

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİLYALI POLİMER YATAKLARIN GÜRÜLTÜ KARAKTERİSTİĞİNİN
DENEYSEL ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ersin KAMBUROĞLU**

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon

OCAK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİLYALI POLİMER YATAKLARIN GÜRÜLTÜ KARAKTERİSTİĞİNİN
DENEYSEL ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ersin KAMBUROĞLU
(503071209)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Aralık 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2011

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Vedat TEMİZ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Haluk EROL (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Cüneyt FETVACI (İÜ)**

OCAK 2011

ÖNSÖZ

Polimer malzemeler her geçen gün daha yaygın hale gelmekte ve mühendislik çözümlerinin içinde dâhil edilmektedir. Rulmanlı yatak malzemesi olarak da kullanılan polimerler hafifliği, titreşimleri sönümleyebilme özelliği, yağlayıcı olmadan çalışabilmeleri ve zorlu ortam koşullarına dayanıklı olmalarıyla dikkat çekmektedir. Bu çalışmada bilyalı polimer yatakların performansı gürültü karakteristiklerinin ışığında deneysel olarak değerlendirilmiştir.

Beni sıradışı mekanik özellikleriyle her zaman araştırılmaya değer bir konu olan polimerler konusunda çalışmaya teşvik eden ve çalışmalarım boyunca yönlendiren tez danışmanım Y. Doç. Dr. Vedat TEMİZ'e, deneysel çalışmaların planlanması ve sonuçların değerlendirilmesi konusunda desteklerini esirgemeyen Y. Doç. Dr. Zeynep PARLAR ve Doç. Dr. Haluk EROL'a, deney düzeneğinin kurulmasında ve iyileştirilmesinde en büyük pay sahibi olan Tekniker Orhan KAMBUROĞLU'na ve deney numunelerinin mikroskop görüntülerinin alınmasında yardımcı olan Ar. Gör. Safa BODUR'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2010

Ersin KAMBUROĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	3
2. BİLYALI POLİMER YATAKLAR.....	7
2.1 Uygulama Alanları.....	8
2.2 Kullanım Şekli	8
2.3 Çalışma Sıcaklıkları ve Termal Genleşme	9
2.4 Yük Taşıma Kapasiteleri	10
2.5 Montaj Sıkılıkları	11
3. POLİMERLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	13
3.1 Polipropilen Yapısı.....	14
3.1.1 Polipropilenin sıcaklık verileri	15
4. POLİMERLERİN TRİBOLOJİK DAVRANIŞI.....	17
4.1 Polimerlerde Sürtünme Katsayısı.....	17
4.1.1 Kayma hızı etkisi.....	18
4.1.2 Yük etkisi	19
4.1.3 Sıcaklık etkisi	20
4.2 Polimerlerle Yuvarlanma Sürtünmesi	21
4.3 Polimerlerde Aşınma Davranışı	23
4.3.1 Metalik olmayan malzemelerin aşınması.....	23
4.3.2 Dolgusuz polimerlerin aşınması.....	23
5. GÜRÜLTÜ DÜZEYİ ÖLÇÜMÜ	25
5.1 Ses Düzeyleri ve Desibel Kavramı.....	25
5.2 Oktav Kavramı.....	27
5.3 Ağırlıklı Ses Düzeyleri	27
6. DENEY DÜZENEGİ VE DENEYLERİN YAPILIŞI.....	29
6.1 Deney Düzenegi	29
6.2 Deneylerin Yapılışı ve Deney Yönteminin Optimizasyonu	33
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	35
7.1 Değerlendirme Sonucu ve Öneriler	45
KAYNAKLAR.....	47
EKLER.....	49
ÖZGEÇMİŞ.....	59

KISALTMALAR

UHMWPE	: Aşırı yüksek moleküler ağırlıklı polietilen
PP	: Polipropilen
PTFE	: Politetrafloretillen
PMMA	: Polimetil metakrilat
PVC	: Polivinilklorür
PE	: Polietilen
LDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
dB	: Desibel
SIL	: Ses şiddeti düzeyi
PWL	: Ses gücü düzeyi
SPL	: Ses basınç düzeyi

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 6.1: Kullanılan bilyalı polimer yatak tiplerinin teknik verileri	32

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tek sıralı bilyalı polimer yatak	2
Şekil 1.2 : Korozyon ortamında polimer ve metal yataklar	3
Şekil 2.1 : Çeşitli tiplerde bilyalı polimer yataklar	7
Şekil 2.2 : Çeşitli polimer malzemelerin çalışma sıcaklığı aralıkları.....	9
Şekil 2.3 : Çeşitli malzemelerin ısı genleşme katsayıları	10
Şekil 2.4 : Bilyalı polimer yataklar için düzeltme faktörleri	11
Şekil 3.1 : Monomer ve polimer zinciri yapıları.....	13
Şekil 3.2 : İzotaktik (üstte) ve sindiyotaktik (altta) polipropilen yapısı	14
Şekil 4.1 : Tribolojik temas yüzeyleri	17
Şekil 4.2 : Yuvarlanma sürtünmesinde sürtünen yüzeylerin modeli.....	21
Şekil 4.3 : Yuvarlanma sürtünmesinin batma miktarı ile değişimi	22
Şekil 4.4 : Yuvarlanma sürtünmesinde dinamik sürtünme katsayısı değişimi	22
Şekil 5.1 : Ses dalgası etki alanının kaynaktan uzaklığa bağlı olarak değişmesi	26
Şekil 5.2 : Ses düzeyi ağırlık filtreleri	28
Şekil 6.1 : Deney düzeneğinin şematik görünüşü	29
Şekil 6.2 : Oda dışı deney düzeneğinin görüntüsü	30
Şekil 6.3 : Akustik odada sükûnet halindeki ses basınç düzeyi	31
Şekil 6.4 : 60, 62 ve 64 serisi yatakların birinci doğal frekans aralıkları	32
Şekil 6.5 : Deney yatağı ve yükleme düzeneği.....	34
Şekil 7.1 : Yağlı çalışan 6004 serisi metal ve polimer yatakların kıyaslaması.....	36
Şekil 7.2 : 700 d/dak çalışma hızında yağlı ve yağsız 6004 yatakların kıyaslaması..	37
Şekil 7.3 : 6004 serisi yataklarda yük ve yüksek frekans eşdeğer ses basıncı ilişkisi	37
Şekil 7.4 : Bilyalı PP yatakta kafes aşınması	38
Şekil 7.5 : 6204 serisi yataklarda yük ve yüksek frekans eşdeğer ses basıncı ilişkisi	39
Şekil 7.6 : 6004-HR22T2 kodlu yatağın ses basıncı - devir sayısı eğrisi (80N yük) .	40
Şekil 7.7 : 6204-HR22T2 kodlu yatağın ses basıncı - devir sayısı eğrisi (120N).....	41
Şekil 7.8 : HR22Q2 kodlu cam bilyalı yataklarda ses basıncı - devir sayısı eğrisi ...	41
Şekil 7.9 : Yağlı polimer yataklarda devir – ses basıncı ilişkisi	42
Şekil 7.10 : 6204 HR22T2 kodlu yatakta ses basıncı – sıcaklık ilişkisi.....	42
Şekil 7.11 : Kafesi parçalanmış 6204 serisi bilyalı yatak.....	43
Şekil 7.12 : Kuru çalışmış 6204 serisi metal bilyalı yatak iç bileziğinin görüntüsü ..	44
Şekil 7.13 : Yağlı çalışmış 6204 serisi metal bilyalı yatak iç bileziğinin görüntüsü ..	44

SEMBOL LİSTESİ

T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı
T_m	: Erime sıcaklığı
R	: Yuvarlanma elemanı yarıçapı
I	: Şiddet
W	: Güç
p	: Basınç
f	: Frekans
λ	: Dalga boyu
c	: Hız
d	: Yatak iç çapı
D	: Yatak dış çapı
B	: Yatak genişliği

ALT İNDİSLER

ref : Referans değer

BİLYALI POLİMER YATAKLARIN SÜRTÜNME KARAKTERİSTİĞİNİN DENEYSEL ANALİZİ

ÖZET

Bilyalı polimer yataklar yüksek korozyon dirençleri, titreşim sönümleme kabiliyetleri, yağlama gerektirmeden kullanılabilmeleri ve düşük ağırlıklarıyla bazı koşullarda geleneksel metal rulmanlı yataklara tercih edilmektedir. Polimer yatakların sessizlik ve yağlamayla ilgili avantajlarının ve bunların tabi olduğu koşulların daha iyi anlaşılabilmesi için yağlı ve yağsız koşullardaki gürültü karakteristiklerinin anlaşılması önemlidir. Bilyalı polimer yatakların ömürlerinin analitik olarak hesaplanamaması deneysel verilerin önemini arttırmaktadır.

Polipropilen bileziklere sahip polimer yatakların farklı yükler ve devir sayıları etkisinde gürültü karakteristiklerinin anlaşılabilmesi için yarım parmak mikrofonla 1/3 oktav bandında 12,5 kHz'e varan frekanslarda ses basınç düzeyi ölçümleri yapılmıştır. Akustik odada yapılan ölçümlerde 0...1400 d/dak arasında kademesiz olarak ayarlanabilen AC motor kullanılmıştır. Deneyde kullanılan yataklar 6004 ve 6204 serisi cam ve paslanmaz çelik bilyalı yataklardır. 6004 serisi geleneksel metal yataklar da kıyaslama amacıyla test edilmiştir.

Kuru ve yağlı koşullarda yapılan ölçümlerin değerlendirilmesinde ağırlıkla deney yataklarının dış bileziklerinin birinci doğal frekanslarının bulunduğu 2–12,5 kHz aralığı temel alınmıştır. Hem yağlı hem kuru koşullarda artan hızla gürültü düzeyinin artması genel bir eğilimdir. Yükün etkisinin ise değişken olduğu görülmüştür. Cam bilyalı yatakların kuru çalışmasında tutarlı sonuçlar elde edilirken metal bilyalı yatakların genel eğilimini tespit etmek zor olmuş ve bunun sebepleri irdelenmiştir. Aynı yağlama koşullarında ve sönümleme özelliği etkin olmadığında bilyalı polimer yatakların, bunların dengi olan kaliteli metal yataklara kıyasla daha gürültülü olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçları bilyalı polimer yatakların gürültü davranışının tam olarak anlaşılabilmesi için sıcaklık parametresinin ayrıca ele alınmasının gerektiğini göstermiştir.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF POLYMER BALL BEARING NOISE CHARACTERISTICS

SUMMARY

Polymer ball bearings are preferred to metal roller bearings, in certain conditions, due to their low weight, corrosion resistance, self lubrication and silent running properties. It's substantial to determine the noise characteristics of polymer ball bearing in order to understand their mentioned advantages and the conditions in which they are valid. The fact that it's not possible to determine the lifetimes of polymer bearings stresses the importance of experimental data.

Sound pressure level measurements of polymer bearings with polypropylene rings are made with a ½ inch microphone in 1/3-octave bands, in frequencies up to 12,5 kHz under various radial loads and rotational speeds. Those measurements were realized in an acoustic chamber by using an AC motor with adjustable rotational speed between 0...1400 rpm. 6004 and 6204 series bearings with glass and stainless steel balls were analysed in the experiments. 6004 series conventional metal ball bearing were also tested for comparison purposes.

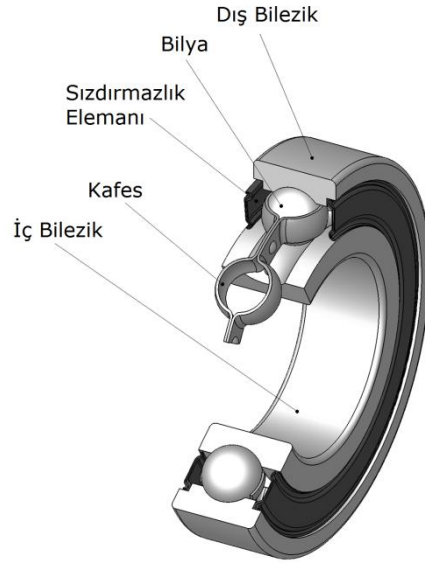
2–12,5 kHz frequencies that are close to the first natural frequencies of tested bearings were predominantly analysed in test results for dry and lubricated conditions. In both dry and lubricated conditions an increase in rotational speed was accompanied by an increase in noise level. However the effect of load was found to be inconsistent. Polymer bearings with glass balls always yielded consistent results while the tendencies of the bearings with steel balls were difficult to determine due to inconsistency in results and possible reasons for this condition are discussed. Polymer bearings were found to be noisier than their metallic counterparts, at the same conditions, in case of vibration dampening not being a factor. Experimental results have shown that temperature should be individually analysed as a parameter in order to completely understand the noise behaviour of polymer ball bearings.

1. GİRİŞ

İnsanlık tekerleğin icadıyla birlikte sürtünme katsayısını yenmenin en etkili yollarından biri olan yuvarlanma hareketini lojistik gereksinimler için kullanmaya başlamıştır. Yağlamanın sürtünmeyi azaltmak amacıyla etkin olarak kullanılmaya başladığı dönemlerde bile daha az enerji gerektiren yuvarlanma hareketi önemini yitirmemiştir. Günümüzün karmaşık makinelerinde de hareketli ve hareketsiz parçaların bir arada bulunabilmesi amacıyla yuvarlanma hareketinden yararlanılmaktadır. Yuvarlanma elemanı içeren yatakların tipik örneklerinden biri bilyalı yataklardır.

Her ne kadar yuvarlanma kavramına tekerleğin icadından beri aşına olsak da en ilkel haliyle ilk rulmanlı (yuvarlanmalı) yataklar M.S. 50 yılında Roma uygarlığında kullanılmış ve modern rulmanlı yataklar ancak Endüstri Devrimi ile birlikte hayatımıza girmiştir. Fakat rulmanlı yatakların kaymalı yataklara alternatif olarak kabul edilmesi kolay olmamıştır. 20.yy'da, özellikle 1960 sonrasında gelişmiş yatak çeliklerinin üretilmesi, imalat yöntemlerinin hassasiyetinin artması ve imalat maliyetlerinin düşmesi ile kaymalı yataklara alternatif olabilecek kalite ve dayanıklılıkta rulmanlı yatakların imal edilmesi mümkün hale gelmiştir. Uçaklarda kullanılan gaz türbin motorların yüksek hızlarda çalışacak yataklar gerektirmesi de bilyalı yatakların gelişmesini tetikleyen bir unsur olmuştur [1].

Günümüzde kullanılan rulmanlı yataklar büyük çoğunlukla iki makine elemanı arasında dönme hareketine imkân vermek amacıyla kullanılır. Rulmanlı yatakların yaygın bir türü olan bilyalı yatakların en temel hali bilyalardan, bilyaların arasında yuvarlanacağı iç ve dış bileziklerden ve bilyaları bir arada, birbirine göre belli mesafelerde tutan bir kafesten oluşur. Ayrıca yağlı yatağın yağsız ortamdan ayrılmasını gerektiren durumlarda sızdırmazlık elemanları kullanılır.



Şekil 1.1: Tek sıralı bilyalı polimer yatak

İlk endüstriyel bilyalı yatakların bilyalarında ve bileziklerinde sertleştirilmiş çelikler kullanılmıştır. Sertleştirilmiş çelikler hâlâ başlıca rulmanlı yatak malzemesi olma unvanını koruduğu halde teknolojik gelişmeler seramik, polimer ve kompozit gibi çeşitli malzemelerin de özel amaçlarla bu tür yataklarda kullanılmasına olanak tanımıştır. Örneğin yüksek basma mukavemetli seramikler yüksek maliyetli olmakla beraber daha hafif, daha yüksek sıcaklıklara dayanan ve kötü yağlama koşullarına karşı daha dayanıklı olan rulmanlı yatakların imalatında kullanılmıştır.

Her ne kadar bilyalı yatakların başa çıkması gereken en önemli zorluklar yüksek hızlar, büyük yükler ve yüksek sıcaklıklar gibi görünse de teknolojik ve insani gereksinimler daha farklı ihtiyaçlara cevap verebilen yatakların da talep edilmesine neden olmuştur. Korozyif ortam koşullarında veya yağlama yapılamayan ortamlarda çalışabilmek olası gereksinimlerden ilk akla gelenlerdir. Ayrıca tıp ve gıda uygulamalarındaki hijyen gereksinimi ve her ortamda yaşam kalitesini arttıracak gürültüsüz çalışma özelliği de yaşam standartlarının yükseldiği günümüz koşullarında gitgide daha çok aranan özellikler haline gelmiştir. Endüstriyel anlamda ikincil diyebileceğimiz bu beklentiler polimer yataklar tarafından büyük ölçüde karşılanmaktadır. Polimer yatakların bu gereksinimleri bir arada ne kadar etkili şekilde karşılayabildiği ise araştırılmaya değer bir konudur.



Şekil 1.2: Korozyon ortamında polimer ve metal yataklar [2]

Bilyalı polimer yataklar yağlama gerektirmeden çalışabildiği halde, rulmanlı yatak imalatçıları bunların gerçekten gürültüsüz çalışabilmeleri için yağlama gerektiğini kabul eder [2]. Dahası SKF gibi büyük yatak imalatçıları polimer yatakların mutlaka kullanılacakları ortamda test edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır [3]. Bu durum bilyalı polimer yatakların gürültü davranışının incelenmesinin sessiz çalışma gereksiniminin hangi koşullarda ne ölçüde sağlanabileceği bilgisini sağlamakla birlikte bu tür yatakların farklı çalışma hızları ve yükler altında göstereceği performansa da ışık tutabileceğini düşüncesini doğurur.

1.1 Literatür Özeti

Çelik bileziklere sahip geleneksel rulmanlı yatakların gürültü davranışına dair çok sayıda bilimsel çalışma yapılmıştır. Teruo Igarashi bilyalı yatakların gürültüsüyle ilgili yaptığı deneylerde 8 m uzunluğunda, 5 m genişliğinde ve 3 metre yüksekliğinde, kaya yünüyle kaplı bir anekoik oda kullanmıştır. Radyal yükün yanında eksenel yükün etkisini de inceleyen Igarashi, basit bilyalı yatak deney düzeneğinde gürültünün dış bilezik titreşimlerinden kaynaklandığı sonucuna varmıştır [4].

Igarashi yatak gürültüsü deneylerini monte edilmiş haldeki bir bilyalı yatak üzerinde sürdürmüştür. Yaptığı deneylerde yatak gürültüsünün 1 kHz'in üstündeki frekanslarda ortaya çıktığını, gürültü frekanslarının genellikle çalışma hızından etkilenmediğini ve ses basıncının çalışma hızıyla arttığını ortaya koymuştur. Igarashi monte edilmiş yataklardaki temel gürültünün bileziklerin titreşiminden

kaynaklandığını, kafes titreşimlerinin de buna katkıda bulunduğunu tespit etmiştir. Bu sonuçlar monte edilmiş yatakla basit deney düzeneğindeki yatağın gürültü karakteristiği arasında temelde bir fark olmadığını ortaya koymuştur [5].

Igarashi monte edilmiş haldeki bilyalı yatakların gürültüsü üzerindeki çalışmalarını sürdürmüş ve montaj sıklığı ile radyal boşluğun gürültü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneysel bulgulara göre radyal boşluğun artması toplam ses basıncının düşmesini sağlamıştır. Bilezikler arası radyal kuvvetlerin ve bileziklerle bilyalar arası temas alanının artmasıyla birlikte toplam ses basıncının arttığını belirlemiştir. Ayrıca gürültü frekanslarının dış bilezik sıklığıyla arttığını, küçük radyal boşluk durumunda dış bilezik montajı sıkılaştıkça gürültü düzeyinin arttığını, büyük radyal boşlukta ise dış bilezik montajı sıkılaştıkça gürültü düzeyinin azaldığını belirtmiştir [6].

Igarashi'nin trifaze alternatif akım endüksiyonlu elektrik motorunun bilyalı yatakları üzerinde yaptığı deneyler monte edilmiş bilyalı yatakların gürültü davranışı üzerinde ek bilgiler sağlamıştır. Igarashi'ye göre monte edilmiş bir bilyalı yatağın gürültüsüne etki eden faktörler (1) yağlayıcı, (2) dönme hızı, (3) yük, (4) radyal boşluk, (5) dönen milin titreşimleri, (6) bileziklerin sıklığı ve (7) yatak yuvasının rijitliğidir. Deneyler monte edilmiş halde büyük radyal boşluğa sahip yatakta titreşim meydana geldiğini ve bu titreşimin küçük bir ön yüklemeyle giderilebildiğini göstermiştir. Küçük pozitif radyal boşluk gürültü düzeyini en aza indirmiştir. Yatak yuvasının rijit olması da yatak gürültüsünü azaltmıştır [7].

Igarashi, bilyalı yatak gürültüsünün mekanizması üzerine yaptığı son çalışmalarda gürültünün temelinde bilya ve bilezik arasındaki temas bölgesinin yay karakteristiğinin hareket sırasında değişmesinin yattığı kanaatine varmıştır. Bilezikler üzerinde bu değişken davranıştan kaynaklanan doğal eğilme titreşimleri gürültünün sebebi olarak gösterilmiştir [8].

Lucht ve Scanlan tarafından yapılan araştırmada yuvarlanma elemanı içeren yataklardaki gürültünün objektif ve sübjektif yollarla tespit edilen değerleri deneysel ve istatistiksel yöntemlerle kıyaslanmıştır. Sübjektif değerler için yatak dış bileziğine bağlanmış bir ivmeölçer, objektif değerler içinse yatağa yakın bir mikrofonu dinleyen 21 kişilik jürinin değerlendirmeleri referans alınmıştır. Neticede gürültünün insan tarafından algılanmasına dayalı sübjektif değerlerle ivmeölçerin verdiği

titreşim değerleri 1/3 oktav bantlarında 315 Hz ile 10 kHz arasında büyük tutarlılık göstermiştir [9].

1978'de Nagamatsu ve Fukuda dikey halde saniyede 900 devire varan çok yüksek hızlarda dönen bilyalı yatakların gürültüsünü çeşitli malzemelerden (plastik ve çelik) yatak yuvalarıyla desteklenir halde ölçmüş ve analiz etmiştir. Sonuçlar 50 devir/saniye gibi düşük hızlarda yapılan gürültü araştırmalarıyla kıyaslanmıştır. Düşük hızlarda toplam ses basıncı yumuşak plastik yuvalarda daha düşük, sert metal yuvalarda daha yüksek olduğu halde yüksek hızlarda bunun tersi bir durum gözlenmiştir. Ana frekans bileşenlerinin dönüş frekansının integral katları ile dönen bileşenlerin doğal frekanslarından oluştuğu saptanmıştır [10].

Jayaram ve Jarchow, 1978 yılında, bilyalı yatak gürültüsünün çalışma hızı, yük ve yağlayıcı gibi harici etkenlerden nasıl etkilendiğini araştırmıştır. Elde ettikleri bulgulara göre çalışma hızı ve yağlayıcı yatak gürültüsünü ciddi biçimde etkilemektedir. Buna göre daha yüksek hız ve daha viskoz yağlayıcı gürültü düzeyini arttırmaktadır. Yük artışı ise gürültü düzeyini belirgin bir biçimde etkilememektedir [11].

FAG bünyesinde çalışan mühendislerden Oswald Bayer bilyalı yatak gürültüsünü etkileyen faktörler üzerine gerçekleştirdiği çalışmada bilyaları bir arada tutan kafesin doğrudan havaya gürültü yaydığını ve yatağın gürültü karakteristiğini etkilediğini belirtmiştir. Bayer düşük yüklerde gerçekleşen kafes kaymasının düzenli olmadığı durumda kafesin bilezikler arasında öngörülemeyen yollarda sürüklendiğini ve rahatsız edici bir gürültüye neden olduğunu söylemiştir [12].

Jong-Eok Ban ve arkadaşları yuvarlanma elemanı içeren yataklar için bir matematik model önermiş ve bu modelin çözümü sonucunda radyal yük ve iç bileziğin dönme hızı arttıkça ses basınç düzeyinin artacağı sonucuna varmıştır. Matematik modelden yola çıkarak yaptıkları diğer bir tespit ise radyal boşluğun artmasıyla yatak gürültüsünün azaldığı yönündedir. Bu çalışma deneysel verilerle desteklenmemiştir [13].

Görüldüğü gibi geleneksel metal bilezikli bilyalı yatakların gürültü karakteristiği hakkında çok sayıda çalışma yapılmış ve yatak gürültüsünün kaynakları ve dış etkenlerin yatak gürültüsüne etkileri büyük ölçüde açıklığa kavuşturulmuştur. Polimer bileziklere ve polimer kafeslere sahip yatakların gürültüsü ise şimdiye kadar

ayrı bir araştırma konusu olarak ele alınmamıştır. Fakat polimer yataklarda sürtünen yüzeylerin farklı malzemelere sahip olması, polimerlerin ısı genleşme değerlerinin metallere kıyasla çok yüksek olması, buna karşılık ısı iletkenliklerinin düşük olması, polimer yatakların metaller kadar rijit olmaması ve yağlayıcı olmadan çalışabilmesi bu yataklarda, yatak gürültüsünü etkileyebilecek faktörlerin metal yataklara kıyasla daha değişken olabileceği öngörüsünü doğurur.

Polimer yatakların bazı uygulamalarda tercih sebebi olmasındaki etkenlerden biri gürültüsüz çalışıklarına dair söylemlerdir [2,3]. Yatak imalatçılar, yağsız da çalışabilen bilyalı polimer yatakların özellikle yağlı halde insan tarafından sessiz kabul edilebilecek düzeyde gürültüsüz olduğunu belirtmektedir [2]. Fakat bu tür yatakların gürültü karakteristiğinin detaylı olarak incelendiği bir bilimsel yayın bulunmamaktadır. Hâlbuki polimer yatakların yağlama gerektirmeden çalışabiliyor olması ve gürültü bakımından avantajlı olması bu yatakların sürtünme, aşınma ve yağlama davranışını belirleyen tribolojik özellikler bakımından bir fark yarattığını ortaya koyar. Gürültüsüz çalışma avantajının da tribolojik özelliklerdeki bu farklılıktan ileri gelmesi ilk akla gelen olasılıktır ve incelenmeye değerdir. Sunulan çalışmada bilyalı polimer yatakların gürültü karakteristiğiyle ilgili araştırma eksikliği göz önüne alınmış ve SKF marka polipropilen bileziklere ve polipropilen kafese sahip yatakların farklı yüklerde ve farklı hızlarda yağlı ve yağsız hallerdeki gürültü karakteristikleri incelenmiş, bunlar eşdeğer geleneksel metal yatakların performansıyla kıyaslanmıştır. Ayrıca polimer malzemelere özgü sürtünme ve aşınma davranışlarıyla ilgili geçmişte yapılan çalışmaların bilyalı polimer yatakların gürültü davranışıyla ilişkilendirilip ilişkilendirilemeyeceği tartışılmıştır.

2. BİLYALI POLİMER YATAKLAR

Bilyalı polimer yataklar polimer bileziklerden, paslanmaz çelik, cam veya diğer malzemelerden imal edilmiş bilyalardan ve polimer kafesten oluşur. Polimerler çeşitli malzemelerden ve malzeme kombinasyonlarından oluşabilir. Malzeme seçimi kullanım koşullarına bağlıdır. Yatak imalatında sürtünme katsayısı düşük, aşınma ve yorulma direnci yüksek polimerler kullanılır. Kullanılan polimerlerin düşük sürünme eğilimi sayesinde kullanım ömürleri boyunca yüksek boyutsal kararlılık sağlanır.



Şekil 2.1: Çeşitli tiplerde bilyalı polimer yataklar [3]

Polimer yatakların çelik yataklara kıyasla en önemli avantajlarından biri korozyona ve kimyasallara dirençli olmalarıdır. En önemli dezavantajları ise taşıdıkları azami yüklerin ve azami çalışma hızlarının geleneksel çelik yataklara kıyasla çok daha düşük olmasıdır. Fakat yüksek özgül mukavemetleri (mukavemetin ağırlığa oranı) polimer yataklar için önemli bir özellik olup, ağırlığın önemli bir tasarım parametresi olduğu durumlarda tercih edilmelerini sağlayabilmektedir.

Polimer yatakların dikkat çekici bir avantajı da tasarımda yağlama açısından serbestlik sağlamasıdır. SKF Group dâhil çeşitli kaynaklarda polimer yatakların yağlayıcı gerektirmeden kuru halde çalışabildiği belirtilmektedir [2,3].

Neticede polimer yatakların avantajları şöyle özetlenebilir:

- Korozyon ve kimyasal direnci
- Düşük sürtünme katsayısı ve yağlayıcı gerektirmeme
- Düşük ağırlık (Çelikten %80 daha az)
- Sessiz çalışma
- İyi sönümlleme
- Elektrik yalıtkanlığı
- Düşük maliyet

2.1 Uygulama Alanları

Bilyalı polimer yatakların tipik olarak kullanıldığı durumlardan biri rutubet ve kimyasal direncinin önemli olduğu durumdur. Bu uygulamalarda çeliğin kullanılması ya mümkün olmamakta ya da kısıtlamalara tabi olmaktadır. Bu koşullarda teknik ve ekonomik açıdan en makul çözüm polimer yataklardır.

Polimer yatakların yağlayıcı gerektirmeden kullanılabiliyor olması yağlayıcıların kullanılamayacağı durumlarda tercih edilmelerini sağlar. Bu durumlara örnek olarak gıda sektöründe hijyen gereksinimleri gösterilebilir. Polimer yatakların kullanılmakta olduğu sanayi dalları şöyle özetlenebilir:

- Gıda ve içecek
- Tıp
- Isıtma ve iklimlendirme
- Kimyasal ve elektro kaplama
- Film, fotoğrafçılık ve eczacılık
- Tekstil
- Elektro teknoloji
- Tüketici ürünleri
- Ofis ürünleri
- Model ve hafif konstrüksiyon
- Ölçüm ekipmanı
- Malzeme taşıma
- Vakum uygulamaları

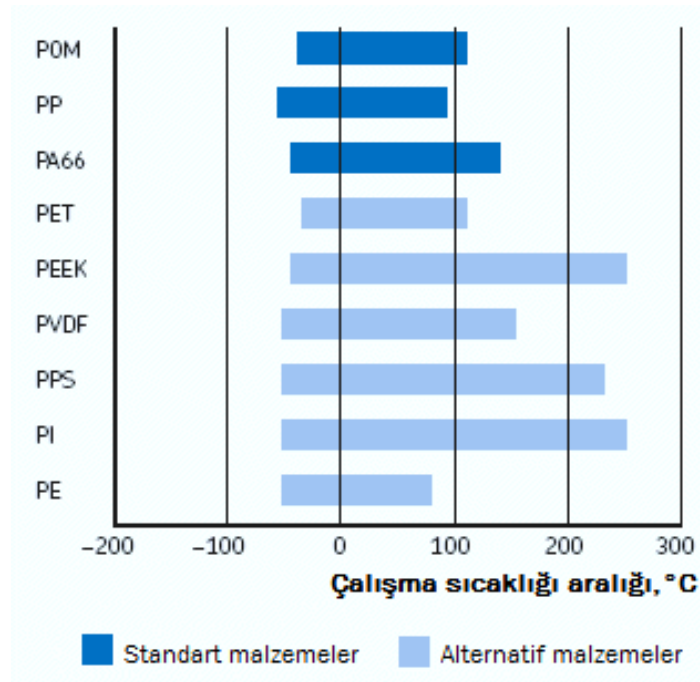
2.2 Kullanım Şekli

Polimerlerin değişken fiziksel özellikleri nedeniyle, metal yatakların aksine, polimer yatakların ömürlerini hesaplamak için önerilebilecek analitik bir hesap yöntemi bulunmamaktadır. Bilyalı polimer yatakların viskoelastik karakteri ve yüksek termal

genleşme eğilimi, çeşitli ortam koşullarında, laboratuvar deneylerinde öngörülemezlik etkilerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir [3].

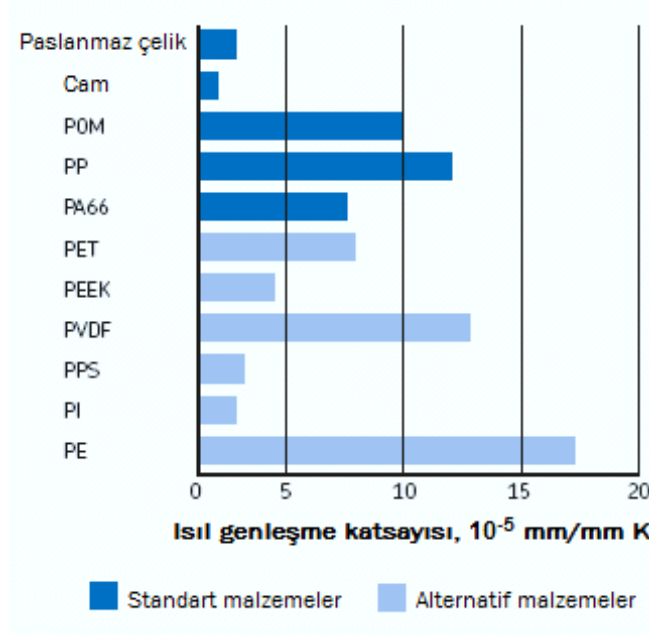
2.3 Çalışma Sıcaklıkları ve Termal Genleşme

Kimyasal direncin yanı sıra çalışma sıcaklığı da uygun yatak malzemesinin seçiminde anahtar bir unsurdur. Şekil 2.2’de çeşitli polimer malzemeler için çalışma sıcaklığı aralıkları verilmiştir. Polimerlerin maksimum çalışma sıcaklığını belirleyen temel faktör ısıl deformasyon sıcaklığıdır. Bu sıcaklığa ulaşan polimerler kalıcı şekil değişimine uğrar.



Şekil 2.2: Çeşitli polimer malzemelerin çalışma sıcaklığı aralıkları [3]

Çalışma sıcaklığı, polimerin istenen fiziksel özellikleri koruduğu aralığı belirtmenin yanında, termal genleşme özelliği açısından da önemlidir. Zira polimerler sıcaklık etkisiyle çeliğe kıyasla 10 kata kadar daha fazla genleşir. Şekil 2.3’te çeşitli polimerlerin termal genleşme özelliği gösterilmiştir. Termal genleşme yatağın bilezikleri arasındaki iç boşluğu etkilediği için mil ve yuva toleransları tasarlanırken dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.3: Çeşitli malzemelerin ısı genleşme katsayıları

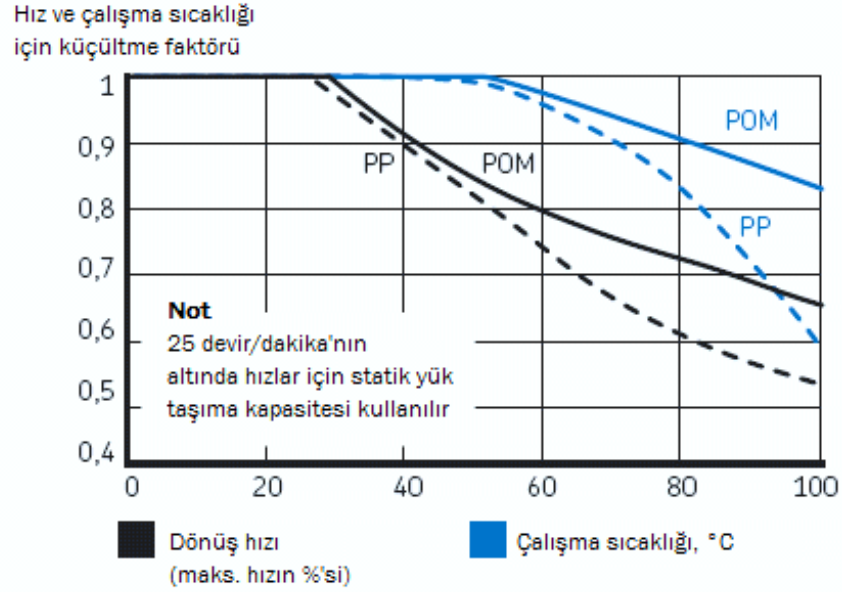
2.4 Yük Taşıma Kapasiteleri

Yatak imalatçıların kataloglarında her yatak için statik ve dinamik yük taşıma kapasiteleri verilir. Statik yük taşıma kapasitesi bir yatağın durağan halde, yuvarlanma unsurlarına ve çalışma yoluna zarar vermeden taşıyabileceği maksimum yükü belirtir. Dinamik yük taşıma kapasitesi ise yatağın hareketli halde taşıyabileceği en büyük yükü belirleyen bir büyüklüktür.

Mevcut teknoloji polimer yatakların dinamik yük taşıma kapasitesinin analitik olarak hesaplanmasına olanak tanımamaktadır. Bu sebeple dinamik yük taşıma kapasitesi verileri yatağın uygulamaların büyük çoğunluğunda işlevini gerektiği gibi yerine getirebildiği sınır yük değerini belirtir [3].

Polimer yatakların sıcaklığa bağlı dinamik yük taşıma kapasitesi analitik olarak tespit edilemediğinden hesaplanamadığından imalatçı firma Şekil 2.4'te görülen grafiğin kullanılmasını önermektedir. İlgili grafikte polipropilen ve polioksimetilen yatakların normal çalışma koşullarındaki yük taşıma kapasitelerinin artan sıcaklık ve devir sayısına bağlı olarak azalması gösterilmektedir. Bu iki değişken (sıcaklık ve devir sayısı) için küçültme faktörleri ilgili grafikten yüzde olarak saptanabilmektedir. Maksimum yük taşıma kapasitesine küçültme faktörlerinin uygulanması sonucunda elde edilen yeni yük taşıma kapasitesi yatağın normal bir şekilde işlevini yerine getirebileceği koşulu verir. Daha önce de belirtildiği gibi çalışma koşuluna göre

yatağın ömrünü hesaplamak için kullanılabilecek bir hesap yöntemi bulunmamaktadır. Uyarlanmış yük taşıma kapasitesinin yatağın işlevini uygun şekilde yerine getirebileceği üst sınır olduğu kabul edilir [3].



Şekil 2.4: Bilyalı polimer yataklar için düzeltme faktörleri [3]

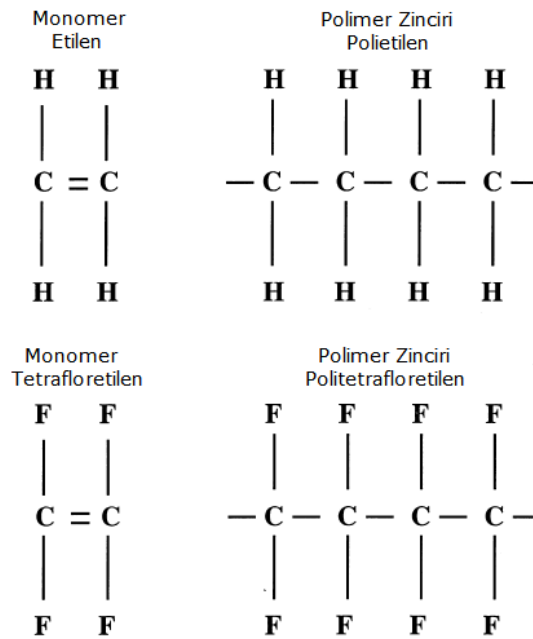
2.5 Montaj Sıkılıkları

Termal genleşmeler sebebiyle mil ve yuva sıkılıkları yatağın çalışma boşluğunu ve dolayısıyla çalışma özelliklerini etkiler. Bu nedenle imalatçı firma kataloğunda sadece bir bilezikte (mil veya yuva üzerinde), 20 µm sıkılıkta sıkı geçme yapılması önerilmektedir. Diğer bilezik hafif boşluklu geçme olmalıdır. Hiçbir durumda iki bilezikte de sıkı geçme uygulanmamalıdır. Aksi takdirde yetersiz çalışma boşluğu yatağın ömrünü kısaltır [3].

3. POLİMERLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Polimerler monomer adı verilen temel kimyasal bileşiklerin sentetik olarak bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Bu şekilde elde edilen uzun molekül zincirleri polimerleri oluşturur. Tüm polimerler karbon tabanlı bileşiklerden elde edilir. Bu temel bileşiklerin tipik bir örneği karbon ve hidrojen atomlarından meydana gelen etilendir. Etilen monomerlerinin kovalent bağlarla arka arkaya dizilmesi polietilen denen polimer zincir yapısını oluşturur.

Elde edilen en uzun polimer zinciri aşırı yüksek moleküler ağırlıklı polietilendir (UHMWPE). Bu yapıda yarım milyona kadar varan CH_2 molekülünden oluşan zincirler oldukça dayanıklı bir yapı sağlar. Bu malzeme kalça eklemi gibi yapay eklemlerin yataklanmasında kullanılan önemli bir malzemedir [15].



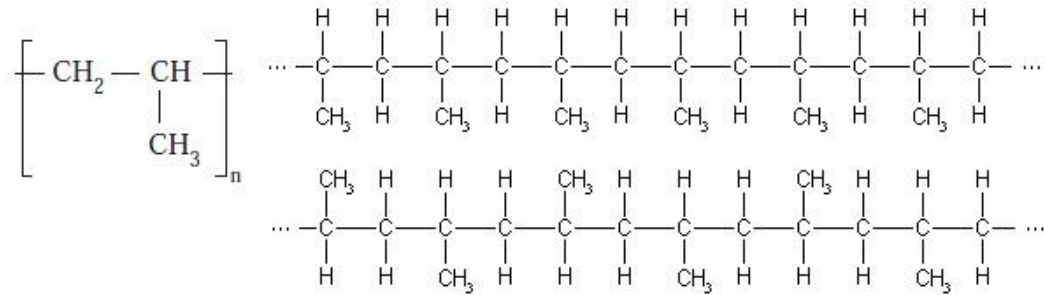
Şekil 3.1 : Monomer ve polimer zinciri yapıları [15]

Polimer malzemeler meydana geldikleri polimer zincirlerinin aralarında ne şekilde bağlandığına göre termoplastik, termoset ve elastomer olarak sınıflandırılır. Termoplastik polimerler aralarında zayıf Van der Waals bağları olan zincir yapılarından oluşur. Bu tür polimerler erime sıcaklığına yaklaştıkça zincir hareketleri

birbirinden bağımsızlaşır ve polimer yumuşamaya başlar. Erime sıcaklığının üstünde polimerler eriyik haline gelir. Sıcaklık arttıkça eriyiğin vizkozitesi düşer. Bu eriyik tekrar soğutulduğunda termoplastik polimer zincirleri yeniden oluşabilmektedir. Dolayısıyla bir termoplastiğin eritilip yeniden şekillendirilmesi mümkündür. Bu sayede termoplastik polimer granülleri sıcaklık ve basınç altında eriyik haline getirilerek tek aşamada kalıba enjekte edilerek şekillendirilebilir. Sunulan çalışma kapsamındaki deneylerde kullanılan yatakların bilezik ve kafes malzemesi olan polipropilen termoplastik polimerdir.

3.1 Polipropilen Yapısı

Polipropilen dünya çapında kullanılma miktarı bakımından önde gelen polimer türlerinden biridir. İlk defa 1957’de ticari amaçla kullanılan polipropilen mükemmel elektrik yalıtkanlığı, kimyasal direnç ve nem direnci özelliklerine sahiptir. Görece yüksek sıcaklıkta da pek çok kimyasala karşı dirençlidir ve oda sıcaklığında organik solventlerin hiçbirinde çözünmez [16].



Şekil 3.2 : İzotaktik (üstte) ve sindiyotaktik (altta) polipropilen yapısı

Polipropilen izotaktik (i-PP), sindiyotaktik (s-PP) veya ataktik (a-PP) yapıda imal edilebilir. Genellikle polimerlerin %90’ından fazlası izotaktik yapıdadır. İzotaktik polipropilen CH₃ moleküllerinin aynı yönde dizildiği yapıdır. Yoğunluğu 0,90 ila 0,91 g/cm³ arasında olan polipropilen ticari termoplastiklerin en hafiflerinden biridir. Polipropilen, yüksek kristallik özelliği sayesinde yüksek çekme mukavemeti, rijitlik ve sertlik gösterir. Ortama bağlı gerilmeli çatlamadan etkilenmez. Fakat termal, ışıksal ve oksitleyici bozunmaya karşı diğer bir yaygın ticari polimer olan polietilenden daha az kararlıdır. Polipropilenin daha kararlı hale getirilmesi için termal stabilizörler, UV soğurucular ve antioksidanlarla takviye yapılır [16].

Polipropilen ürünleri enjeksiyon kalıplama, hava basınçlı kalıplama gibi yöntemlerle elde edilebildiği gibi fiber veya filaman şeklinde ya da film veya ekstrüzyon kaplama şeklinde kullanılabilir. Enjeksiyon kalıplama ürünleri toplamda imal edilen polipropilenin yaklaşık yarısına tekabül etmekte olup otomotivde ve genel araç gereç yapımında kullanılır. Ekstrüzyon ürünü olan polipropilen fiberler örgü veya dokuma kumaşlarda, halılarda ve döşemelik kumaşlarda iplik olarak kullanılır. Dokuma olmayan polipropilen kumaşlar halı tabanı, tek kullanımlık bebek bezi astarı, tek kullanımlık hastane kumaşı, tekrar kullanılabilir havlu ve mobilya kaplaması yapımında kullanılır. Polipropilen filamanlar ip yapımında, polipropilen filmler ise şeffaf ambalaj yapımında kullanılır [16].

3.1.1 Polipropilenin sıcaklık verileri

Ticari kalitede polipropilenlerin tamamında geçerli termal genişleme katsayıları şöyledir [17]:

- -30°C 'den (243,2 K) 0°C 'ye (273,2 K): $6,5 \cdot 10^{-5}$
- 0°C 'den (273,2K) 30°C 'ye (303,2K): $10,5 \cdot 10^{-5}$
- 30°C 'den (303,2K) 60°C 'ye (333,2K): $14,5 \cdot 10^{-3}$

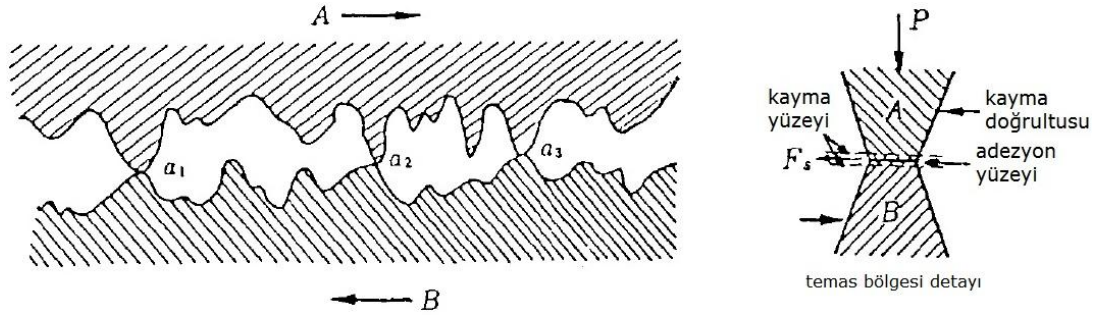
Polipropilenin kırılğan halden viskoelastik hale geçtiği camı geçiş sıcaklığı (T_g) - 30°C ile 20°C arasındadır. İzotaktik polipropilende bu değer 0°C civarındadır. İzotaktik polipropilenin ısı deformasyon sıcaklığı $107-121^{\circ}\text{C}$ arasında, fiziksel özelliklerin büyük bir değişikliğe uğradığı Vicat yumuşama noktası 150°C civarında, erime sıcaklığı ise yaklaşık 170°C 'dir [17].

4. POLİMERLERİN TRİBOLOJİK DAVRANIŞI

4.1 Polimerlerde Sürtünme Katsayısı

Polimer sürtünmesi söz konusu olduğunda temas yüzeylerinin pürüz tepeciklerinin birbirine kaynaması olarak tanımlanan adezyon ve elastik veya plastik şekil değişimini ifade eden deformasyon olarak iki temel bileşenden söz edebiliriz. Bu iki bileşeni tetikleyen üç temel unsur bulunur:

- Oluşan adezif bağlar, bu bağların tipleri ve güçleri.
- Temas halinde birbirine sürtünen malzemelerin birbiri üzerinde kayması ve kopması.
- Gerçek temas alanı



Şekil 4.1: Tribolojik temas yüzeyleri

Polimerlerde neredeyse istisnasız bir biçimde adezyonla birlikte deformasyona bağlı sürülme meydana gelmektedir ve bazı durumlarda bu mikro-kesiklere yol açar. Bu durumda sürtünme kuvvetini arttıran ek iş yapılması gerekir. Sürtünmenin deformasyon bileşeni polimerin daha sert karşı yüzeyin pürüzleri tarafından sürülmeye karşı gösterdiği direnç sonucunda ortaya çıkar. Adezyon bileşeni ise doğrudan doğruya karşılıklı çalışan yüzeylerin gerçek temas noktalarında meydana gelen adezif bağlardan kaynaklanır. Adezif bağlar temas eden yüzeylerin pürüz tepeciklerinin birbirine kaynaması sonucunda oluşan bağlardır. Polimerlerde sürtünmenin adezyon bileşeninin deformasyon bileşenine kıyasla çok daha baskın olduğu düşünülür. Adezyona bağlı olarak karşı sert yüzeyde bir transfer filmi oluşur

ve bu filmin özellikle ele alınması polimerlerin sürtünme davranışının anlaşılması açısından önem arz eder [18,19].

Temas yükü, kayma hızı ve sıcaklık faktörleri sürtünme kuvvetini dikkate değer miktarda etkilemektedir. Bu etkiler birbirinden bağımsız değildir. Örneğin, temas yüküne ve kayma hızına bağlı olarak sıcaklık ciddi miktarda değişebilir ve sürtünme modunu değiştirebilir. Polimerlerin sürtünme davranışının normal yük ve kayma hızıyla değişim eğilimini bilmek özellikle yağsız durumdaki gürültü davranışına ışık tutabilir. Fakat polimerlerin mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişmesi bu davranışı sağlıklı bir şekilde tespit etmeyi ciddi anlamda zorlaştırır. Polimer malzemelerin oda sıcaklığında kuru yüzeylere karşı çalışırken meydana çıkan tribolojik özelliklerini sıcaklığa bağlı olarak ortaya koymak için *PV* limiti kavramı tanımlanmıştır. Burada *P* değişkeni sınırlayıcı temas basıncını, *V* ise malzemenin güvenli bir şekilde kullanılabileceği kayma hızını belirtir. Polimer malzemelerin fiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden *PV* limitleri de ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Katkılı polimerlerde de katkının özelliklerine ve uygulama şeklinde göre *PV* değerleri değişir. *PV* limitleri analitik yöntemlerle hesaplanmış değerler olmayıp deneyler sonucunda elde edilen verilere dayanır [19].

4.1.1 Kayma hızı etkisi

Viskoelastik malzemeler olan polimerlerin karakteristik gerilme gevşemesi sürelerine sahip oldukları düşünülebilir. Gerilme gevşemesi sabit deformasyon hızına tabi malzemenin maruz kaldığı gerilmenin zamanla azalması olarak tanımlanır. Bu durumda polimerlerin tabi olduğu kayma hızları onları belli bir hızda şekil değiştirmeye zorlayan bir faktör olarak değerlendirilebilir. McLaren ve Tabor (1963) dinamik sürtünme katsayısının genellikle kayma hızıyla birlikte artmasının nedeninin bu durum olabileceğini öne sürmüştür. Bu durum çoğunlukla düşük hızlarda dinamik sürtünme katsayısının statik sürtünme katsayısından daha düşük, 0,25 m/s gibi yüksek hızlarda daha yüksek olması sonucunu doğurur. Çok daha yüksek hızlarda ise sürtünmeye bağlı ısınma ve yumuşama dinamik sürtünme katsayısının düşmesine neden olabilir [19].

Shooter ve Thomas'ın (1952) araştırmalarına göre hızdan bağımsız sürtünme PTFE, PE, PMMA ve PS için ve aynı zamanda fiber-fiber teması için sadece sınırlı bir hız aralığında gerçekleşir (0,01 – 1,0 cm/s). Ama genellikle sürtünme katsayısı ve kayma

hızı arasında daha karmaşık ilişkiler gözlenmiştir. Bu durum polimerlerin viskoelastik davranışıyla ilişkilendirilebilir. Düşük hızlarda temas alanındaki viskoz direnç artan hızla birlikte artar. Temas basıncı yüksek olduğunda hızda artışa bağlı olarak viskozitenin keskin bir biçimde artmasına neden olan anormal viskoz akış gözlenmiştir. Bunun üstündeki hızlarda ise genel olarak McLaren ve Tabor'ın gözlemlerine uygun bir şekilde sürtünme katsayısı artan hıza birlikte artar. Kayma hızı daha da arttıkça temas alanında elastik davranış viskoz davranışa göre baskın hale gelmeye başlar. Bunun sonucu olarak sürtünme kuvvetinin hıza bağımlılığı ya çok azdır ya da artan hızla azalmaktadır. Yüksek hızlarda temas süresinin kısa olmasının da sürtünme kuvvetini düşürdüğü düşünülmektedir [18].

Genellikle sürtünme katsayısı ve hız arasında, gevşeme özelliklerindeki ve makromoleküllerin fizyokimyasal aktivitelerindeki değişimlerle açıklanan karmaşık bir bağımlılık vardır. Polimer numunesinin deney sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığına yaklaştıkça sürtünme katsayısının kayma hızına bağımlılığının güçlendiği gözlenmiştir. Daha düşük sıcaklıklarda bu ikisi arasında belirgin bir ilişki yoktur.

4.1.2 Yük etkisi

Polimerlerde normal yük ve gerçek temas alanının değişimi orantılı değildir. Bu değişimin sıcaklığa da doğrudan bağlı olması ve temas durumunu başlı başına sıcaklığı etkileyen bir mekanizma olması polimerlerde sürtünme yüzeyine dik yükün etkisini anlamayı zorlaştırmaktadır. Fakat sürtünme kuvvetinin dik kuvvetle orantılı olduğu genel olarak bilinmektedir ve deneyler bu yasanın bazı polimerler için geçerli olduğunu göstermiştir. Shooter ve Tabor tarafından yapılan deneylerde 6,35 mm yarıçaplı bir çelik bilyanın PTFE, PMMA, PVC, PE ve Nylon üzerinde kayarken 10 ve 100 N'luk yükler arasında sürtünme katsayısının değişmediği gözlenmiştir. Bu aralığın sağında ve solunda ise durum farklıdır [18].

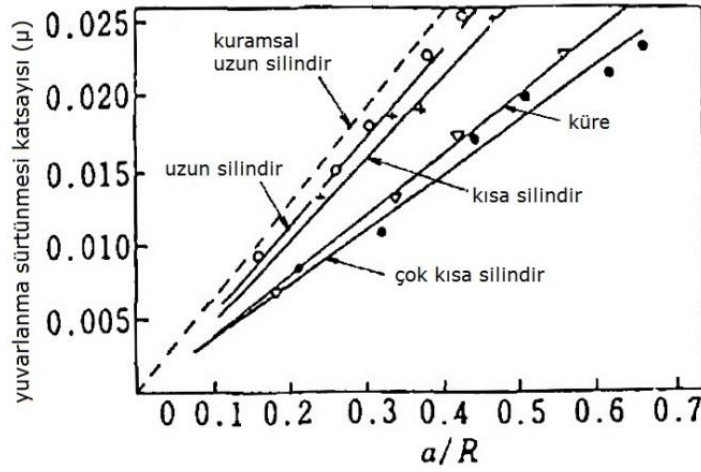
Çeşitli deneysel çalışmalar 1 N'a kadar olan düşük yüklerde sürtünme katsayısının artan yüklerle azaldığını göstermiştir. Bu durumun pürüz tepeciklerinin elastik davranışına bağlı olduğu düşünülmektedir. Yüksek yük tarafında ise sürtünme katsayısı artan yüklerle birlikte artar. Bu durumsa elastik deformasyondan plastik deformasyona geçilmesi ve plastik deformasyonun artan hızla daha baskın hale geldiği şeklinde açıklanmaktadır [18].

4.1.3 Sıcaklık etkisi

Sürtünmede açığa çıkan ısı malzemenin gerçek temas noktalarındaki deformasyondan kaynaklanır. Adezif bağların oluşması ve kopması da ısı kaynağıdır. Sıcaklığın sürtünme davranışı üzerindeki etkisinin polimerin ilgili sıcaklıklardaki mekanik özelliklerinin dikkate alınmasıyla anlaşılabilceği düşünülmektedir. Buna bağlı olarak sürtünme katsayısı ile sertlik ve kayma mukavemeti arasında bir ilişki bulunduğu saptanmıştır. Fakat sıcaklığın adezyon üzerindeki olası etkisi yine bağımsız bir ilişki kurulmasını zorlaştırır. Yapılan araştırmalar (Petrokovets, 1999) iki gövdenin temas noktası alanının, gövdeler arası sıcaklık farkı arttıkça küçüldüğünü ve bu alanın her zaman izotermal durumdan daha küçük olduğunu göstermiştir. Fakat malzemenin mekanik davranışının sıcaklığa duyarlı olduğu durumda bu küçülme, mekanik özelliklerin kötüleşmesine bağlı temas noktası alanı artışı tarafından gizlenebilmektedir. [18].

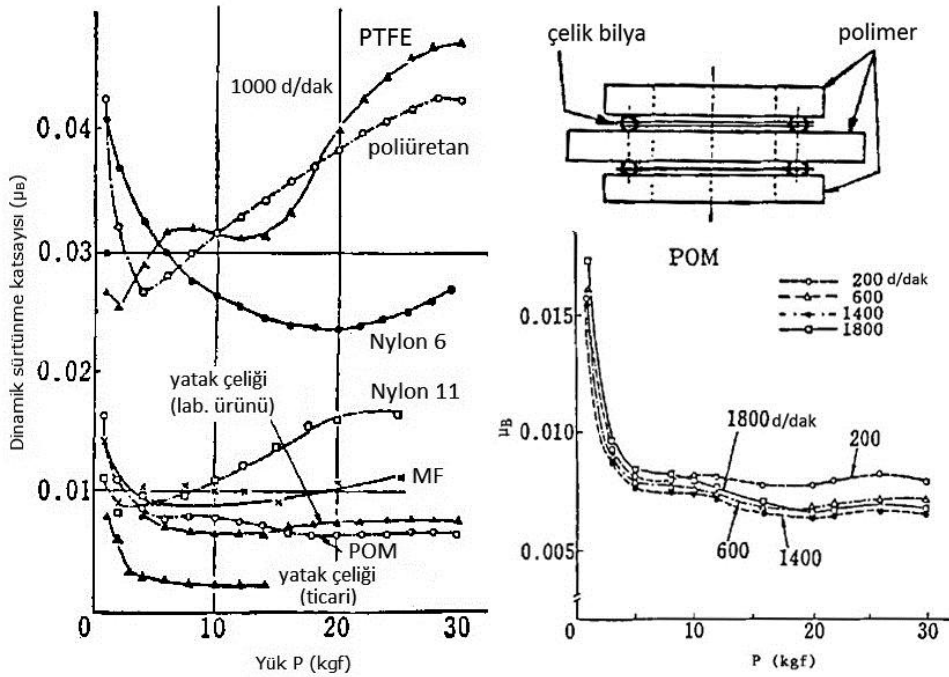
Sıcaklık arttıkça polimerlerin gevşeme süresi azalmaktadır. Bunun sonucu olarak ortam sıcaklığındaki düşmeler kayma hızındaki artmalara benzer etki yapar. *PV* limitleri kayma ara yüzeyinin kritik sıcaklığa ulaşma durumu göz önünde bulundurularak belirlendiğinden ortam sıcaklığının artması *PV* limitinin azalmasına neden olur. Polimer, erime sıcaklığının üstünde bir viskoz akışkan gibi davranacak ısı enerjisiye ulaşır. Sıcaklık erime sıcaklığının (T_m) altına düştüğünde üç boyutlu kristalleşme meydana gelir. Amorf polimerlerde genelde kristalleşme yerine düzgün bir hızla hacmin azalması gözlenirken, kristalliği yüksek polimerlerde kristalleşmeye bağlı olarak keskin hacim düşmeleri meydana gelir [19].

Elastomerlerin ve polimerlerin sürtünme davranışı ara yüzey sıcaklıklarından ciddi miktarda etkilenir. Bu tribolojik davranış Ettles (1986) tarafından “termal kontrol rejimi” olarak adlandırılmıştır. Sürtünmeye bağlı ısınma sonucunda ortaya çıkan yüzey sıcaklıkları, termoplastik polimerlerin erime veya yumuşama sıcaklıklarına erişmesine neden olabilir. Bu durum polimerlerin sürtünme ve aşınma davranışında şiddetli değişmelere neden olur (Lancaster, 1971; Kennedy ve Tian, 1994). Gerçekte Lancaster, genellikle kuru plastik yatakların tasarımında kullanılan “*PV* limiti”nin “kritik yüzey sıcaklık limiti” olduğunu göstermiştir. Bunun tipik bir örneği olarak, temas basıncının ve kayma hızının kombinasyonu, malzemenin yüzey sıcaklığının kritik düzeylere gelmesine neden olur (Lancaster, 1971). Bu durumda yüzey sıcaklığı kritik sıcaklığa erişmese bile polimerin veya elastomerin viskoelastik davranışı ciddi



Şekil 4.3 : Yuvarlanma sürtünmesinin batma miktarı ile değişimi [20]

Yamaguchi özellikle bilyalı eksenel yataklarda polimerlerin sert karşı yüzeylerle yuvarlanma sürtünmesi üzerinde çalışmıştır. Dolayısıyla bu çalışma yuvarlanmalı yataklar özelinde anlam taşımaktadır. Şekil 4.4’de polimer olmayan malzemelere de yer verilmiştir. Bu deneylerde farklı polimerler artan yüke farklı tepkiler verirken özellikle düşük yüklerde dinamik sürtünme katsayısındaki artış dikkat çekicidir. Sürtünme katsayısı ve dönme hızı arasındaysa belirgin bir ilişki gözlenmemektedir. [20].



Şekil 4.4 : Yuvarlanma sürtünmesinde dinamik sürtünme katsayısı değişimi [20]

4.3 Polimerlerde Aşınma Davranışı

4.3.1 Metalik olmayan malzemelerin aşınması

Bir kayma sisteminde metal bileşenlerden biri metalik olmayan bir bileşenle değiştirildiğinde baskın aşınma mekanizması değişir. İki malzeme kayma teması halindeyken yüzey filmlerinin bozulmasıyla metalik temas oluşur adeziv aşınma baskın olur. Metallerden biri metal olmayan malzemeyle yer değiştirdiğinde artık ara yüzde metalik bağ etkin değildir. Ara yüz bağları daha zayıf hale gelir ve baskın aşınma mekanizması, sürtünme bağları parçalandığında kopan parçaların ara yüzeyde sürüklenmesine bağlı abrazyon olur [22].

Metalik bağlar metallerin mukavemet, dövülebilirlik, alaşımlama ve kaynak kabiliyeti kazanmasını sağlar. Metal olmayan malzemeler ise iyonik, kovalent, moleküler bağlar ve hidrojen bağlarıyla bağlıdır. Polimerlerin büyük moleküllerinin kendi içindeki bağlar kovalentken moleküller arası bağlar zayıf van der Waals bağlarıdır. Moleküller arası bağların zayıf olması polimerlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için bu bağların güçlendirilmesi düşüncesini doğurmuştur. Kristalleşme, çapraz bağlama ve polimer zincirlerinin pekleştirilmesi gibi yöntemler bu amaca hizmet eder [22].

4.3.2 Dolgusuz polimerlerin aşınması

Polimerlerle iki farklı aşınma mekanizması bulunur. Pürüzlü yüzeylerde deformasyon aşınması baskınken düzgün yüzeylerde ara yüz aşınması baskındır. Araştırmacılar bu iki tür aşınma arasında hangi pürüzlülük değerinde geçiş olduğuyla ilgili bir mutabakata varamamıştır. Dolayısıyla deformasyon aşınması gözlenen yüzeyler pürüzlü, ara yüz aşınması gözlenen yüzeyler ise düzgün kabul edilir [22].

Polimerlerin aşınma davranışında dikkat çeken unsur pürüzlü bir polimerin abrazif aşınma sonrası pürüzsüz hale gelmesi ve neticede ara yüz aşınmasının baskın duruma geçmesidir. Ara yüz aşınması ince film transferi şeklinde ortaya çıkar. Film transferinde iki mod bulunur: Bunlardan biri 10 nm ila 50 nm kalınlığında filmleri kapsarken diğeri 0,1 ila 1,0 μm kalınlığında filmleri kapsar. İlk modun sadece PTFE ve yüksek yoğunluklu polietilen için geçerli olduğu keşfedilmiştir. Bu çok ince film, moleküllerin transfer öncesi yeniden dizilmesine bağlı olarak şekillendir [22].

Daha yaygın olarak gözlenen ikinci tür transfer düzgün molekül profiline sahip olmayan yarı kristal polimerlere özgüdür. Polipropilen, LDPE ve Nylon 6/6 böyle davranır. Bu tür film transferi camsı geçiş sıcaklığının üzerinde gerçekleşir. Film transferi polimer ara yüzünde polimerin yumuşamasının ve erimesinin gerçekleştiği sıcaklıklara kadar devam eder. Bu film transferinin gözleendiği aşınma mekanizması polimerin pürüzsüz metal yüzeyine adezyonuyla başlar ve transfer katmanı zamanla kalınlaşır [22].

Film kalınlığını sınırlayan ve filmin kısmen parçalanmasına neden olan çeşitli faktörler bulunur. Film yorulmasına bağlı delaminasyon bu kopmayı açıklayabilir. Ayrıca filmde depolanan elastik enerjinin ara yüzdeki adezyon enerjisini aşması da film kalınlığını sınırlayıcı unsur olarak düşünülebilir. İnce film aşınması sırasında oluşan artıklar tabakalar halinde kopan yığınlar şeklinde gözlenir. Hâlihazırda film transferiyle ilgili büyüklükleri öngörebilecek modeller bulunmamaktadır [22].

Film transferi camsı geçiş sıcaklığının altındaki kırılğan polimerlerde gerçekleşmez. Çünkü camsı haldeki polimerlerde, molekül kısımlarının film transferini mümkün kılacak şekilde yeniden yönlenmesi mümkün değildir [22].

5. GÜRÜLTÜ DÜZEYİ ÖLÇÜMÜ

5.1 Ses Düzeyleri ve Desibel Kavramı

Ses düzeylerinin algılanmasıyla ilgili yapılan çalışmalar ses şiddetlerinin duyulabilen aralıkta büyük miktarda değiştiğini, fakat değişimin aritmetik açıdan sesin algılanmasıyla bağdaşmadığını ortaya koymuştur. Ernst Weber, Gustaf Fechner, Hermann von Helmholtz gibi sesle ilgili araştırmalar yapan bilim adamları bu tür ölçümlerde çok sıfırlı sayılar yerine oranların kullanılmasının önemini vurgulamıştır. Desibel kavramı da bu oranların logaritmik bir skalaya oturtulmasının sonucu olarak ortaya çıkmıştır [23].

Oranla ifade edilen ses düzeyi birimsizdir. Fakat bu birimsiz ifadenin tanınması için adlandırılması gerekmiş ve bu tanımlayıcı birime Alexander Graham Bell'e ithafen bel adı verilmiştir. Ortaya çıkan büyüklükler dikkate alındığında bu değer 10^1 'a çarpılmasından elde edilen desibel (dB) biriminin kullanılması kabul görmüştür. Ses şiddeti değerinin referans ses şiddeti değerine oranını veren ses şiddeti düzeyi ifadesi şöyledir:

$$SIL = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}} dB \quad (5.1)$$

Ses şiddeti birim alandan geçen ses dalgalarının gücü olarak tanımlanır. Birimi W/m^2 'dir. W cinsinden ifade edilen ses gücü düzeyi de aynı şekilde oranlanarak belirtilir:

$$PWL = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}} dB \quad (5.2)$$

Ölçümlerin kıyaslanabilir değerler vermesi için 10^{-12} W'luk referans güç değeri (W_{ref}) kullanılır. Benzer şekilde ses şiddeti düzeyinin referans değeri (I_{ref}) de 10^{-12} W/m^2 'dir.

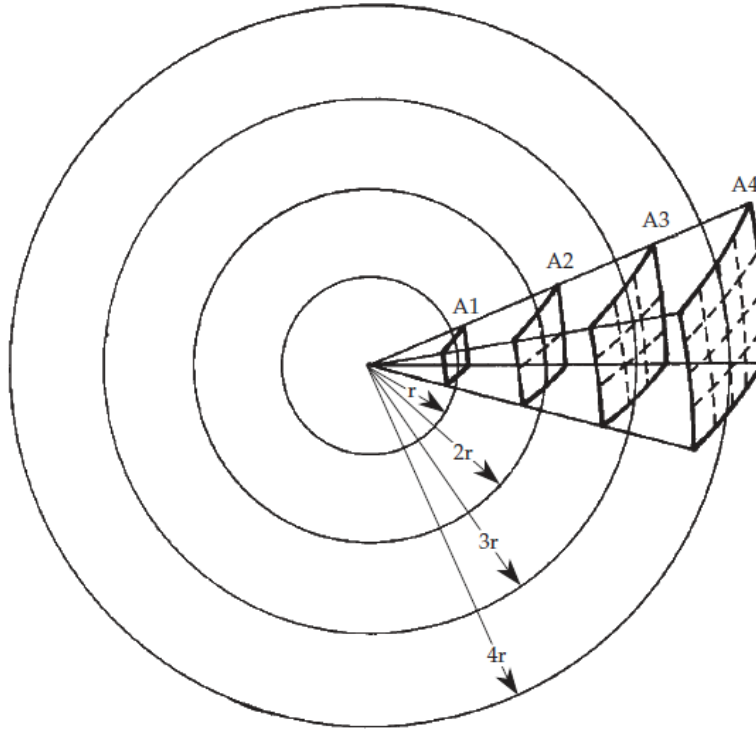
Ses düzeyi ölçümlerinde en kolay elde edilen değer ses basıncıdır. Ses şiddeti ölçümleri belli bir alanın kontrol edilmesi gerektiğinden daha zordur. Ses basıncı ise elektronik devrelerdeki voltaja benzer bir şekilde ölçülür. Dolayısıyla ses düzeylerini

belirtmede en çok kullanılan parametre ses basıncıdır. Ses şiddeti ses basıncının karekökü ile orantılıdır. Bu durumda 20 μPa 'lık p_{ref} değeriyle aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

$$SPL = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_{ref}^2} dB \quad (5.3)$$

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{p}{20 \mu\text{Pa}} dB \quad (5.4)$$

Ses basıncı ölçümlerinde ses kaynağıyla ölçüm cihazı arasındaki mesafe önemlidir. Zira belli bir kaynaktan gelen ses dalgaları uzaklık arttıkça genişleyen bir alana yayılır ve basınç mesafe arttıkça azalır. Dolayısıyla ses basıncı düzeyleri verilirken ölçüm mesafesi de belirtilmelidir. Mesafe belirtilmediği sürece ses basıncı düzeyi, kaynağın gürültü karakteristiğini ortaya koymak için yeterli değildir. Benzer bir durum ses şiddeti düzeyi için de geçerlidir. Ses şiddeti mesafenin karesiyle ters orantılı olarak azalır. Ses gücü düzeyi ise doğrudan ses kaynağının karakterini ortaya koyan bir değerdir [23].



Şekil 5.1: Ses dalgası etki alanının kaynaktan uzaklığa bağlı olarak değişmesi [23]

5.2 Oktav Kavramı

Gürültü ölçüm cihazlarında ölçülen ses düzeyleri dijital veya analog bant geçiş filtreleri kullanılarak frekans bantlarına ayrılabilir. Frekans bantlarında frekansların gruplanması yapılırken aritmetik gruplara bölmek yerine insan kulağının algılaması açısından daha anlamlı olan oktav bantları kullanılır. Frekanslar arası ilişki kuran oktavın matematik ifadesi şöyledir:

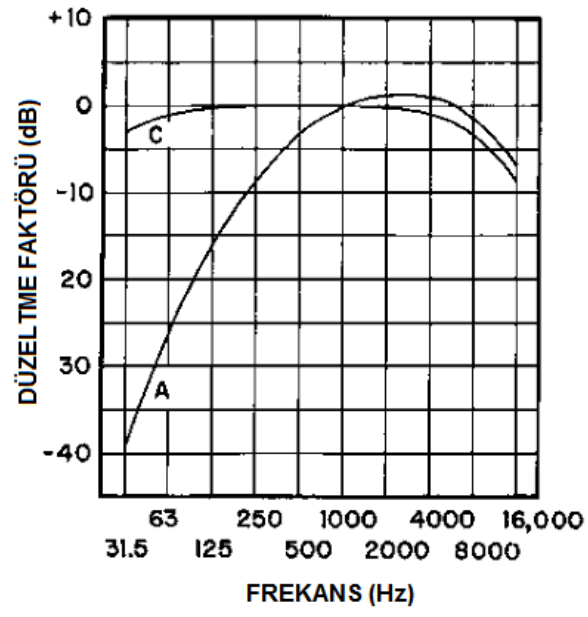
$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n \quad (5.5)$$

Denklem 5.5'te f_2 oktav aralığının üst frekans değerini (Hz), f_1 ise alt frekans değerini ifade eder (Hz); n ise oktav sayısını belirtir. Örneğin 1-oktav için $f_2/f_1=2$ değerinin alır. Bu durumda üst frekans sınırı alt frekans sınırının iki katıdır. 1/3-oktav için $f_2/f_1= 2^{1/3}$ olur. Alt frekans sınırı 500 Hz olduğu takdirde üst sınır $500 \cdot 2^{1/3}=630$ Hz olur. Bu hesaplardaki alt frekans sınırı bir bandın merkez frekansı olarak kabul edilirse üst sınır bir sonraki bandın merkez frekansı olur.

Çoğu akustik uygulamada ses 1-oktavlık sekiz oktav bandında incelenir. Bu uygulamalarda merkez frekansları olarak 63, 125, 250, 1000, 2000, 4000 ve 8000 Hz olan frekans bantları kullanılır. 1/3-oktav bandında yapılan ölçümlerde ise 31,5, 50, 62, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000 ve 10000 Hz merkez frekanslara sahip bantlar kullanılır [24].

5.3 Ağırlıklı Ses Düzeyleri

Ses düzeyi ölçen cihazlar tarafından farklı frekanslar için kaydedilen ses düzeyleri objektif değerlerdir. Fakat gürültü verilerinin ne amaçla kullanılacağına bağlı olarak her frekanstaki gürültü düzeyinin aynı önemde değerlendirmeye alınması istenmeyebilir. Bu durumda her frekansa belli bir ağırlık vererek düzeltme faktörü uygulayan ağırlık eğrileri kullanılır. Örneğin insan kulağının işitme kabiliyeti temel alındığı hallerde A-ağırlığı, diğer canlılar da hesaba katılarak çevresel etkilerin temel alındığı hallerde ise C-ağırlığı kullanılır. A-ağırlığında düşük frekansların gürültüye katkısı daha azdır. Bunun sebebi insan kulağının düşük frekanslı gürültüye daha az duyarlı olmasıdır. Başka amaçlar için kullanılan farklı ağırlıklar da mevcuttur [25].

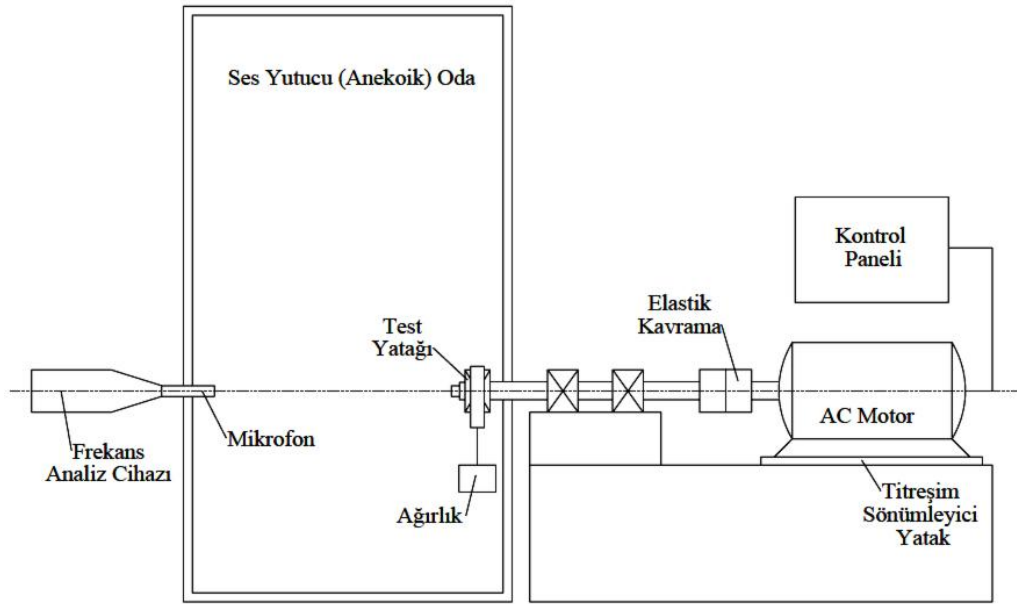


Şekil 5.2 : Ses düzeyi ağırlık filtreleri [24]

6. DENEY DÜZENEGİ VE DENEYLERİN YAPILIŞI

6.1 Deney Düzenegi

Sunulan çalışmada bilyalı polpropilen yatakların farklı çalışma şartları altındaki gürültü davranışı incelenmiştir. Bu amaçla farklı radyal yükler altında ve farklı çalışma hızlarında çalıştırılan bilyalı polpropilen yatakların gürültü düzeyinin ortam gürültüsünden mümkün olduğunca ayrılarak ölçülebileceği bir deney düzeneği kullanılmıştır. Deney parametreleri devir/dakika cinsinden yatakların dönme hızı ve maruz kaldıkları radyal yükün büyüklüğüdür. Polimer yatakların gürültü karakteristiğinin sıcaklığa ne ölçüde bağlı olduğu ve çalışma sıcaklığının ne ölçüde kontrol altında tutulabileceği bilinmediğinden yatakların çalışma sırasındaki sıcaklıklarının ölçülmesine olanak tanıyacak bir cihaza da gerek duyulmuştur.



Şekil 6.1: Deney düzeneğinin şematik görünüşü

Şekil 6.1’de deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi test edilen yatakların takılı olduğu milin tahriki 0,75 kW’lık, 0...1400 d/dak arasında kademesiz olarak ayarlanabilen AC motorla gerçekleştirilmiştir. Motorun devir sayısı kontrol paneli aracılığıyla ayarlanabilmekte ve gözlenebilmektedir. Motor titreşimlerinin tesisatın geri kalanına aktarılabilmesi için motor kauçuk ayaklar

üzerine oturtulmuştur. Motor mili ile test edilen rulmanlı yatağın mili arasında da titreşimleri sönümleyen bir elastik kavrama bulunmaktadır. Ayrıca milin dengesiz radyal hareketinin doğurabileceği titreşimlerinin giderilmesi için rulmanlı blok yataklar kullanılmıştır. Dış ortam gürültüsünün, motorun ve blok yatakların gürültüsünün ölçüm ortamından yalıtılabilmesi için ses yutucu bir malzeme olan cam yünü kaplı yankısız bir akustik oda kullanılmıştır. Motor tarafında odanın dışı da ek yalıtım için cam yünüyle kaplanmıştır.



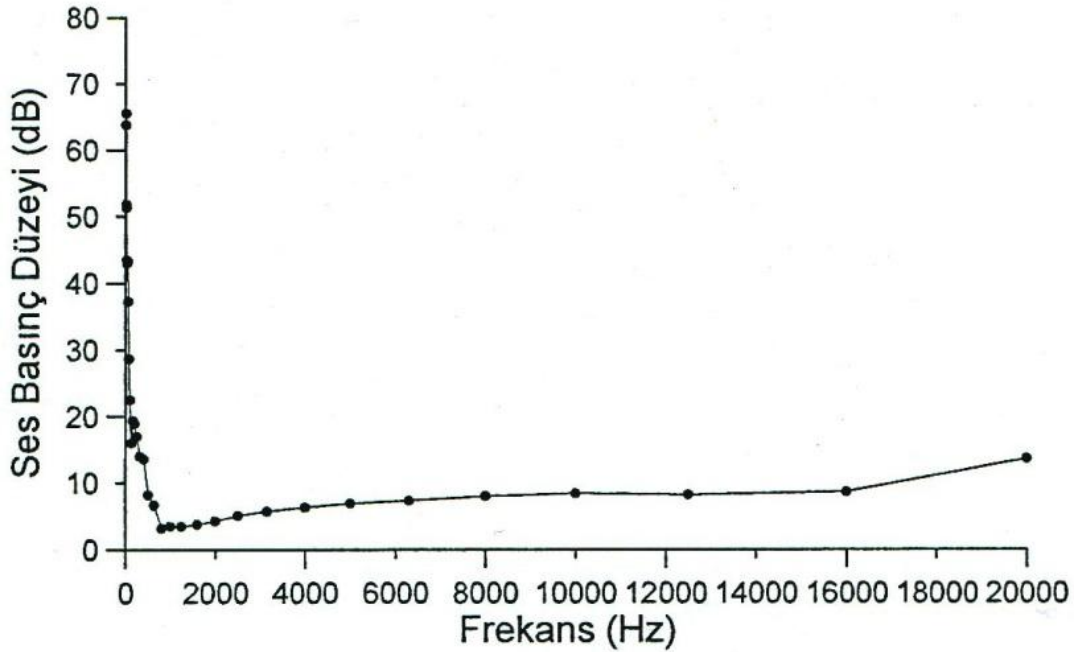
Şekil 6.2 : Oda dışı deney düzeneğinin görüntüsü

Akustik oda 400 Hz'in üzerindeki frekanslarda gürültü yalıtımı sağlanacak şekilde yaklaşık $85 \times 170 \times 170 \text{ cm}^3$ boyutlarındadır. Böylece odanın test edilen yataktan her boyutta 85 cm mesafede olması sağlanmıştır. 400 Hz frekansa sahip ses dalgasının boyu Denklem 6.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6.1)$$

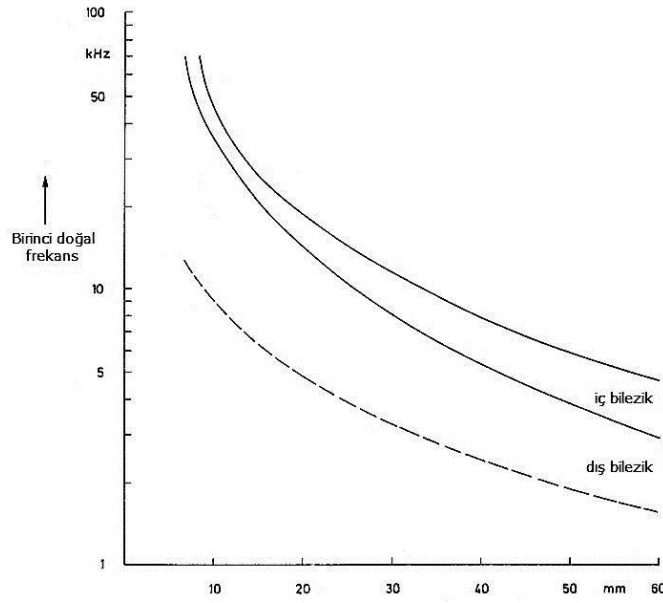
Denklemde λ sesin dalga boyunu (m), c sesin havadaki hızını (344 m/s), f ise ses dalgasının frekansını (400 Hz) ifade eder. Odanın duvarları 2 kHz'in üzerindeki frekanslarda 0,9'un üzerinde bir ses yutum katsayısına sahip olan 5 cm'lik cam yünü ile kaplanmıştır. Odanın performansı Şekil 6.3'te verilmiştir. 2 kHz'in üzerindeki ses

yutum kabiliyeti özellikle önemlidir. Zira deneylerde kullanılan 6004, 6204 ve 6304 serisi bilyalı polimer yatakların bileziklerinin doğal frekansları (Şekil 6.4) ve mikrofon yazılımının sınırları göz önünde alındığında özellikle 2 kHz ve 12,5 kHz arasındaki yüksek frekansların incelenmesinin anlamlı olduğu kanaatine varılmıştır. Temel alınan doğal frekansların kontrolü amacıyla COSMOS programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle metal yataklarda modal analizi yapılmıştır. Bilyaların rijit kabul edildiği analizin sonucunda 6004 serisi yatakların titreşim modlarının 3400 ve 5800 Hz civarında (Şekil A.1), 6204 serisi yatakların titreşim modlarının 3200 ve 4400 Hz civarında (Şekil A.2) olacağı öngörülmüştür. Oda performansının 1 kHz ve üzerinde iyi olması da bu seçimde etken olmuştur. Şekil 6.3'te görüldüğü üzere bu aralıkta odanın sükûnet halindeki gürültü düzeyi ihmal edilebilecek düzeydedir.



Şekil 6.3 : Akustik odada sükûnet halindeki ses basınç düzeyi

Deneylerde IEC ve ANSI Tip 1 standartlarına uygun Brüel & Kjaer 2260 Investigator Ses Düzeyi Ölçer kullanılmıştır. Elle tutulan ve pille çalışan bu cihaz 1/2" çapında mikrofon içermektedir. 2260 Investigator, Basic Sound Analysis Software BZ 7210 yazılımıyla 1/3-oktav bandında 6,3Hz – 12,5 kHz arasında ses basınç düzeyi ölçümü yapabilmektedir [25]. Ses düzeyi ölçümleri test edilen yatağın tam karşısından 75 cm mesafeden yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri içinse FLUKE marka kızılötesi termometre kullanılmış, bu ölçümler bilyalar üzerinden yapılmıştır.



Şekil 6.4 : 60, 62 ve 64 serisi yatakların birinci doğal frekans aralıkları [13]

Çizelge 6.1’de test edilen tek sıralı bilyalı polimer yatakların boyutları, yük kapasiteleri, maksimum çalışma devirleri ve ürün kodları verilmiştir. Burada d yatakların iç çapını belirtmektedir. Deneyde kullanılan tüm yataklar aynı iç çapa sahiptir. D yatakların dış çapıdır. Deneyde iç çapı aynı, dış çapı farklı yataklar kullanılmıştır. B yatakların genişliğidir. Bu boyut bir deney parametresi olarak dikkate alınmamıştır. Deneyde kullanılan bilyalı yatakların tümü polipropilen (PP) bileziklere ve kafeslere sahiptir. Yuvarlanma elemanları Q kodlu yataklarda cam, T kodlu yataklarda ise AISI 316 paslanmaz çeliktir. Yağlı olarak test edilen yatakların yağlanması amacıyla 40°C ’de $142 \text{ mm}^2/\text{s}$ ’lik kinematik viskoziteye sahip mineral yağ kullanılmıştır. Kıyaslama amacıyla 6004 serisi geleneksel (metal) bilyalı bir yatak da test edilmiştir. Aynı yağlama koşulu bu yatak için de sağlanmıştır.

Çizelge 6.1: Kullanılan tek sıra bilyalı polimer yatak tiplerinin teknik verileri [14]

d	D	B	Dinamik(kN)	Statik(kN)	d/dak	ağ. (kg)	kod
20	42	12	0,21	0,16	1010	0,017	6004/HR22Q2
20	47	14	0,295	0,215	920	0,028	6204/HR22Q2
20	42	12	0,21	0,16	1010	0,017	6004/HR22T2
20	47	14	0,295	0,215	920	0,028	6204/HR22T2

6.2 Deneylerin Yapılışı ve Deney Yönteminin Optimizasyonu

Deneylerde yatakların taşıyabileceği maksimum yatak yükünün belirlenmesinde Şekil 2.4'te verilen grafik temel alınmıştır. İlk deneylerde çalışma sıcaklığının 50°C'yi geçmeyeceği düşünülerek yatağın taşıyacağı azami yük büyüklüğü normal çalışma kapasitesi dâhilinde kalacak şekilde seçilmiştir ve yaklaşık 1,3 değerindeki emniyet katsayısı kullanılarak yatakların PV limitlerini aşmaması hedeflenmiştir. Değiştirilen koşullara tabi farklı yatakların gürültüsünün niteliksel ve niceliksel olarak kıyaslanması için 700 d/dak'lık çalışma hızı referans alınmıştır. Yataklar PV limitlerine uygun sınırlar dâhilinde 10...160 N arası yüklere tabi tutulmuştur.

Gürültü frekansı dağılımlarının ve gürültü karakteristiğinin kontrolü amacıyla 900 d/dak ve 400 d/dak çalışma hızlarında da aynı yöntemle testler yapılmıştır. Kuru çalışan polimer yataklarda sıcaklığın zamanla çok hızlı ve kontrolsüz bir biçimde yükselmesi arttırılan yüklerle çalışırken yük etkisinin sıcaklıktan bağımsızlaştırılmasını çok zorlaştırmıştır. Bu sebeple yüksek sıcaklıklarda 10 N'luk aralıklarla kademeli olarak azaltılan yükleme yapılması uygun görülmüştür. Bu doğrultuda, kuru çalışma koşullarında elde edilen değerler genellikle 55...70°C arası bilya sıcaklıklarında ölçülmüştür. Bu sıcaklıkları doğuran ısı yatakların iç sürtünmelerinden kaynaklanan ısıdır. Bu değerlerde yataklar, özellikle yüksek yüklerde, çalışma sınırına yakın koşullarda teste tabi tutulmuş olmaktadır. Bu durumun gerçek çalışma koşullarında da ortaya çıkabilecek olması deney sonuçlarının olası hasar durumlarını öngörmeyi sağlayacak değerler sunabileceği anlamına gelir. Neticede pratik uygulamalarda yağlı ve yağsız çalışma arasındaki farkın net bir şekilde ortaya çıkması bakımında bu deney yöntemi uygun bulunmuş ve uygulanmıştır.

Gürültü ölçümü her bir yükleme ve çalışma hızı koşulu için 1/3 oktav bantlarında 10 saniyelik gürültü ölçümleri yapılması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Farklı devir sayılarında düzeneğin bilyalı yatak monte edilmemiş ve yüklenmemiş hali için de gürültü düzeyi ölçümleri yapılmış, bu ölçümler Denklem 6.2'de verilen desibel çıkarma kuralına göre yüklenmiş yatak gürültüsü değerlerinden çıkarılmış ve net gürültü değerleri elde edilmiştir.

$$SPL_{fark} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{SPL1}{10}} - 10^{\frac{SPL2}{10}} \right) \quad (6.2)$$

İlk deneylerde yükleme polimer bir yuvanın yatak dış bileziğine oturtulması ve bu yuvaya ağırlıkların asıldığı bir kancanın yerleştirilmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında bu düzeneğin, özellikle düşük yüklerde, titreşim sebebiyle dengesiz yükleme koşulları yarattığı görülmüş ve bu sorunun giderilmesi için polimer yuva yerine esnek kayış kullanılmıştır. Esnek kayış kullanılması polimer yatakların titreşim sönümleme avantajının tamamen bertaraf edilmesini ve sadece yatağa özgü gürültülerin ayırt edilmesini sağlamıştır.



Şekil 6.5: Deney yatağı ve yükleme düzeneği

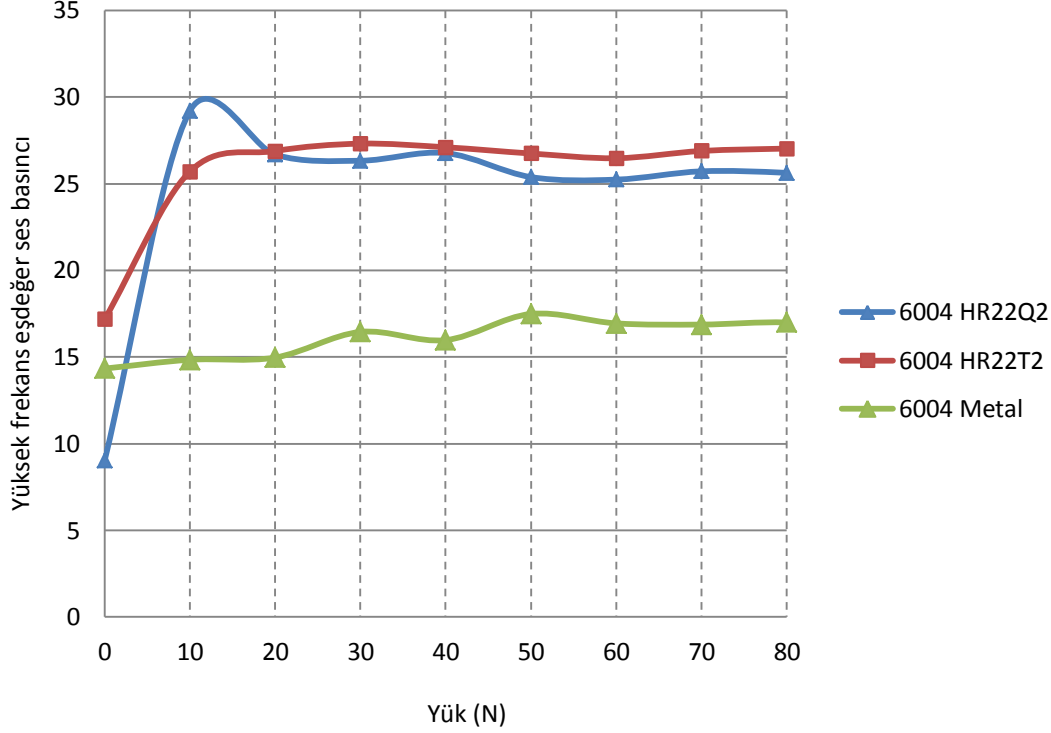
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Polimer sürtünmesi ile ilgili olarak gerçekleştirilen çeşitli deneysel çalışmalar polimerlerin tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde sıcaklık artışından kaynaklanan fiziksel değişimlerin göz ardı edilemeyeceğini ve kontrol edilemeyen çalışma sıcaklığının kayma hızı ve yük gibi parametrelerin etkisinin öngörmeyi zorlaştırdığını ortaya koymuştur.

Sunulan çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler de çalışma sıcaklığının yağsız çalışma koşullarında çok hızlı arttığını göstermiştir. Örneğin iki farklı yükte yapılan ölçümler arasında yaklaşık 1 dakika çalışan bir yatağın sıcaklığı, ölçümün yapıldığı bölge olan yuvarlanma elemanları civarında 10-15°C artabilmektedir. Yük ve çalışma hızına bağlı gürültü değişimlerinin gözlenmesinde sıcaklık değişimi etkisini azaltmak için yüksek hızlar ve yüklerde ortaya çıkan yüksek çalışma sıcaklıklarından başlanması ve çalışma hızı ve yükün kademeli olarak azaltılması suretiyle verilerin elde edilmesi yöntemine başvurulmuştur.

Yağsız çalışma koşullarında sıcaklığın çok hızlı yükselmesi tek başına anlamlı bir bulgudur. Zira bilyalı polimer yatakların işlevini makul şekilde yerine getirmesi *PV* değerinin aşılmamasına bağlıdır ve *PV* değerinin aşılp aşılmadığının kontrolü ancak sıcaklığın kontrol edilebildiği bir ortamda mümkündür. O halde yağsız çalışabilme özelliğiyle dikkat çeken polimer yatakların yağsız çalışabilmesinin ancak sıcaklığın *PV* limitini aşmayacak sınırlarda kaldığından emin olduğumuz hallerde mümkün olduğunu söyleyebiliriz. Yatak imalatçısı SKF'nin "Bilyalı polimer yataklar mutlaka çalışma koşullarında test edilmelidir." uyarısının altında bu durumla ilgili kaygıların yattığı anlaşılmaktadır [3]. Diğer bir yatak imalatçısı olan KMS'nin "Bilyalı polimer yataklar yağlandığı takdirde neredeyse tamamen sessizdir [2]." söylemi ise metal yataklarla kıyaslama yapıldığında doğrulanmamış, 6004 serisi metal yatakların aynı seriden bilyalı polimer yataklara kıyasla daha sessiz olduğu gözlenmiştir. Deneylerde esnek kayış kullanılması nedeniyle polimer yatakların titreşim sönümleme özelliği etkin olmamış ve bu tür yatakların montajdan bağımsız olarak değerlendirildiğinde metal yataklardan daha gürültülü olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 7.1’de aynı yağ ile yağlanan metal yatağın cam ve metal bilyalı polimer yataktan 10 dB civarı daha sessiz olduğu görülmektedir. Cam ve metal bilyalı polimer yataklar arasında bu koşullarda karakteristik bir fark gözlenmemiştir.



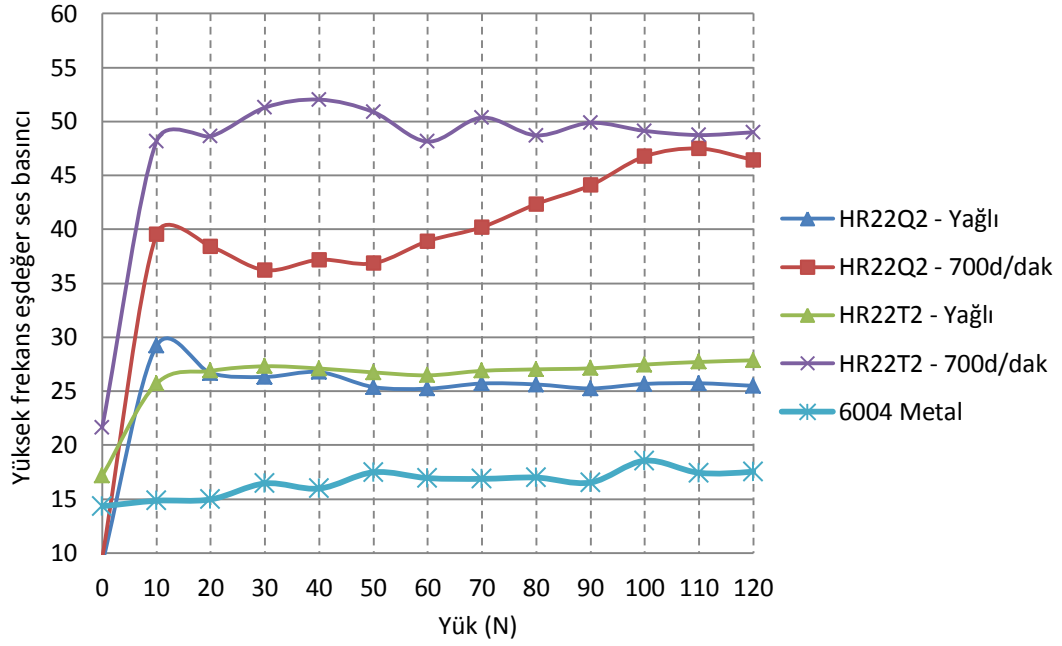
Şekil 7.1 : Yağlı çalışan 6004 serisi metal ve polimer yatakların kıyaslaması

Şekil 7.1’de temel alınan veri olan yüksek frekans eşdeğer ses basıncı 2 kHz ve 12,5 kHz arasındaki frekanslardaki ses basınç düzeylerinin desibel toplama kuralına göre Denklem 7.1 kullanılarak toplanmasıyla elde edilmiştir (Şekil 7.2).

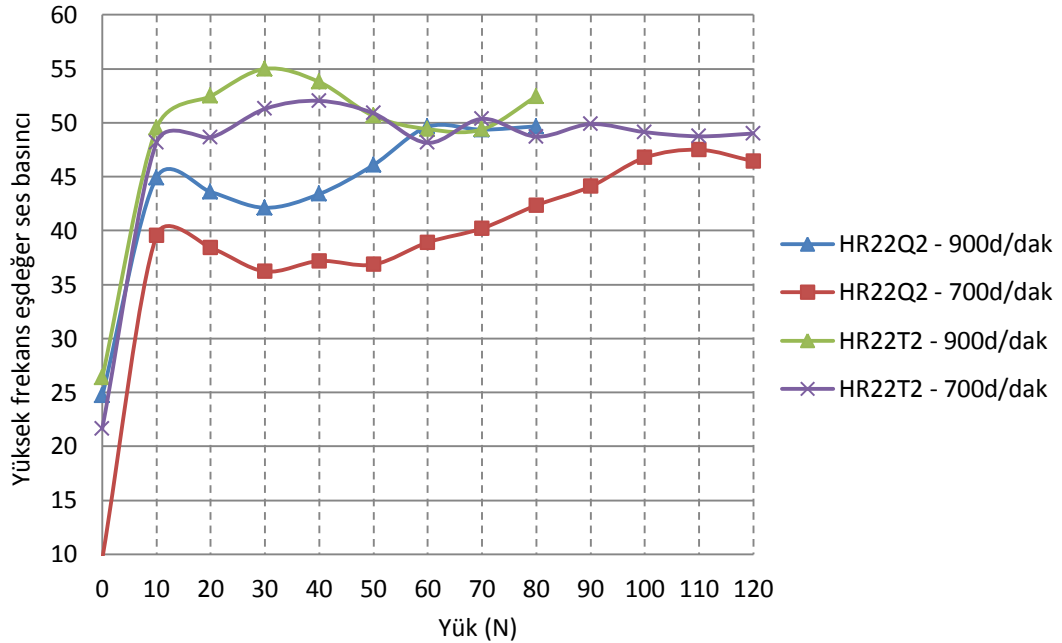
$$SPL_{(top)} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{SPL_i/10} \quad (7.1)$$

6004 serisinin yağlı testinden elde edilen frekans spektrumunda 2 kHz’in üzerindeki frekanslarda 0 dB’in üzerinde ses basıncı neredeyse hiç ölçülmemiştir. Aynı yatakta yağın temizlenmesiyle kuru olarak yapılan denemedeysse bu frekanslarda belirgin bir gürültü artışı görülmüştür. İlgili spektrumlar ekler bölümünde Şekil B.1’de verilmiştir. Bu bulgular 8 kHz ve üstündeki frekans bileşenlerinin sürtünme gürültüsünden kaynaklandığı gösterir. Ek B’de verilen grafiklerin spektrumların genel eğilimlerine bakıldığında 8 kHz’in altındaki frekanslar bantları arasında 3,15 ve 6,3 kHz bantlarında baskın davranış görülmektedir.

Şekil 7.2’de kuru çalışan metal ve cam bilyalı polimer yatakların gürültü performansı Şekil 7.1’deki verilerle kıyaslanmıştır. Burada kuru çalışan yatakların belirgin bir şekilde yağlı çalışanlara göre daha gürültülü olduğu görülmektedir. Aynı grafik kuru çalışma koşullarında, özellikle düşük ve orta seviye yüklerde, metal bilyalı yatakların cam bilyalılarından net olarak daha gürültülü olduğunu da göstermektedir. Bu fark 700 d/dak’da 30 N yük altında 16 dB’e kadar çıkmıştır.



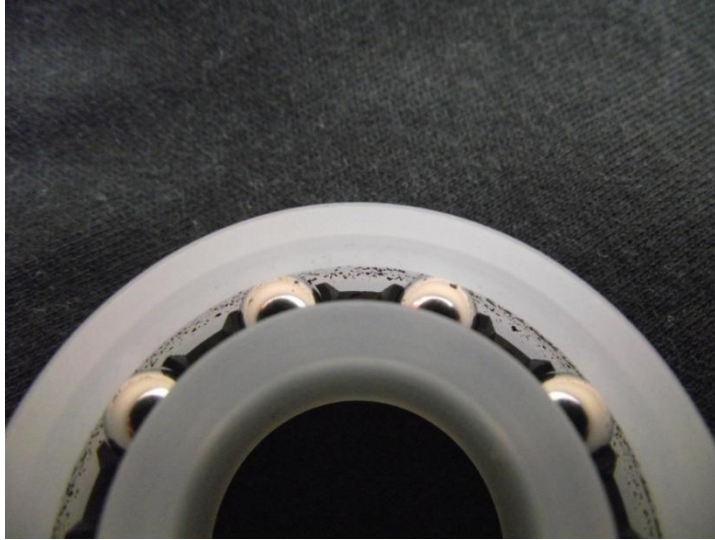
Şekil 7.2 : 700 d/dak çalışma hızında yağlı ve yağsız 6004 yatakların kıyaslaması



Şekil 7.3 : 6004 serisi yataklarda yük ve yüksek frekans eşdeğer ses basıncı ilişkisi

Yağsız çalışan 6004-HR22T2 ve 6004-HR22Q2 kodlu yataklarda değişen yüklere bağlı olarak gürültü karakteristiğinin nasıl değiştiği incelendiğinde Q kodlu cam bilyalı yatakların ve T kodlu metal bilyalı yatakların kendi içinde benzer düzey değişimleri gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 7.3). Bu şekilde görülen cam bilyalı yatakların eğilimlerinin sert yuvarlanma elemanına karşı çalışan PTFE ve poliüretan gibi termoplastik polimerlerin yüke bağlı sürtünme katsayısı değişimiyle (Şekil 4.4) paralellik gösterdiği saptanmıştır.

Metal ve cam bilyalar arasındaki en önemli fiziksel fark olan ısı iletim katsayılarının gürültü karakteristiğinde görülen farkı oluşturduğu düşünülebilir. Ne var ki bu açıklama da ilk etapta sorunlu görünmektedir. Zira paslanmaz çelik bilyaların yüksek ısı iletim katsayısının sürtünme yüzeyinden ısı tahliyesini kolaylaştırarak sürtünme katsayısını düşürmesi beklenir. Fakat deneylerde, kuru çalışma sırasında polimer kafesin zaman zaman bileziklere sürtündüğü gözlenmiş ve bu durum tutarsız ölçüm sonuçlarına neden olmuştur.



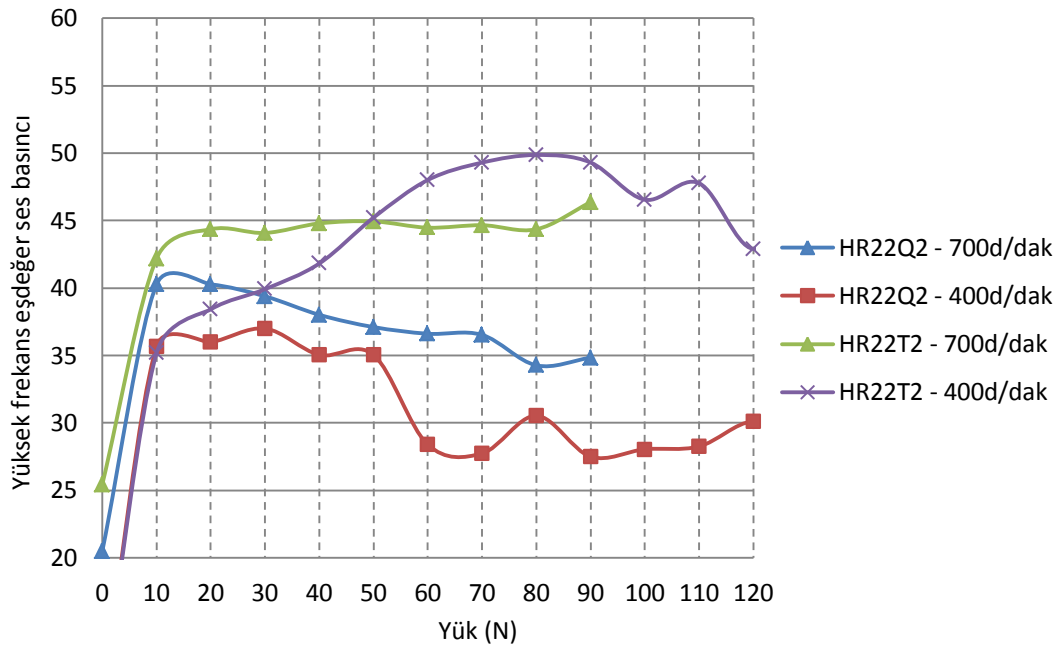
Şekil 7.4: Bilyalı PP yatakta kafes aşınması

Sıcaklık bakımından zorlayıcı koşullarda çalışan çelik bilyalı yataklarda, kafesle ilgili olarak, cam bilyalı yataklarda gözlenmeyen bir durum ortaya çıkmıştır. Kuru çalışan çelik bilyalı yataklarda sıcaklık arttıkça, özellikle 40°C'nin üstünde, pul şeklinde kafes parçalarının kopmaya başladığı gözlenmiştir. Bu durum çelik bilyaların, yüksek ısı iletim katsayısı nedeniyle, yuvarlanma yüzeyinde oluşan ısıyı etkin bir şekilde kafese aktarmasıyla açıklanabilir. Muhtemelen yüksek sıcaklığa maruz kalan kafeste, basınç altındaki bilezik sürtünme yüzeyindeki gibi polimer zincirlerinin yeniden yönlenebilmesi gerçekleşmemekte ve dengesiz yükler kafes

parçalarının kopmasına neden olmaktadır. Şekil 7.4'te 6004 serisi çelik bilyalı yataкта dış bileziğe yapışan kafes parçaları görülmektedir. Bu yatağın çalışması sırasında ölçülen en yüksek sıcaklık 75°C'dir.

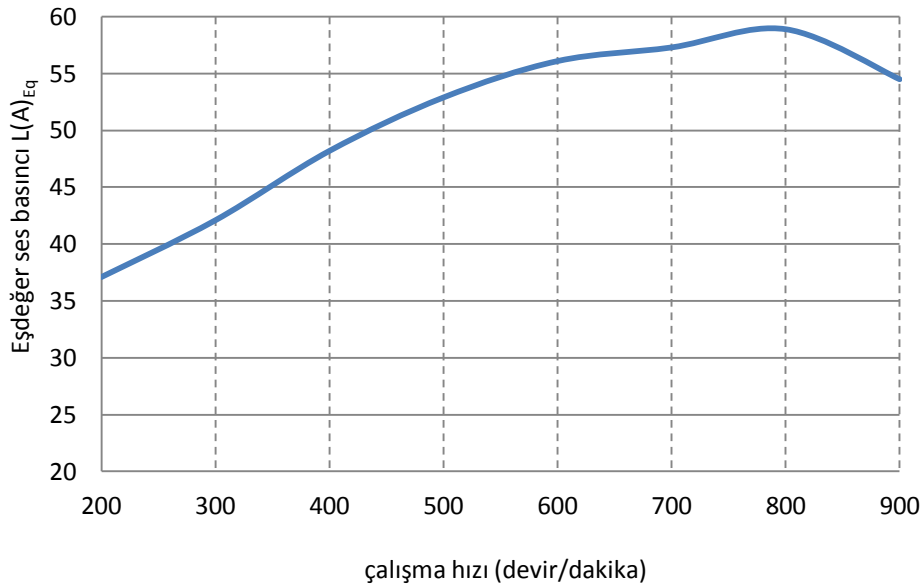
Eğer sıcaklık etkisi gerçekten belirleyici unsursa iki tip yatak arasındaki bu farkın sıcaklığın fazla yükselmediği ve azami 40°C sıcaklığın ölçüldüğü yağlı çalışma durumunda görülmemesi veya daha az görülmesi beklenir. Logaritmik desibel ölçeği göz önünde bulundurulduğunda Şekil 7.1'te verilen ölçüm sonuçları bu beklentiye uygundur.

6204 serisi yataklar için elde edilen yüksek frekans gürültüsü incelendiğinde bir kez daha cam bilyalı ve metal bilyalı yatakların, farklı çalışma hızlarında, kendi içinde benzer gürültü karakteristikleri gösterdikleri, fakat yine birbirlerinden farklı davrandıkları görülmektedir. Şekil 7.5'teki düzeyler Şekil 7.3'tekilerle kıyaslandığında grafik serilerinin gürültü düzeyi sıralamasındaki benzerlik dikkat çekicidir. Metal bilyalı yataklar bu daha büyük dış çapa sahip 6204 serisinde de cam bilyalıyla kıyasla daha gürültülüdür. Her iki yatak serisinde de HR22T2 kodlu metal bilyalı yataklarda daha düşük devirde yüksek devirdekine yakın ve hatta daha yüksek düzeyde gürültü gözlenmesi ilgi çekicidir ve bu durum bilyalı yataklarda gözlenen genel karakteristiğe uymamaktadır [11].



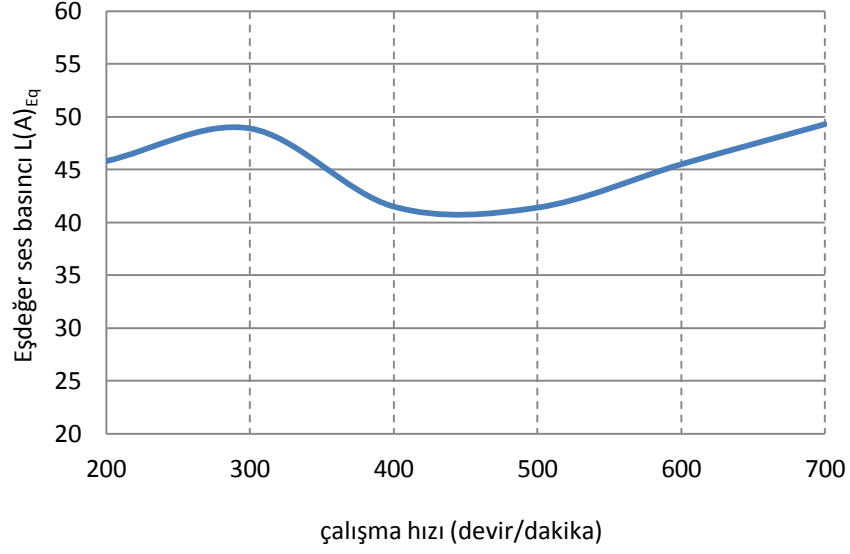
Şekil 7.5 : 6204 serisi yataklarda yük ve yüksek frekans eşdeğer ses basıncı ilişkisi

Sıcaklık parametresinin kontrol edilemediği kuru sürtünme halinde yük ile ses basıncının karşılaştırıldığı eğrilere bakarak farklı çalışma hızlarındaki gürültü düzeylerine dair öngörüle bulunmak sağlıklı sonuç vermeyebilir. Bu durumda sabit yükler altında farklı devirlerde ortaya çıkan ses basınç düzeylerini incelemek yerinde olacaktır. Şekil 7.6'da 80 N yük altındaki 6004 serisi çelik bilyalı yatağın farklı frekanslardaki gürültü düzeyi A-ağırlıklı filtre kullanılarak verilmiştir. A-ağırlıklı filtre düşük frekans gürültülerini büyük ölçüde ihmal ettiğinden yüksek frekanstaki 1/3 oktav değerlerinde gözlenen ses basınçlarıyla orantılı sonuçlar vermiştir. Fakat yüksek frekans ses basınç değerleriyle A-ağırlıklı filtrelenmiş eşdeğer ses basınç düzeylerinin nicelik bakımından kıyaslanmaması gerektiği unutulmamalıdır. Burada genel eğilimin artan dönme hızıyla gürültü düzeyinin artması yönünde olduğu ve bilyalı yatakların genel davranışıyla bağdaştığı görülür. Fakat eldeki veriler kullanılarak metal bilyalı yatakların dönme hızıyla ilgili bir genelleme yapmak zordur.



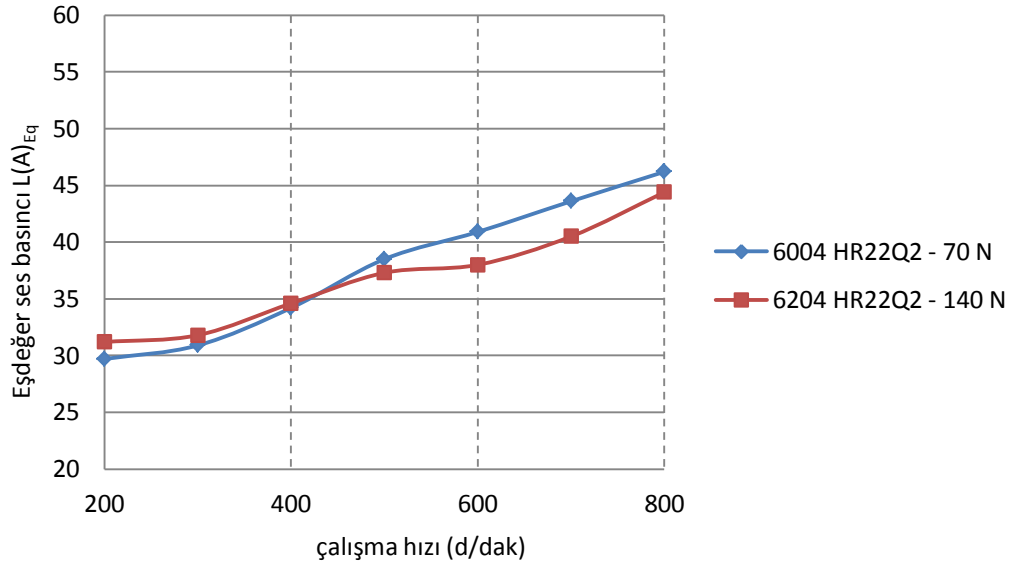
Şekil 7.6 : 6004-HR22T2 kodlu yatağın ses basıncı - devir sayısı eğrisi (80N yük)

6204 serisi çelik bilyalı yatağın, Şekil 7.7'de verilen, 120 N yük altındaki ses basıncı - devir sayısı eğrisiyle Şekil 7.6 arasındaki tutarsızlık da metal bilyalı yatakların gürültü karakteristiğini belirlemenin, sıcaklık parametresi kontrol edilmediği durumda mümkün olamayabileceğini göstermektedir. Bu değişken davranışın kafes sürtünmesindeki belirsizliklerden kaynaklandığı düşünülebilir.



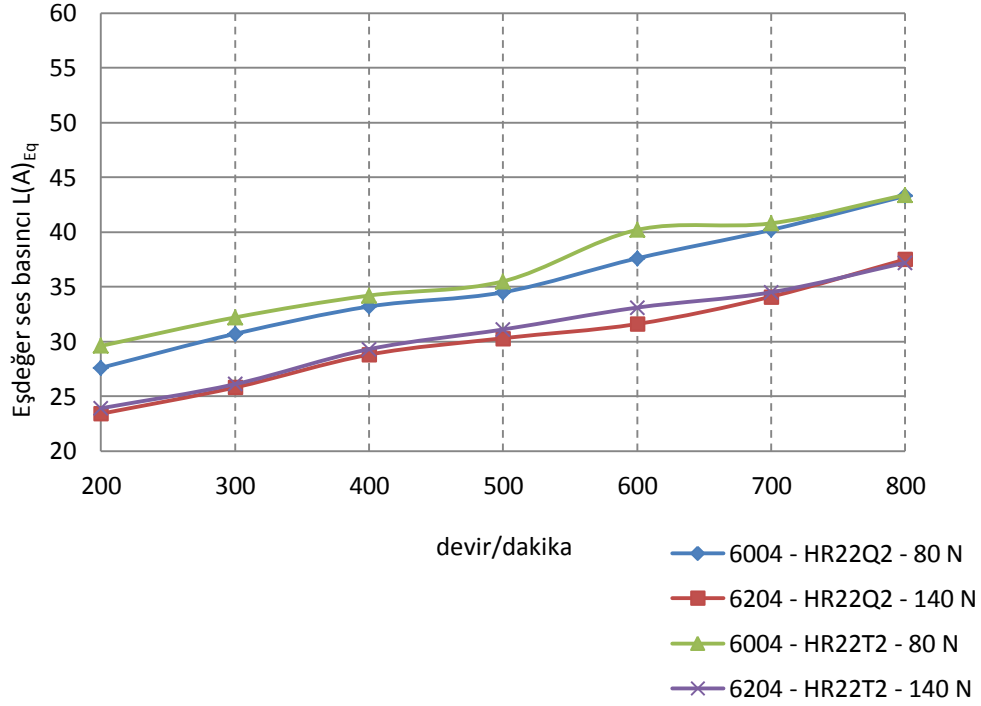
Şekil 7.7 : 6204-HR22T2 kodlu yatağın ses basıncı - devir sayısı eğrisi (120N yük)

Cam bilyalı yataklar için deneysel çalışmalar sonucunda oluşturulan benzer eğrilerinse tutarlı olduğu ve yük ile yüksek frekans ses düzeyini ilişkilendiren eğrilerle bağdaştığı görülmüştür. Şekil 7.8’de 6004 serisi ve 6204 serisi cam bilyalı yatakların farklı devirlerdeki A-ağırlıklı eşdeğer ses basınç düzeyleri verilmiştir.



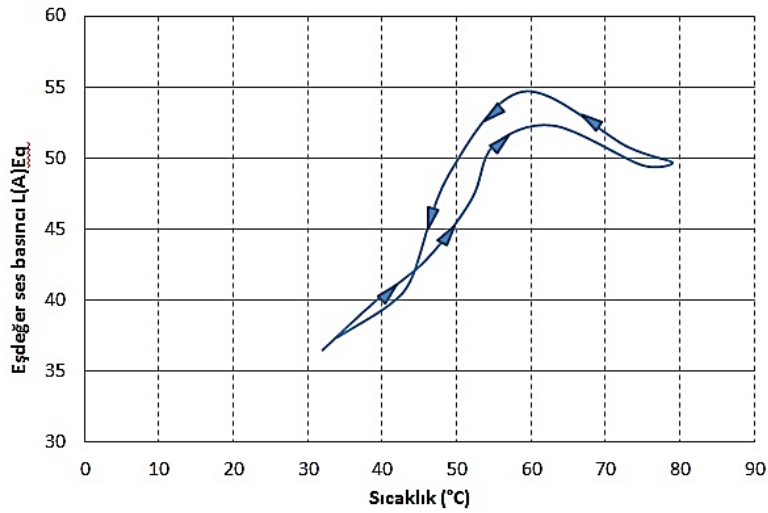
Şekil 7.8: HR22Q2 kodlu cam bilyalı yataklarda ses basıncı - devir sayısı eğrisi

Sıcaklığın makul değerlerde kaldığı (maksimum 40°C) ve yatakların PV değerlerinin altında kaldığı yağlı koşullarda devir sayısı ve eşdeğer ses basıncı arasında büyük bir tutarlılık gözlenmektedir. Metal bilyalı yataklar da buna istisna oluşturmamaktadır (Şekil 7.9).



Şekil 7.9 : Yağlı polimer yataklarda devir – ses basıncı ilişkisi

Elde edilen bulgular, bilyalı polimer yatakların, kuru sürtünme durumunda, dönme hızı ve maruz kaldıkları yük gibi dış etkenlere bağlı gürültü karakteristiklerinin sıcaklık etkisinden bağımsız olmadığını göstermiştir. Sıcaklığın gerçekte ne kadar önemli bir parametre olduğu da deneysel olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.10 : 6204 HR22T2 kodlu yatakta ses basıncı – sıcaklık ilişkisi

Şekil 7.10'da 6204 serisi çelik bilyalı polimer yatakta 400 d/dak çalışma hızında, 100N yük altında farklı sıcaklıklarda ölçülen ses basıncı değerleri verilmiştir. Önce artan sıcaklıkta ölçümler yapılmış, sonrasında yatağın soğuması beklenerek yakın

sıcaklıklarda bu ölçümler tekrarlanmıştır. Sıcaklık – ses basıncı eğrisinin artan ve azalan sıcaklıkta benzer bir karakter gösterdiği gözlenmiştir. Karakteristik görünen bu eğri sıcaklık parametresinin bilyalı yatak gürültüsünü belirleyen başlıca parametrelerden biri olduğunu ortaya koymaktadır. Ölçülen sıcaklıklarda polipropilenin *PV* değeri aşılmamıştır.

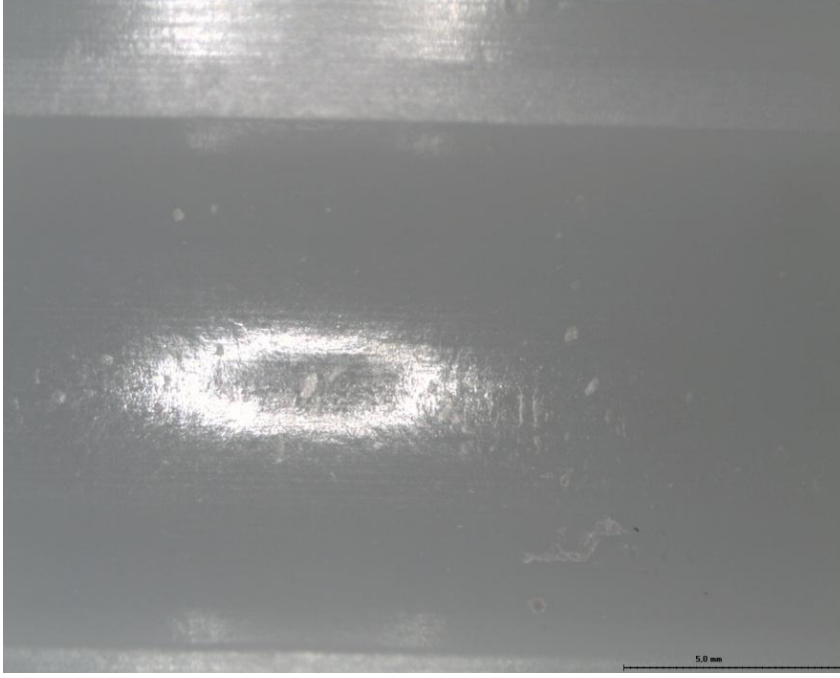
Bilyalar üzerinden ölçülen sıcaklık değerlerinin gerçek çalışma sıcaklığını ne ölçüde temsil ettiği de araştırılması gereken bir husustur. Zira deneyler sırasında yeni kullanılmaya başlayan 6204 HR22Q2 kodlu cam bilyalı yatak 130 N yük altında 900 d/dak hızda dönerken 80°C'nin üstüne çıktığında kafes deformasyonu sonucunda parçalanmıştır. 80°C'lik sıcaklık temel alındığında bu yatak *PV* değerini aşmamaktadır. Dolayısıyla bu durumda etkin çalışma sıcaklığının 100°C olarak verilen sınır sıcaklığı aştığı ve yatağın işlevini yerine getiremez hale geldiği söylenebilir. Çalışma sıcaklığının ölçülebilirlik düzeyi bilyalı polimer yataklar için geçerli belirsizliklerden biridir. Çalışmaz hale gelen yatak Şekil 7.11'de görülmektedir.



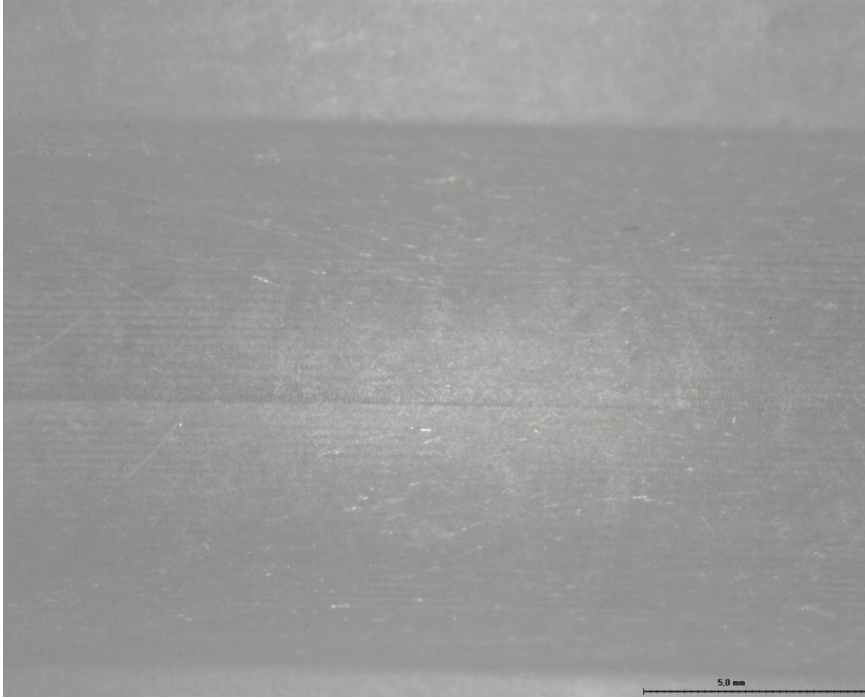
Şekil 7.11 : Kafesi parçalanmış 6204 serisi bilyalı yatak

Bilyalı polimer yataklarda, kuru sürünme durumunda, temas noktalarında gerçekten polimer zincirlerinin yeniden yönlenmesini sağlayacak sıcaklığa ve basınca ulaşıldığı kuru ve yağlı çalışan iç bileziklerin mikroskop görüntülerine bakılarak anlaşılabilmektedir. Şekil 7.12'deki parlak yüzey polimer zincirlerinin yeniden yönlendiğine işaretler. Üst kısımdaki parlak şerit de kafesin bilezik üstünde

sürtündüğünü göstermektedir. Şekil 7.13'te görülen yağlı çalışmış yatak iç bileziğinde ise polimer yüzey yapısının değişmediği görülmektedir.



Şekil 7.12: Kuru çalışmış 6204 serisi metal bilyalı yatak iç bileziğinin görüntüsü



Şekil 7.13: Yağlı çalışmış 6204 serisi metal bilyalı yatak iç bileziğinin görüntüsü

7.1 Değerlendirme Sonucu ve Öneriler

Deneyde kullanılan boyutlardaki bilyalı yatakların baskın frekanslarının 2 kHz ve üzerindeki frekans bantlarında ortaya çıktığı, özellikle 3,15 kHz'lik frekans bandının her durumda baskın olarak öne çıktığı görülmüştür. 8 kHz ve üzerindeki frekans bantlarının sürtünme gürültüsü kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.

Yapılan deneyler neticesinde bilyalı polimer yatakların yağlandıkları takdirde kuru çalışma koşullarına göre 10 ila 25 dB daha sessiz olduğu görülmüştür. Fakat polimer yatakların titreşim sönümleme avantajının kullanılamadığı durumda, yağlı koşullarda dahi bunlar, 10 dB civarında bir farkla, kaliteli metal yataklara kıyasla daha gürültülüdür.

Yağsız koşullarda ise, özellikle 40°C'nin üstünde, kafesle bilezikler arasında sürtünme gerçekleştiği gözlenmiş, metal bilyalı yataklarda bu sürtünmenin daha sık ve daha büyük basınçlar altında gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Metal bilyalı yataklarda bilyaların yüksek ısı iletkenliğinin bilezik ve bilya arasındaki sürtünme sırasında oluşan ısıyı etkin bir şekilde kafese taşıdığı ve kafesin aşınmasına neden olduğu kanaatine varılmıştır. Genel anlamda çelik bilyalı yataklarda bunların dengi olan cam bilyalı yataklara kıyasla daha yüksek gürültü düzeyleri saptanmıştır ve bunun olası nedeninin kafesten aşınan parçaların bilyalar üzerine yapışarak ek titreşimlere sebebiyet vermesi olduğuna dair görsel bulgulara rastlanmıştır. Tiz sesiyle yüksek frekans gürültü düzeyini arttıran kafes sürtünmesinin de bu mekanizma sonucunda metal yataklarda daha büyük oranda tetiklendiği düşünülmektedir.

Bilyalı polimer yatak gürültüsünün çalışma hızına göre değişimi genel anlamda çelik yatakların literatürde bulunan verileriyle örtüşmekte olup gürültü düzeyi artan hızla birlikte artma eğilimindedir. Çelik bilyalı polimer yatakların gürültü düzeyinin radyal yüke göre değişiminde belirgin bir eğilime rastlanmamakla beraber cam bilyalı yatakların eğilimlerinin sert yuvarlanma elemanına karşı çalışan PTFE ve poliüretan gibi termoplastik polimerlerin yüke bağlı sürtünme katsayısı değişimiyle paralellik gösterdiği saptanmıştır. Sözü edilen farklı faktörlerin ön plana çıktığı metal bilyalı yataklarda böyle bir paralellik tespit edilememiştir.

İç bilezik yuvarlanma yüzeylerinin mikroskop görüntülerinde, kuru çalışma halinde yüzeylerin parladığı görülmüştür. Bu durum lokal olarak ısı deformasyonu

sıcaklığının ve dolayısıyla çalışma sıcaklığının aşıldığına işarettir. Bilyalar üzerinde yapılan sıcaklık ölçümleri ise 80°C'yi aşmamakta ve lokal sıcaklığı tam olarak yansıtmamaktadır. Çalışma yüzeylerinin analizi kuru çalışan yatakların her zaman ısınma riskiyle karşı karşıya olduğunu göstermiştir. Sıcaklık ve gürültü arasında ilişki kuran deneyde kuru çalışan yatağın gürültü düzeyinin 30°C ve 50°C olarak ölçülen sıcaklıklar arasında hızla yükseldiği görülmüştür. Bu durumda da lokal sıcaklıkların ölçülen sıcaklıklardan daha yüksek olması kaçınılmazdır.

Deneyisel bulgular ve gözlemler soğutma sağlamayan bir ortamda yağsız çalışan bilyalı polimer yatakların her zaman risk altında olduğunu ve tamamen kuru çalışmanın sadece düşük yükler ve düşük hızlar için tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir. Bu anlamda bilyalı polimer yataklar kuru halde temkinli bir şekilde kullanılmalı ve artan gürültü düzeyinin yatağın tehlikeli sıcaklıklara çıktığına dair bir işaret olabileceği unutulmamalıdır. Özellikle 8 kHz'in üzerindeki frekanslarda ortaya çıkan gürültü, yüksek sürtünmeye işaret ettiğinden, geçerli koşullarda çalışan polimer yatağın güvenilirliğinin düşük olduğunun işareti olabilir.

Deneyler neticesinde, bilyalı polimer yatakların gürültü düzeyiyle ilgili gelecekte yapılacak çalışmalarda sıcaklığın başlı başına bir parametre olarak ele alınmasının ve sıcaklık kontrolü sağlayan bir deney düzeneği oluşturulmasının faydalı olacağı görülmüştür. Zira bilyalı polimer yatakların gürültü karakteristiğinin tam olarak anlaşılması ancak sıcaklık parametresiyle etkileşiminin analiz edilmesiyle mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Harris, T. A., Kotzalas, M. N.**, 2006. Rolling Bearing Analysis, Essential Concepts of Bearing Technology, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, ISBN-10: 0-8493-7183-X, ISBN-13: 978-0-8493-7183-7
- [2] **KMS Bearings, Inc.**, Ten Good Reasons to Use Plastic Ball Bearings, <www.kmsbearings.com/pdf/RadialBallBrgrs_Plastic.pdf>, alındığı tarih: 15.12.2010
- [3] **SKF Group**, Inreactive Engineering Catalogue: Polymer Ball Bearings, <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=en&newlink=1_23_70> , alındığı tarih: 29.11.2010
- [4] **Igarashi, T.**, 1960. Noise of Ball Bearing (1st Report, Case of Simple Ball Bearing), Bulletin of JSME, **3**(10), 220-227
- [5] **Igarashi, T.**, 1962. Noise of Ball Bearing (2nd Report, Case of Fitted Ball Bearing), Bulletin of JSME, **5**(17), 184-194
- [6] **Igarashi, T.**, 1963. Noise of Ball Bearing (4th Report, Clearance and Fitting Effects on Fitted Ball Bearing Noise), Bulletin of JSME, **6**(22), 394
- [7] **Igarashi T.**, 1964. Noise of Ball Bearing in Electric Motor, **7**(25), Bulletin of JSME, 200-208
- [8] **Igarashi, T.**, 1964, Noise of Ball Bearing (5th Report, Generating Mechanism of Noise), Bulletin of JSME, **30**(220), 1516-1524
- [9] **Lucht, R. F., Scanlan R. H.**, 1968, Establishment of Objective Criteria Reflecting Subjective Response to Roller-Bearing Noise, Journal of the Acoustical Society of America, Volume **44**, 1, 1-4
- [10] **Nagamatsu A., Fukuda M.**, 1978-08, Sound Noise Generated from Ball Bearing in High Speed Rotation, Bulletin of JSME, **21**(158), 1306-1310
- [11] **Jayaram, V. D., Jarchow, F.**, 1978, Experimental studies on ball bearing noise, Wear, **46**-2, 321-326
- [12] **Ban, J.E., Rho, B.H., Kim K.W.**, 2007, A study on the sound of roller bearings under radial load, Tribology International , **40**, 21-28
- [13] **Bayer, O.**, 1989, Noise and vibration behaviour of Rolling bearings, Ball and Roller Engineering • Industrial Engineering, FAG
- [14] **SKF Online Catalogue**, Engineering Products - Single Row Polymer Bearings, <http://www.skf.com/skf/productcatalogue/jsp/viewers/productTableViewer.jsp?presentationType=3&lang=en&tableName=1_23_5>, alındığı tarih: 15.11.2010

- [15] **Harnoy, A.**, Bearing Design in Machinery: Engineering Tribology and Lubrication (Dekker Mechanical Engineering), 2003, Marcel Dekker, Inc., New York, ISBN: 0-8247-0703-6
- [16] **Ebewele R.O.**, 2000, Polymer Science and Technology, 1st Edition, CRC Press LLC, Boca Raton, ISBN 0-0849-8939-9
- [17] **Brandrup, J., Immergut E. H., Grulke, E. A.**, 1999, Polymer Handbook, 4th Edition, Wiley-Interscience, ISBN 0-471-16628-6 [V21-V28]
- [18] **Sinha, S. K., Briscoe, B. J.**, 2009. Polymer Tribology, Imperial College Press, Singapore, ISBN-13 978-1-84816-202-0, ISBN-10 1-84816-202-2
- [19] **Blanchet, T. A.**, Translated to english by: E. Richard Booser, 1997, Tribology Data Handbook - An Excellent Friction, Lubrication, and Wear Resource, CRC Press, Print ISBN: 978-0-8493-3904-2, eBook ISBN: 978-1-4200-5047-9
- [20] **Yamaguchi, Y.**,1990, Tribology of Plastic Materials, Elsevier Science Publishers B.V., New York, ISBN 0-444-87445-3
- [21] **Bharat, B.**, 2001, Modern Tribology Handbook, CRC Press, Print ISBN: 978-0-8493-8403-5, eBook ISBN: 978-0-8493-7787-7
- [22] **Booser, E.R.**, 1989, CRC Handbook of Lubrication: Theory and Practice of Tribology, Volume II: Theory and Design, CRC Press LLC, ISBN 0-8493-3902-2 (v.2) (s. 185, 189-190)
- [23] **Everest, F.A.**, Pohlmann K.C., 2009, Master Handbook of Acoustics, Fifth Edition, McGraw-Hill, eBook, ISBN 978-0-07-160333-1
- [24] **Rossing, T.D (Ed.)**, 2007, Springer Handbook of Acoustics, Springer Science+Business Media LLC, New York, ISBN 978-0-387-30446-5
- [25] **Barron, R. F.**, 2003, Industrial Noise Control and Acoustics, Marcel Dekker, Inc, New York, ISBN: 0-8247-0701-X
- [26] **Brüel & Kjaer**, PRODUCT DATA - Modular Precision Sound Analyzer — 2260 Investigator™ including BZ7206 and BZ7210 Sound Analysis Software

EKLER

EK A.1 : 6004 serisi bilyalı yatak modal analizleri

EK A.2 : 6204 serisi bilyalı yatak modal analizleri

EK B.1 : 6004 serisi metal yatağın ses basıncı frekans spektrumu

EK B.2 : 6004 serisi yağlı polimer yatakların ses basıncı frekans spektrumu

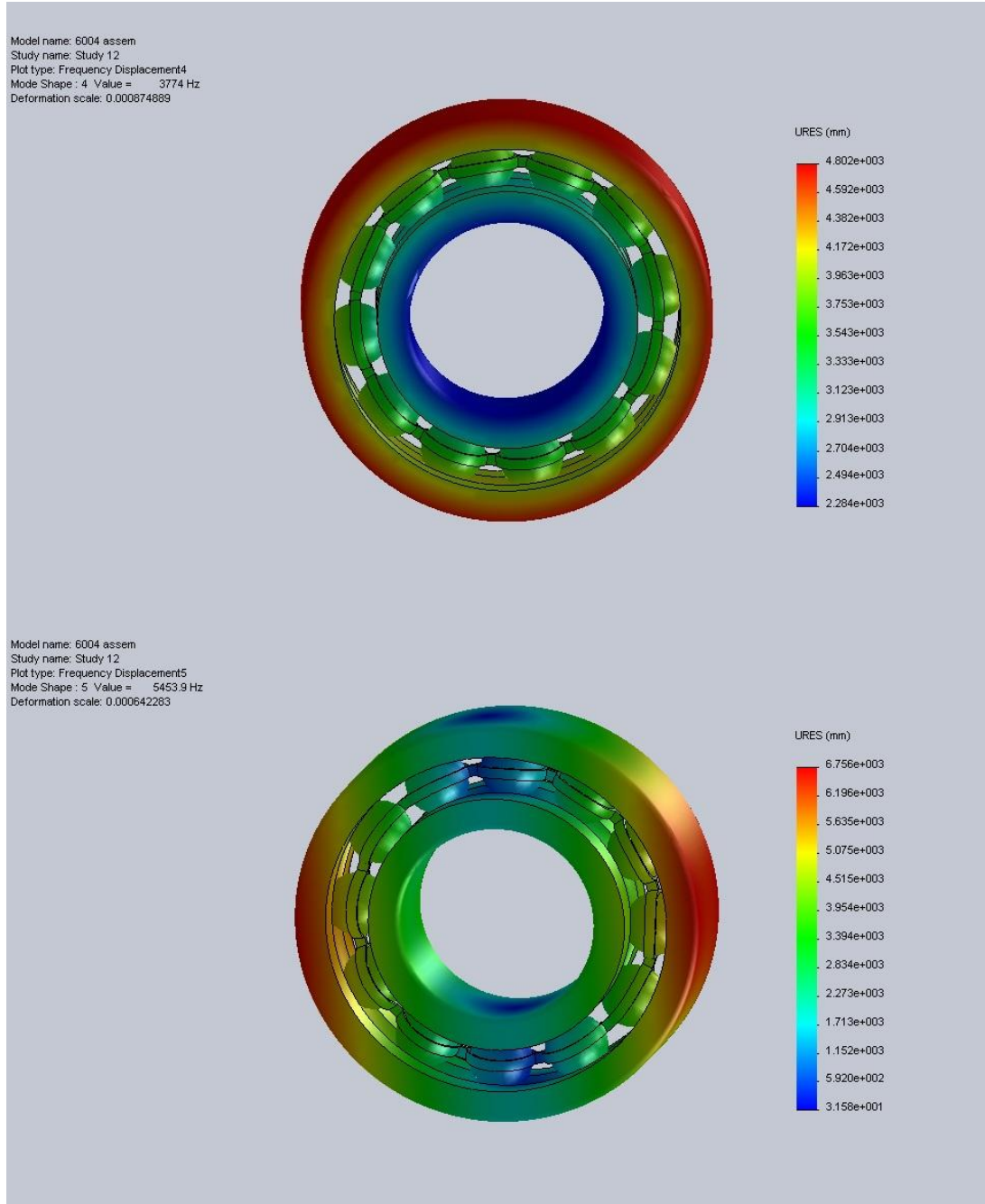
EK B.3 : 6004 HR22Q2 serisi yağlı polimer yatakların ses basıncı frekans spektrumu

EK B.4 : 6004 HR22T2 serisi kuru polimer yatakların ses basıncı frekans spektrumu

EK B.5 : 6204 HR22Q2 serisi kuru polimer yatakların ses basıncı frekans spektrumu

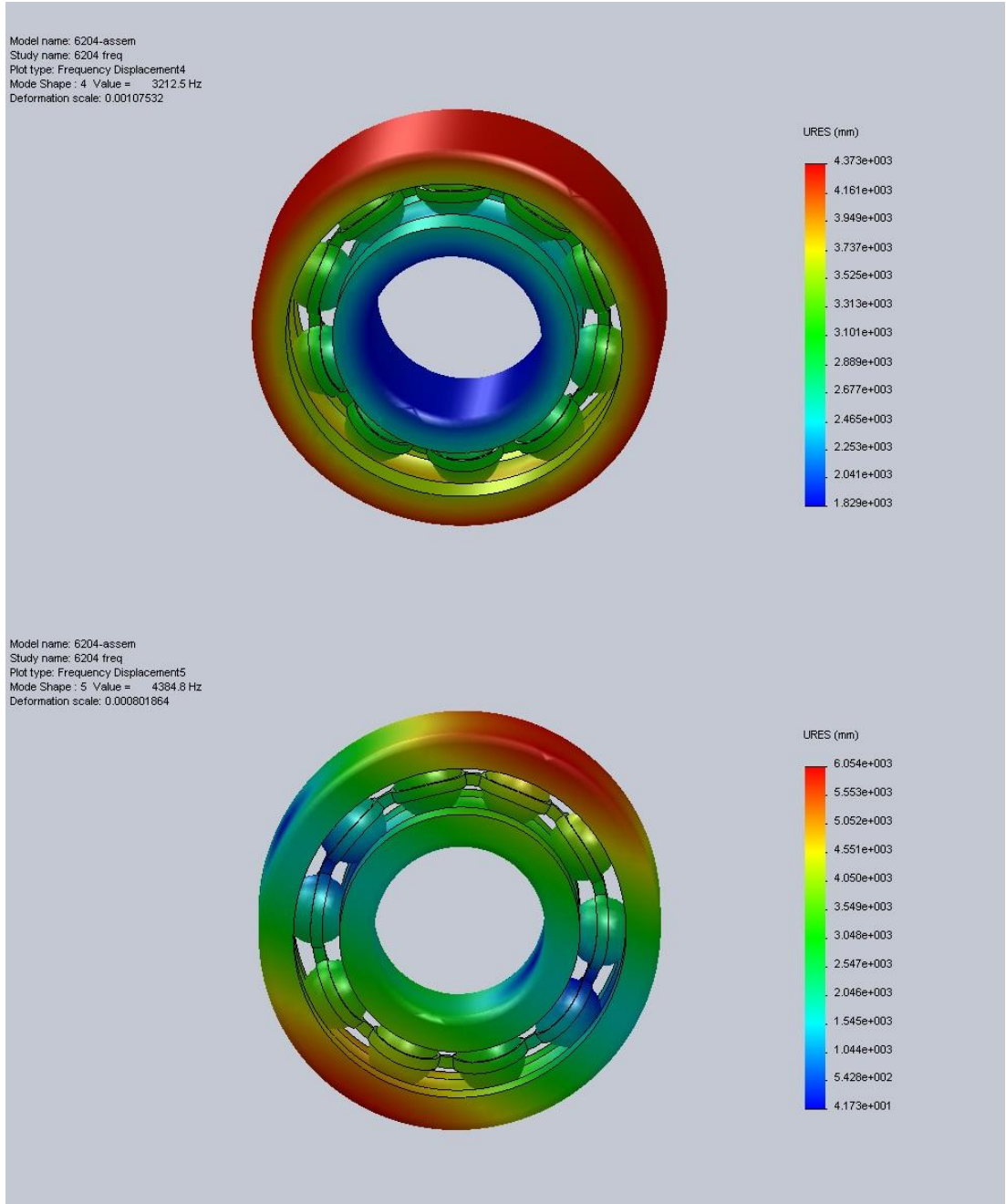
EK B.6 : 6204 HR22T2 serisi kuru polimer yatakların ses basıncı frekans spektrumu

EK A.1



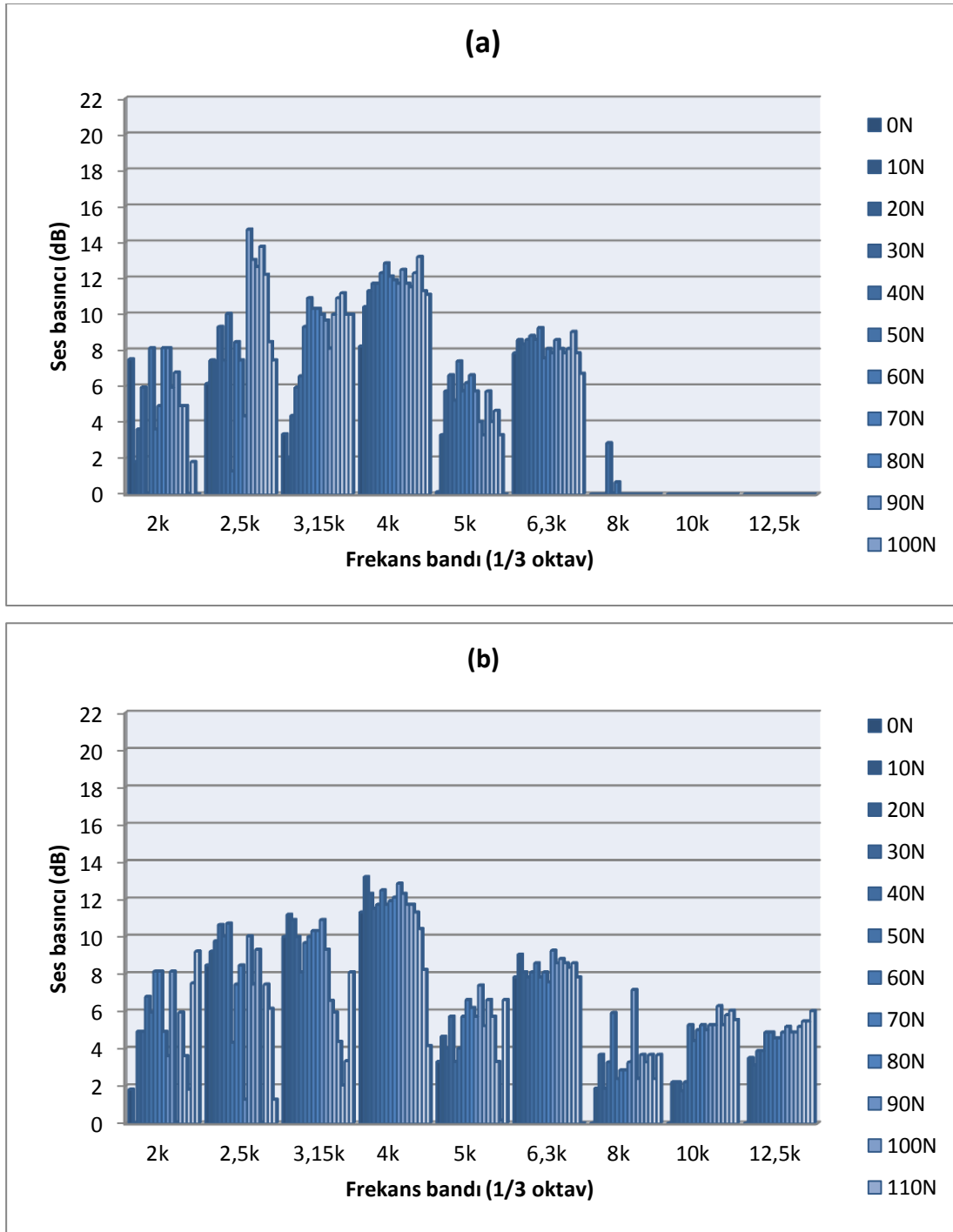
Şekil A.1: 6004 serisi metal yataklarda modal analiz sonuçları

EK A.2



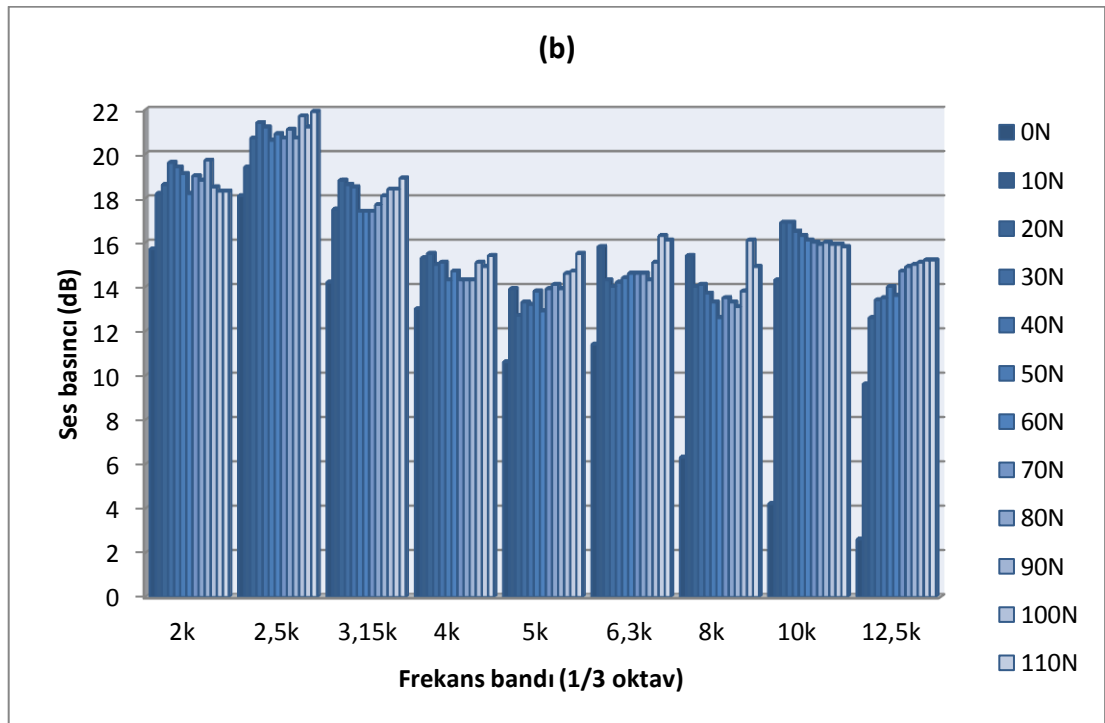
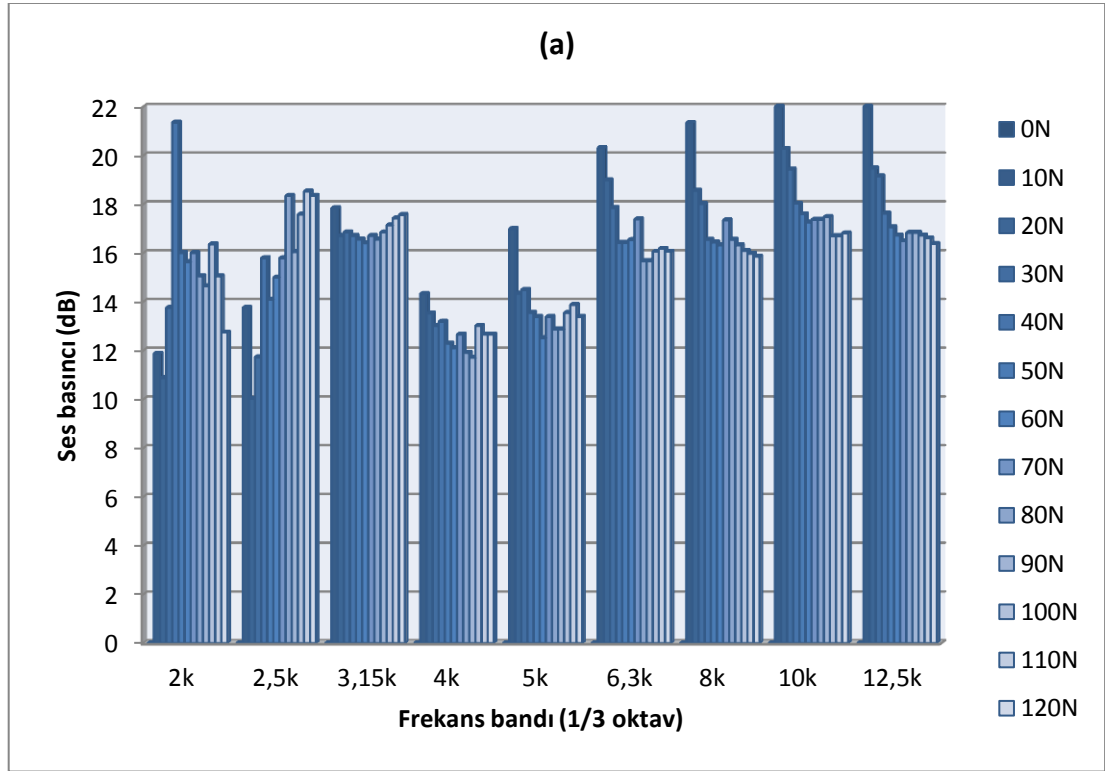
Şekil A.2: 6204 serisi metal yataklarda modal analiz sonuçları

EK B.1



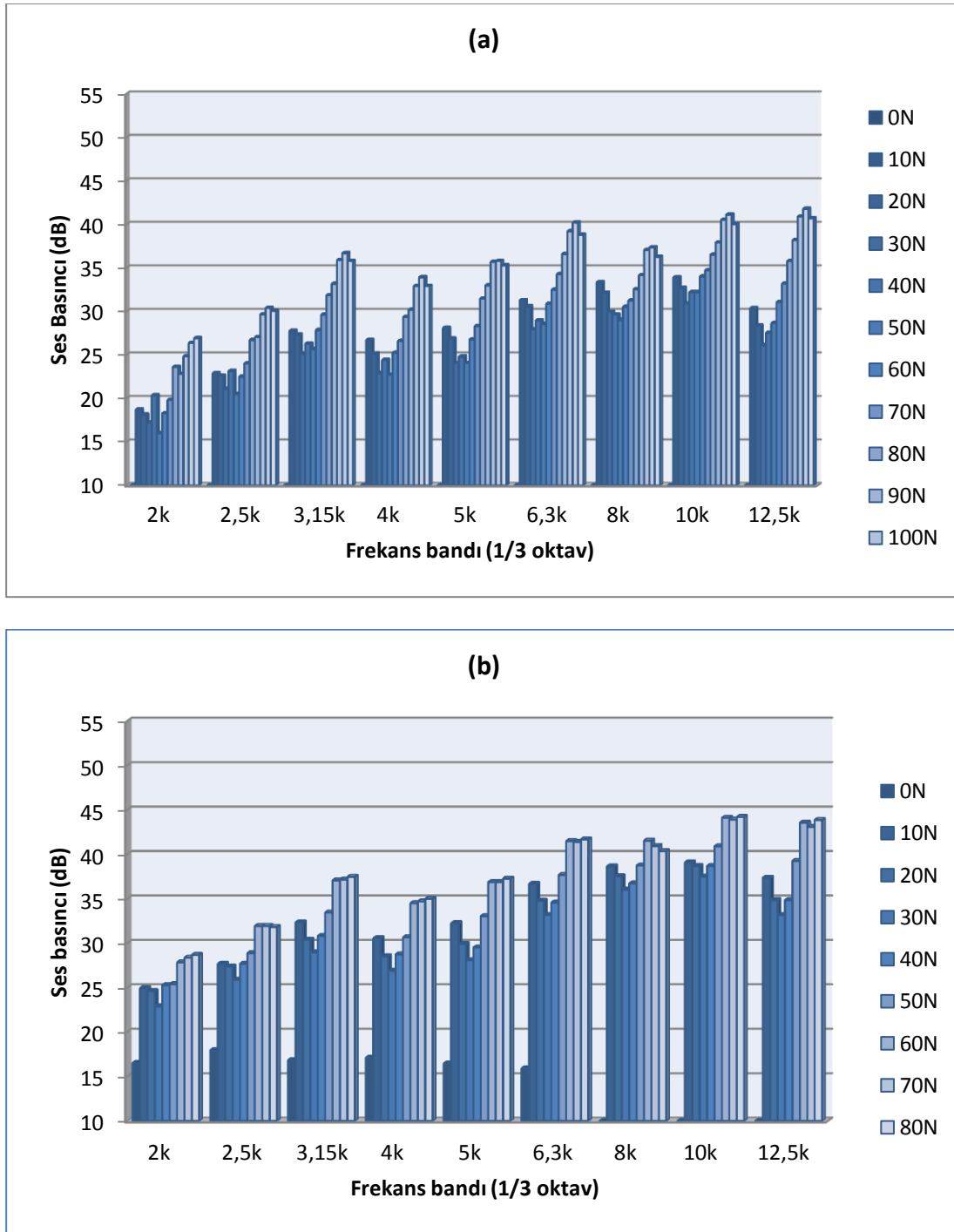
Şekil B.1: 6004 serisi metal yatağın frekans analiz spektrumu – 700 d/dak:
(a)Yağlı. (b)Yağsız

EK B.2



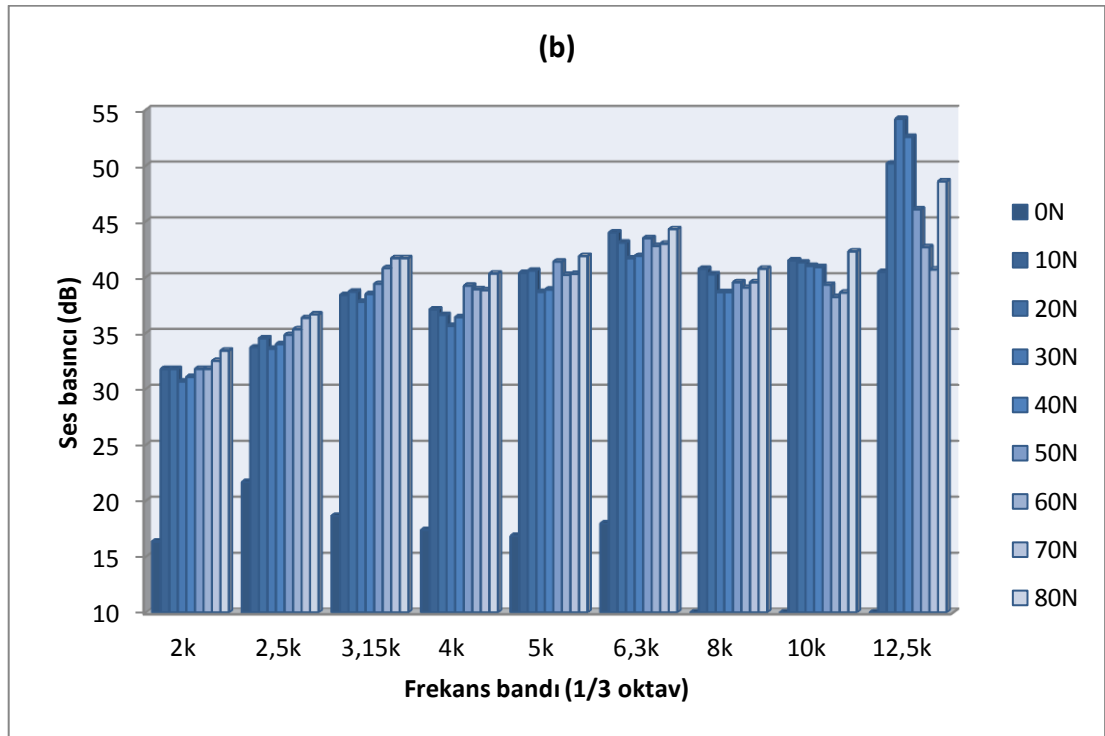
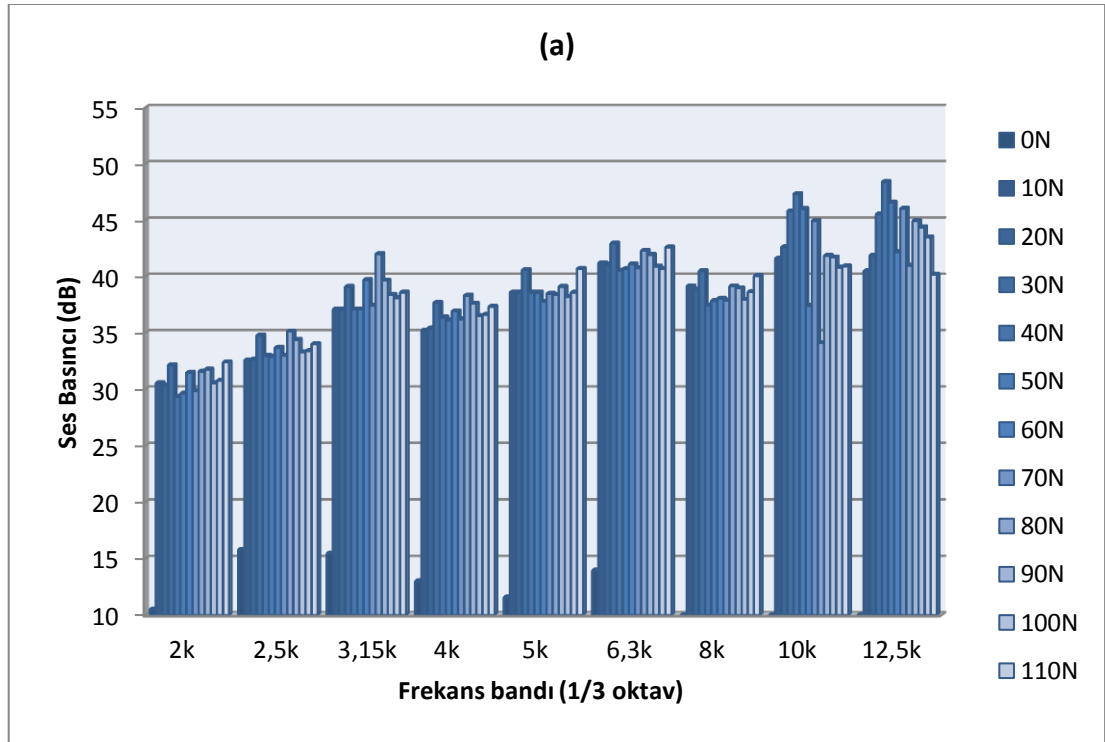
Şekil B.2: 6004 serisi yağlı polimer yatakların frekans analizi – 700 d/dak:
(a)Cam bilyalı. (b)Metal bilyalı

EK B.3



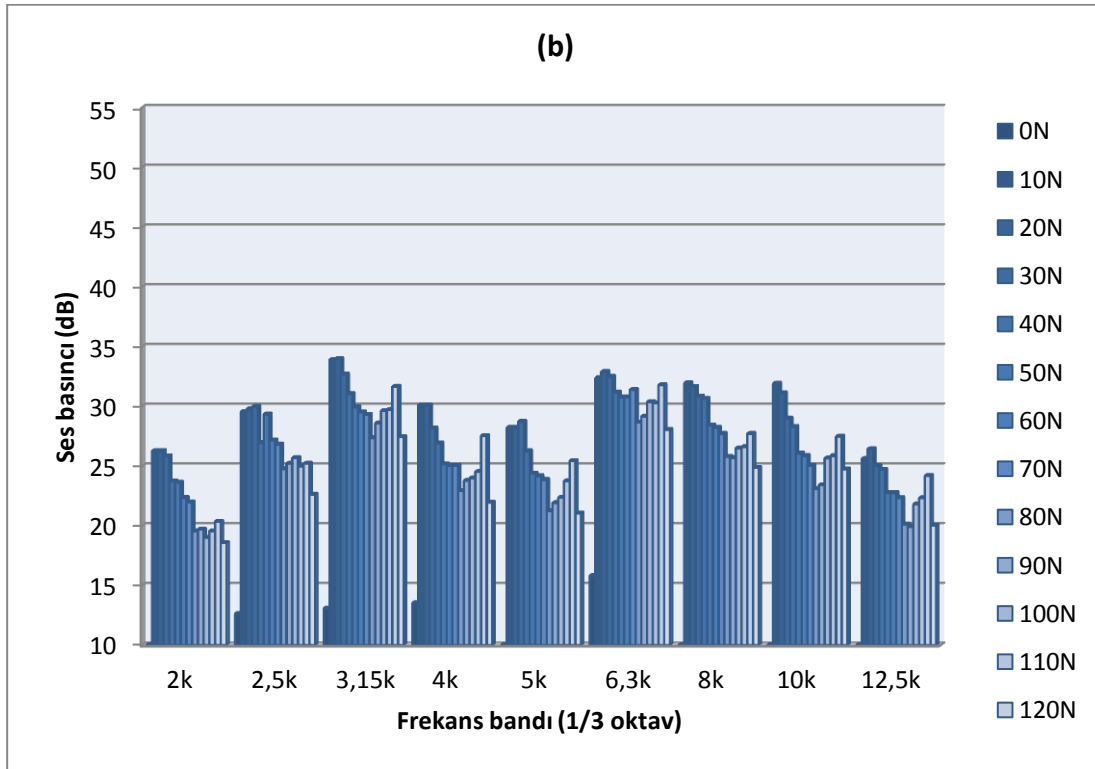
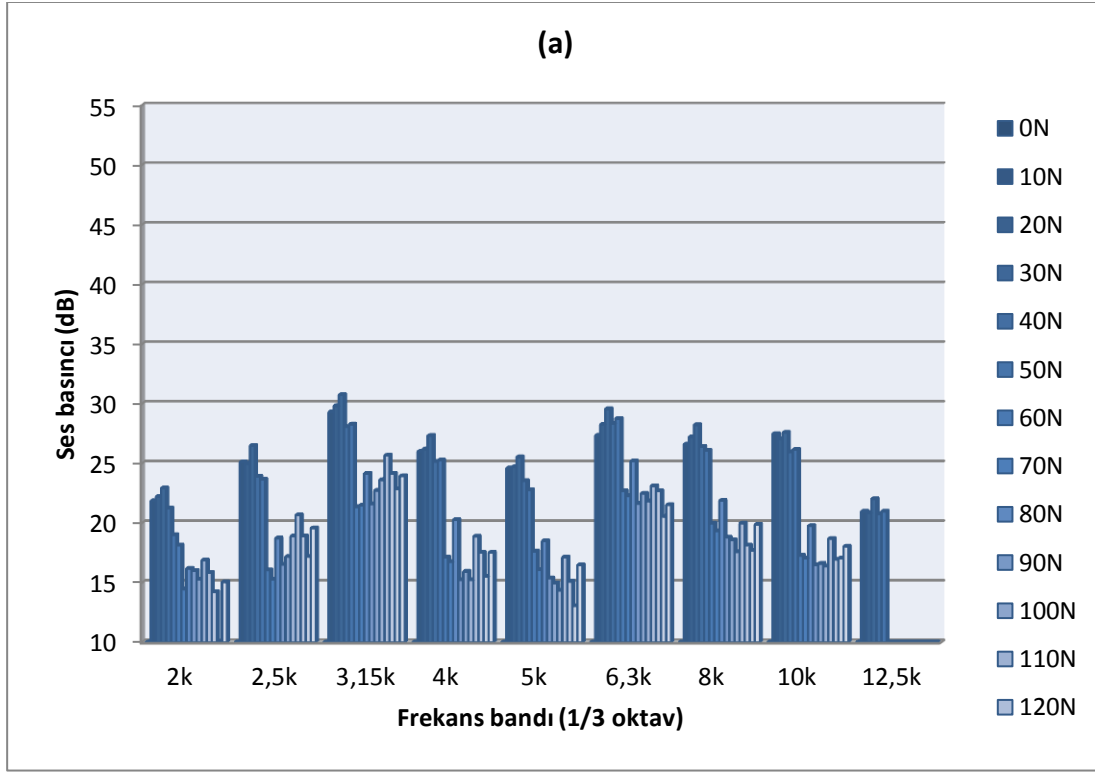
Şekil B.3: 6004 HR22Q2 serisi kuru polimer yatakların ses basıncı frekans spektrumu: (a)700 d/dak. (b)900 d/dak

EK B.4



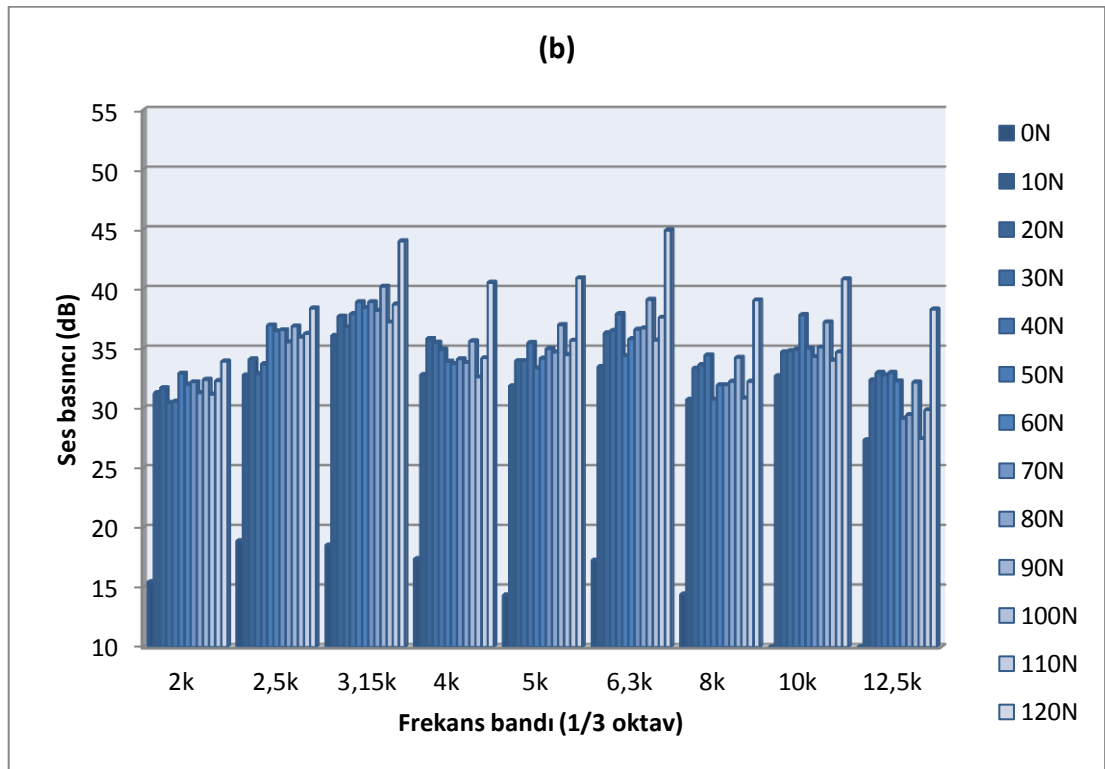
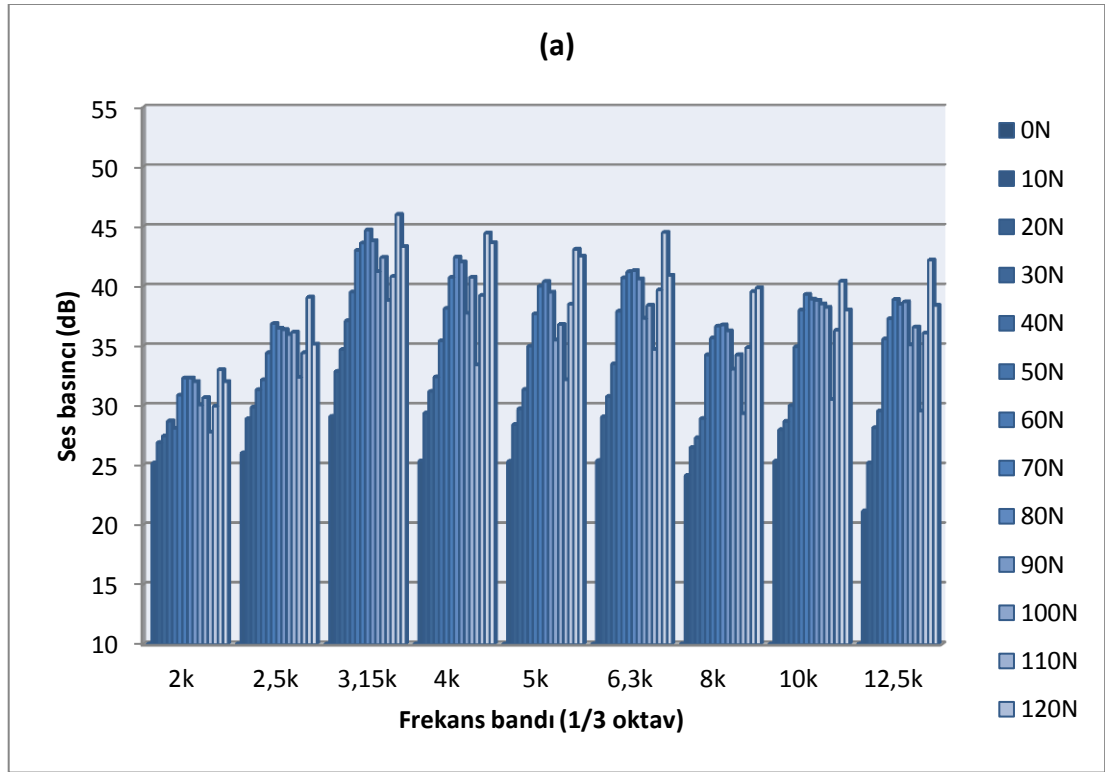
Şekil B.4: 6004 HR22T2 serisi kuru polimer yatakların ses basıncı frekans spektrumu: (a)700 d/dak. (b)900 d/dak

EK B.5



Şekil B.5: 6204 HR22Q2 serisi kuru polimer yatakların ses basıncı frekans spektrumu: (a)400 d/dak. (b)700 d/dak

EK B.6



Şekil B.6: 6204 HR22T2 serisi kuru polimer yatakların ses basıncı frekans spektrumu: (a)400 d/dak. (b)700 d/dak

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ersin KAMBUROĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: Bulgaristan, 27.01.1984

Adres: İstanbul

Lisans Üniversitesi: İstanbul Üniversitesi