dönme frekansının 24 katına denk gelen sıçramalar motor, pompadan ayrı çalıştırıldığında da gözlenmektedir [4].

Pompa Giriş ve Çıkış Basınçları

Pompa giriş ve çıkış basınç spektrumlarında birbirini, mil

dönme hızının iki katı farkla takip eden basınç sıçramaları vardır.

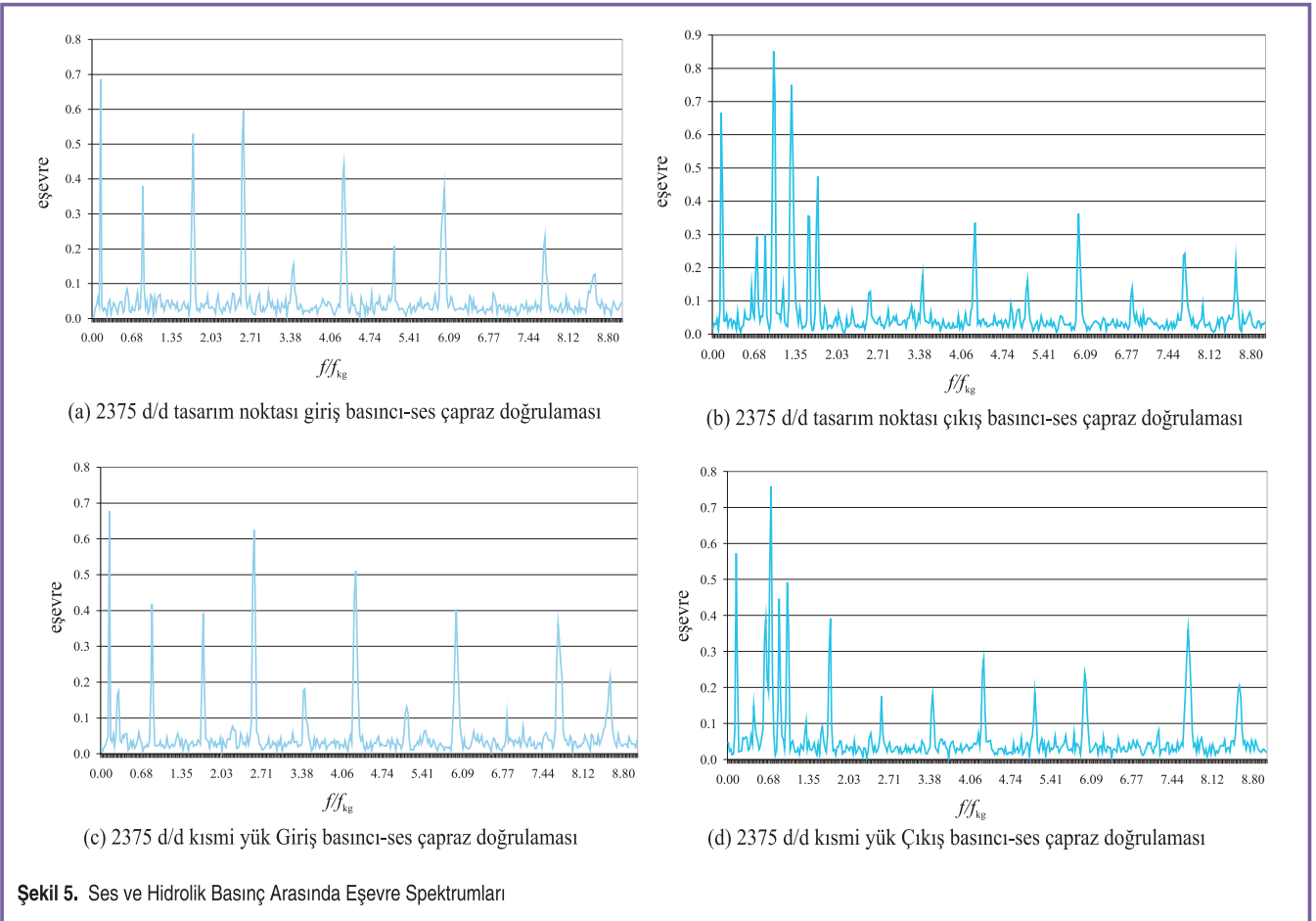
Pompa içinde, çarkın arkasında üç adet sabit kanatçık vardır. Bunlardan kaynaklanması beklenen sıçrama, mil dönme frekansının 3 katındadır.

Eşvre spektrumları Şekil 5'te verilmiştir. Kanat geçiş frekansı ile normalize edilmiş frekanslar Tablo 4'te listelenmiştir. Mil dönüş hızı kanat geçiş frekansının 1/7 katındadır. Pompa içindeki sabit kanatçıklardan dolayı mil dönüş frekansının 3 katında beklenen sıçrama pompa çıkış basıncında gözlenmiştir. Pompa giriş ve çıkış basıncında $6/7f_{kg}$ ve harmoniklerinde sıçrama vardır. Tablo 4'te bu değerler yıldız ile işaretlenmiştir.

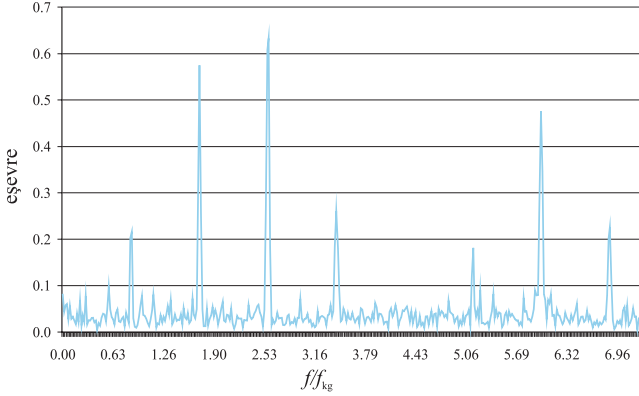
Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Tablo 3'te bahsedilen frekanslardan biri kanat geçiş frekansının 3,5 katındadır. Bu kanat geçiş frekansının tam katı olmasa da bilye dönüş hızının 14 katı, bilye hasar frekansının 7 katıdır.

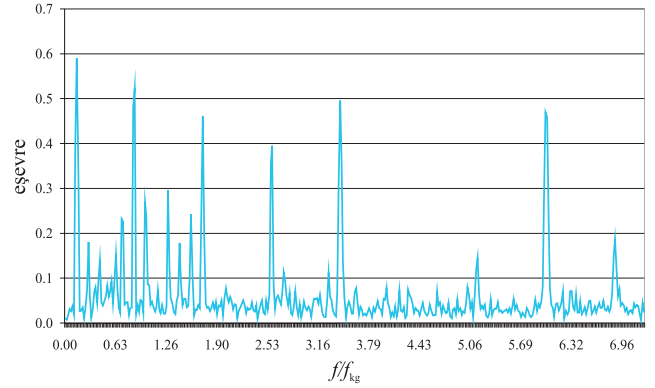
Düşük dönme hızında pompanın düşük yükte çalıştırılması eşvre spektrumlarında daha çok sayıda sıçrama ile sonuçlanmıştır. Yüksek dönme hızında ise düşük yükte bu sıçramaların sayısı azalmıştır.



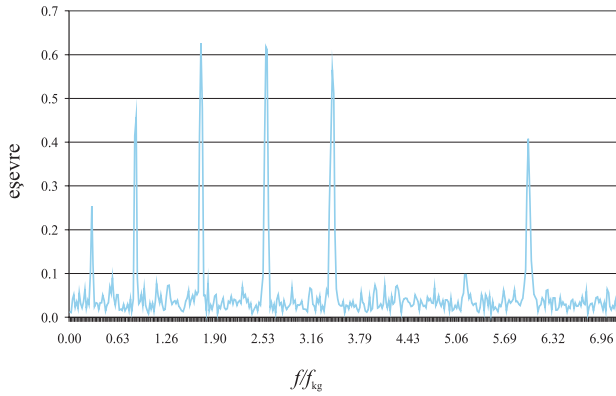
Şekil 5. Ses ve Hidrolik Basınç Arasında Eşvre Spektrumları



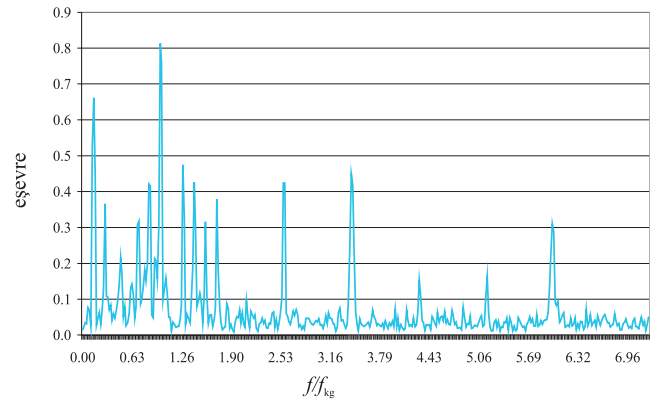
e) 2965 d/d tasarım noktası giriş basıncı-ses çapraz doğrulaması



(f) 2965 d/d tasarım noktası çıkış basıncı-ses çapraz doğrulaması



(g) 2965 d/d kısmi yük giriş basıncı-ses çapraz doğrulaması



(h) 2965 d/d kısmi yük çıkış basıncı-ses çapraz doğrulaması

Şekil 5 devamı. Ses ve Hidrolik Basıncı Arasında Eşevre Spektrumları

Tablo 4'te ilk kısmında giriş basıncı ile ses eşevre spektrumlarındaki sıçrama frekansları özetlenmiştir. Kanat geçiş frekansının 1/7 katında görülen frekans mil dönüş frekansıdır. Mil dönüş frekansının ilk harmoniği pompa kısmi yükte çalıştırıldığında zayıf da olsa gözlenmiştir. Kanat geçiş frekansının 6/7 katındaki frekans değeri Tablo 4'te (*) ile işaretlenmiştir. Bu frekans değerinin ilk 9 harmoniği giriş basıncı ile ses eşevre spektrumlarında gözlenebilmiştir. Bunlardan (**) değeri bilye dönüş frekansının 6'ncı, (4*) 13'üncü harmoniğidir. (4*) aynı zamanda bilye hasar frekansının 6. harmoniğidir. (3*), (6*) ve (9*) sırasıyla dış bilezik dönüş frekansının 6'ncı, 13'üncü ve 20'nci harmonikleridir.

Tablo 4'ün ilk kısmında listelenmiş frekans değerlerinin hepsinde sıçramanın görüldüğü ölçüm ise pompanın düşük

devirde ve kısmi yükte çalıştırıldığı ölçümdür.

Tablo 4'ün ikinci kısmında pompa çıkış basıncı ile ses eşevre spektrumlarında görülen sıçrama frekansları özetlenmiştir. Çıkış basıncı ile ses arasındaki çapraz doğrulama sayesinde kanat geçiş frekansını tespit edilebilmektedir. Mil dönüş frekansını bu spektrumların hepsinde baskındır. Pompa yüksek devirde çalıştırıldığında mil dönüş frekansının ilk harmoniği de gözlenmiştir. Giriş basıncı ile ses eşevre spektrumlarında görülen mil dönüş hızı, bunun ilk harmoniği, (*) ve ilk 8 harmoniğindeki sıçramalar (bunlar bilye dönüş frekansının 7 ve 14 katı ile dış bilezik dönüş frekansının 7, 14 ve 21 katını da içerir), çıkış basıncı ile ses eşevre spektrumlarında da vardır. Bunlara ilaveten bu spektrumlarda iç bilezik dönüş frekansını ve pompa içindeki 3 sabit kanatçığa ait frekanslarda da sıçrama vardır.

Tablo 4. Kanat Geçiş Frekansı ile Normalize Edilmiş Eşvre Sıçramaları ($\ast \Rightarrow 6/7f_o$)

	2375 d/d		2965 d/d		Açıklama
	Tasarım noktası	Kısmi yük	Tasarım noktası	Kısmi yük	
Giriş basıncı-Ses	0.14	0.14			Mil hızı (1/7)
		0.29		0.29	2/7
	0.86	0.86	0.87	0.87	6/7(*)
	1.71	1.71	1.72	1.72	12/7 (**)= 7f _{bd}
	2.57	2.57	2.58	2.57	18/7 (***)= 7f _o
	3.43	3.43	3.43	3.43	**** = 14f _{bd} = 7f _{bh}
	4.29	4.29			*****
	5.14	5.14	5.15		***** = 14f _o
	6	5.98	6	6	6 (7*)
		6.83	6.87		8*
	7.71	7.69		9* = 21f _o	
	8.57	8.57		10*	
Çıkış basıncı-Ses	0.14	0.14	0.14	0.14	Mil hızı (1/7)
			0.29	0.29	2/7
		0.43	0.43		3/7 (pompa içindeki sabit kanatçıklar)
				0.49	1/2
		0.63	0.63	0.63	f _i
	0.72	0.72	0.7	0.72	5/7
	0.86	0.86	0.87	0.87	6/7 (*)
	0.99	0.99	0.99	0.99	f _{kg}
	1.29	1.31	1.28	1.28	9/7
			1.43	1.43	10/7
	1.58		1.57	1.57	11/7
	1.71	1.71	1.72	1.72	** = 7f _{bd}
	2.57	2.57	2.58	2.58	*** = 7f _o
			2.73		19/7
			3.29		23/7
	3.43	3.43	3.43	3.43	**** = 14f _{bd} = 7f _{bh}
	4.29	4.29		4.3	*****
5.14	5.14	5.15	5.17	***** = 14f _o	
5.98	5.98	6	6	6 (7*)	
6.86		6.87		8*	
7.71	7.71			9* = 21f _o	

SONUÇ

Pompa üzerinde daha önceden yapılan çalışmada [4], mekanik gürültü kaynağı olarak mil dönüşü ve kanat geçişi dikkate alınmıştır. Ses ölçümlerinin FFT spektrumlarında kanat geçiş frekansı, harmonikleriyle beraber görülmektedir. Ayrıca ses spektrumu, mekanik gürültünün baskınlığından dolayı pompa karakteristiği ile ilgili yargıları yanlış yönlendirecektir. Bu mekanik gürültü sızramalarını önlemek için hidroluk basınç verileri gerekmektedir. Ses verisi ile basınç verileri arasında çapraz doğrulama yapıldıktan sonra spektrumlarda mil dönme frekansı da görülür.

Giriş ve çıkış basınç spektrumları ses spektrumu ile doğrulandığında çıkış basıncının gürültü ile daha çok bağlantısı olduğu görülür. Pompa içinde çarkın arkasındaki sabit kanatçıkların etkisi pompa çıkış spektrumunda görülmektedir. Giriş basıncı da bu kanatçıkların etkisini yansıtır; fakat çıkış basıncı daha duyarlıdır ve kanat geçiş frekansına ek olarak dönel makinaya ait, mil dönme hızı da dahil, pek çok bilgiyi taşır [4].

Bu çalışma için ise mekanik gürültünün kaynağı daha derin incelenmiş, gürültü kaynağı olarak mil üzerindeki rulmanlar da düşünülmüştür. Görülmüştür ki, ses spektrumunda kanat geçiş frekansının tam katında olmayan sızramalar, bilye dönme frekansı, f_{bd} veya rulman dış bilezik dönme frekansı, f_e 'ya denk gelmektedir.

Bilye dönme frekansının yüksek harmoniklerinde sızrama olması bilyelerdeki hasarın habercisidir. Kanat geçiş frekansının yüksek harmonikleri pompa yapısına bağlı frekanslarca bastırılmıştır. Kanat geçiş frekansına ek olarak mil dönme frekansının harmonikleri ve sabit kanatların etkisi, akışın dönel makina içindeki yapıya ne kadar bağlı olduğunu göstermektedir.

Pompa ses verisinin pompa çıkış basıncı ile eşvre spektrumu pompanın gürültü sebepleri hakkında geniş bilgi verecektir. Bu akustik çalışmalar pompa dönüş hızı temelinde pek çok bilgi içermesine rağmen pompanın su basma yüksekliği gibi sistem karakteristiği hakkında bir bilgi yansıtmamaktadır [4].

SEMBOLLER

Q	Debi
H	Pompa basma yüksekliği
ω	Açısal hız
f	Frekans
D,d	Çap

α	Değme açısı
N	Bilye sayısı

Alt İndis

kg	Kanat geçiş
d	Tasarım noktası
o	Dış bilezik
i	İç bilezik
bh	Bilye hasar
bd	Bilye dönüş
c	Kafes

TEŞEKKÜR

Bu çalışma bir yüksek lisans tez çalışmasının devamında gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması sırasında yardımlarını esirgemeyen Dr. Songül Bayraktar'a ve tez çalışmasına temel oluşturan 104M405 no'lu projeye verdiği destekten dolayı, yazarlar TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKÇA

1. **Choi, J.S.** 2003. McLaughlin, D.K.; Thompson, D.E.; "Experiments on the Unsteady Flow Field and Noise Generation in a Centrifugal Pump Impeller"; Journal of Sound and Vibration, pp. 493-514, Vol. 263.
2. **Mongeau, L.** 1993. Thompson, D.E.; McLaughlin, D.K.; "Sound Generated by Rotating Stall in Centrifugal Turbomachines"; Journal of Sound and Vibration, pp. 1-30, Vol. 163, no. 1.
3. **Maaloum, A., Kouidri, S., Bakir, F., Rey, R.** 2003. "Effect of Inlet Duct Contour and Lack Thereof on the Noise Generated of an Axial Flow Fan"; Applied Acoustics, pp. 999-1010, Vol. 64.
4. **Şahin, F.C.** 2007. "An Experimental Study on Off-Design Performance and Noise in Small Pumps"; M. Sc. Thesis, Middle East Technical University, Mechanical Engineering Department June.
5. NMB Bearings; Data Sheet (June 2007); <http://www.nmbcorp.com/nmb_bearings.html>
6. **Tandon, N., Yadava, G.S., Ramakrishna, K.M.** 2007. "A Comparison of Some Condition Monitoring Techniques for the Detection of Defect in Induction Motor Ball Bearings"; Mechanical Systems and Signal Processing, pp. 244256, Vol. 21.
7. **Orhan, S., Aktürk, N., Çelik, V.** 2006. "Vibration Monitoring for Defect Diagnosis of Rolling Element Bearings as a Predictive Maintenance Tool: Comprehensive Case Studies"; NDT&E International, pp. 293298, Vol. 39.