

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMER MALZEMELERDE SÜRTÜNME
KAYNAKLI GÜRÜLTÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Atakan ALTINKAYNAK
(503031202)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Haziran 2005**

**Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Vedat TEMİZ
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Sait YÜCENUR
Doç.Dr. Haluk EROL**

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

Sürtünmeden kaynaklanan gürültüye endüstriyel uygulamalarda ve günlük hayatımızda sıkça rastlanmaktadır. Gün geçtikçe daha yaygın bir şekilde kullanılan polimer malzemelerin sürtünme kaynaklı karakteristiklerinin bilinmesi birçok tasarım ve uygulamada daha faydalı sonuçların ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Yapılan bu çalışmada, farklı hızlarda çeşitli polimer malzemeler için ortaya çıkan sürtünme kaynaklı gürültü incelenmiştir.

Bu tez çalışmasıyla birlikte sürtünme kaynaklı gürültü konusunun çok kapsamlı ve gelişmeye açık bir konu olduğunu gördüm. Beni bu konuda çalışmaya sevk eden ve çalışmalarımda bana destek olan tez danışmanım Y. Doç. Dr. Vedat TEMİZ'e, çalışmanın her aşamasında fikirlerine başvurduğum Dr. Zeynep PARLAR'a, deney tesisatının akustikle ilgili kısmının tasarımında ve ses ölçüm aşamasında bilgilerinden faydalandığım Y. Doç. Dr. Haluk EROL'a, akustik verilerin elde edilmesinde yardımcı olan akustik ve titreşim laboratuvarından Müh. Ersin ÖZTÜRK'e ve Müh. Ahmet AKBAŞ'a, deney tesisatının hazırlanmasında bana teknik destek veren makina elemanları laboratuvarından Orhan KAMBUROĞLU'na ve Yusuf Ziya KOCABAL'a, deney malzemelerini temin eden POLİKİM A.Ş.'ye ve çalışmalarım sırasında manevi destekleri ile daima yanımda olan çalışma arkadaşlarım ile üniversite bünyesinde birlikte çalıştığım değerli öğretim üyelerine teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2005

Atakan ALTINKAYNAK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
2. POLİMERLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ	5
2.1 Poliamidler ve Uygulama Alanları	6
2.1.1 Poliamid 6	7
2.1.2 Poliamid 66	7
2.1.3 Döküm poliamid 6	8
3. SÜRTÜNME	9
3.1 Polimer Malzemelerde Sürtünme	9
3.2 Polimer Malzemelerde Sürtünmeye Etki Eden Parametreler	11
3.2.1 İç yapı	11
3.2.2 Normal kuvvet	11
3.2.3 İzafi kayma hızı	12
3.2.4 Sıcaklık	13
4. SÜRTÜNME DEN KAYNAKLANAN GÜRÜLTÜ	14
4.1 Sürtme Gürültüsü	15
4.2 Sürtünme Kaynaklı Titreşimlerin Oluşturduğu Gürültü	16
4.2.1 Tutma-bırakma	17
4.2.2 Kitleme-bırakma	22
4.2.3 Negatif hız-sürtünme ilişkisi	23
5. DENEY TESİSATI ve DENEYLER	24
5.1 Deney Tesisatının Tanıtılması	24
5.2 Akustik Oda	26
5.3 Deneylerin Yapılışı	27
6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	29
6.1 Deney Sonuçları	29
6.2 Sonuçların Değerlendirilmesi	30
KAYNAKLAR	33

EKLER	35
ÖZGEÇMİŞ	55

KISALTMALAR

SPL	: Ses Basınç Düzeyi
PMMA	: Polimetil metakrilat
PA	: Poliamid
POM	: Polioksimetilen
PTFE	: Politetrafloretillen
PE	: Polietilen

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Dünya genelinde 2000 yılına kadar olan ağırlıkça plastik tüketimi.....	2
Şekil 2.1 : POM malzemesinin sıcaklığa bağlı olarak gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	5
Şekil 2.2 : Amorf termoplastiklerde sıcaklığın elastiklik modülüne etkisi	6
Şekil 3.1 : Temas yüzeyinin yapısı	10
Şekil 3.2 : Molekül zincirleri arasında kayma hali	11
Şekil 3.3 : PA-çelik teması için farklı kayma hızlarında normal kuvvet-kinetik sürtünme katsayısı ilişkisi	12
Şekil 3.4 : Çeşitli polimer malzemeler için kayma hızının sürtünme üzerindeki etkisi.....	12
Şekil 4.1 : Tungsten karbür-çelik teması için elde edilen SPL spektrumu	16
Şekil 4.2 : Tutma-bırakma titreşimlerinde testere ağzına benzer yer değiştirme-zaman grafiği	18
Şekil 4.3 : Sanki harmonik titreşimler için yer değiştirme-zaman grafiği.....	18
Şekil 4.4 : Dalgalı karakterde tipik bir sürtünme-hız eğrisi	18
Şekil 4.5 : Basitleştirilmiş fiziksel model	19
Şekil 4.6 : Sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi	20
Şekil 4.7 : Tutma-Bırakma titreşimlerinde yer değiştirme-zaman grafiği.....	22
Şekil 5.1 : Deney tesisatının şematik görünüşü	24
Şekil 5.2 : Deney tesisatının genel görünüşü.....	25
Şekil 5.3 : Cam yünü malzemesinin ses yutum katsayısı-frekans ilişkisi	26
Şekil 5.4 : Sistem sükunette iken akustik odanın ses basınç düzeyi spektrumu.....	27
Şekil 5.5 : $v=0,2$ m/sn hızdaki arka plan SPL spektrumu.....	28
Şekil 5.6 : $v=0,5$ m/sn hızdaki arka plan SPL spektrumu.....	28
Şekil 5.7 : $v=1$ m/sn hızdaki arka plan SPL spektrumu.....	28
Şekil A.1 : Grafit katkılı döküm PA 6'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi	35
Şekil A.2 : Grafit katkılı döküm PA 6'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi	36
Şekil A.3 : Grafit katkılı döküm PA 6'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi	36
Şekil A.4 : Grafit katkılı döküm PA 6'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi	37
Şekil A.5 : Grafit katkılı döküm PA 6'nın sürtünme katsayısının, alınan yol ile değişimi.....	37
Şekil A.6 : Grafit katkılı döküm PA 6'nın başlangıç anındaki ses basınç düzeyinin frekansla değişimi	38
Şekil A.7 : Grafit katkılı döküm PA 6 için 1/3 oktav bandında merkez frekanslardaki ses basınç düzeyinin başlangıç anında hızla değişimi ...	38

Şekil A.8 : Grafit katkılı döküm PA 6'nın 200 m'lik çalışma sonunda ses basınç düzeyinin frekansla değişimi	39
Şekil A.9 : Grafit katkılı döküm PA 6 için 1/3 oktav bandında merkez frekanslardaki ses basınç düzeyinin 200 m'lik çalışma sonunda hızla değişimi.....	39
Şekil A.10 : MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi.....	40
Şekil A.11 : MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi.....	40
Şekil A.12 : MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi.....	41
Şekil A.13 : MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın sürtünme katsayısının, alınan yol ile değişimi.....	41
Şekil A.14 : MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın başlangıç anındaki ses basınç düzeyinin frekansla değişimi	42
Şekil A.15 : MoS ₂ katkılı döküm PA 6 için 1/3 oktav bandında merkez frekanslardaki ses basınç düzeyinin başlangıç anında hızla değişimi ...	42
Şekil A.16 : MoS ₂ katkılı döküm PA 6'nın 200 m'lik çalışma sonunda ses basınç düzeyinin frekansla değişimi	43
Şekil A.17 : MoS ₂ katkılı döküm PA 6 için 1/3 oktav bandında merkez frekanslardaki ses basınç düzeyinin 200 m'lik çalışma sonunda hızla değişimi.....	43
Şekil A.18 : MoS ₂ katkılı PA 66'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi.....	44
Şekil A.19 : MoS ₂ katkılı PA 66'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi.....	44
Şekil A.20 : MoS ₂ Katkılı PA 66'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi.....	45
Şekil A.21 : MoS ₂ katkılı PA 66'nın sürtünme katsayısının, alınan yol ile değişimi	45
Şekil A.22 : MoS ₂ katkılı PA 66'nın başlangıç anındaki ses basınç düzeyinin frekansla değişimi	46
Şekil A.23 : MoS ₂ katkılı PA 66 için 1/3 oktav bandında merkez frekanslardaki ses basınç düzeyinin başlangıç anında hızla değişimi	46
Şekil A.24 : MoS ₂ katkılı PA 66'nın 200 m'lik çalışma sonunda ses basınç düzeyinin frekansla değişimi	47
Şekil A.25 : MoS ₂ katkılı PA 66 için 1/3 oktav bandında merkez frekanslardaki ses basınç düzeyinin 200 m'lik çalışma sonunda hızla değişimi.....	47
Şekil A.26 : PA 6'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi	48
Şekil A.27 : PA 6'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi	48
Şekil A.28 : PA 6'nın ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekans ile değişimi	49
Şekil A.29 : PA 6'nın sürtünme katsayısının, alınan yol ile değişimi.....	49
Şekil A.30 : PA 6'nın başlangıç anındaki ses basınç düzeyinin frekansla değişimi .	50
Şekil A.31 : PA 6 için 1/3 oktav bandında merkez frekanslardaki ses basınç düzeyinin başlangıç anında hızla değişimi	50
Şekil A.32 : PA 6'nın 200 m'lik çalışma sonunda ses basınç düzeyinin frekansla değişimi.....	51
Şekil A.33 : PA 6 için 1/3 oktav bandında merkez frekanslardaki ses basınç düzeyinin 200 m'lik çalışma sonunda hızla değişimi.....	50
Şekil A.34 : $v=0,2$ m/sn'de başlangıç anındaki ses basınç düzeyinin frekansla değişimi.....	52

Şekil A.35 : $v=0,2$ m/sn’de 200 m’lik çalışma sonunda ses basınç düzeyinin frekansla değişimi	52
Şekil A.36 : $v=0,5$ m/sn’de başlangıç anındaki ses basınç düzeyinin frekansla değişimi.....	53
Şekil A.37 : $v=0,5$ m/sn’de 200 m’lik çalışma sonunda ses basınç düzeyinin frekansla değişimi	53
Şekil A.38 : $v=1$ m/sn’de başlangıç anındaki ses basınç düzeyinin frekansla değişimi.....	54
Şekil A.39 : $v=1$ m/sn’de 200 m’lik çalışma sonunda ses basınç düzeyinin frekansla değişimi.....	54

SEMBOL LİSTESİ

A	: Temas alanı
c	: Ses hızı
f	: Frekans
F_N	: Normal kuvvet
F_S	: Sürtünme kuvveti
g	: Yerçekimi ivmesi
G	: Ağırlık
k	: Yaylanma rijitliği
L_p	: Ses basınç düzeyi
q	: Eğim
r	: Viskoz sönüm katsayısı
R_a	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
T_g	: Camsı hale geçiş sıcaklığı
T_m	: Erime sıcaklığı
V	: Hız
θ	: Atak açısı
λ	: Dalga boyu
μ	: Sürtünme katsayısı
τ	: Kayma gerilmesi

ALT İNDİSLER

A	: Adezyon
D	: Deformasyon

POLİMER MALZEMELERDE SÜRTÜNME KAYNAKLI GÜRÜLTÜ

ÖZET

Polimer malzemeler tüm dünyada gerek araştırma ve geliştirme gerekse uygulama alanı bakımından hızlı bir gelişme göstermektedir. Bu hızlı gelişim polimer malzemelerin çeşitli karakteristik özelliklerinin bilinmesi ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Yapılan çalışmada çeşitli polimer malzemelerin kuru sürtünme halinde gürültü karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir.

Teknikte kullanılan polimer malzemelerin çeşitli parametrelere bağlı olarak gürültü karakteristiklerinin belirlenebilmesi için bir pim-ring deney tesisatı kullanılmıştır. Deney tesisatında değiştirilebilen parametreler normal yük ve kayma hızıdır. Ölçülebilen büyüklükler ise sürtünme kuvveti ve tur sayısıdır. Ses ölçümü ise, yarım parmak mikrofön yardımıyla 1/3 oktav bandında 400 Hz ile 20 kHz arasındaki frekans bandında yapılmıştır. Ses ölçümü için ayrıca bir akustik oda tasarlanmıştır. Sistemde tahrik elemanı olarak 0...800 d/dak arasında ayarlanabilen bir AC motor kullanılmıştır. Sistemde normal kuvvet yük koluna asılan ağırlıklar yardımıyla uygulanmaktadır. Sürtünme kuvveti ise sabit diske yerleştirilmiş kuvvet transdüseri yardımıyla ölçülmektedir.

Deneylerde grafit katkılı döküm poliamid 6, MoS₂ katkılı döküm poliamid 6, MoS₂ katkılı poliamid 66 ve saf poliamid 6 kullanılmıştır. Ses basınç düzeyi ölçümleri, 45 N'luk sabit normal yük altında, 0,2 m/sn, 0,5 m/sn ve 1 m/sn olmak üzere üç farklı hızda gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, ses basınç düzeyinin genel olarak yolla değişmediği, 1/3 oktav bandındaki düşük merkez frekans değerleri için artan hızla bir miktar arttığı görülmüştür. Ayrıca sürtünme katsayısının yüksek olduğu durumlarda sürtünme kaynaklı titreşimin gürültüyü önemli ölçüde arttırıcı yönde etki yaptığı görülmüştür.

FRICTION INDUCED NOISE in POLYMERS

SUMMARY

There has been a noteworthy development on the use of polymers in several fields from industrial applications to commercial products. Therefore, knowledge about various characteristics of polymers is needed with this rapid development. In this study, an experimental analysis has been made on the noise characteristics of polymers in dry friction condition.

A pin on ring test apparatus has been utilized to analyze the noise characteristics of polymers used especially in industry under various operating conditions. Adjustable parameters are normal load (surface pressure) and sliding speed. Frictional force and number of revolution are the parameters recorded during the experiments. The frictional noise generated by the polymer-steel contact is monitored by the $\frac{1}{2}$ " microphone. The sound pressure level is analyzed in the range from 400 Hz to 20 kHz frequency in 1/3 octave spectra. Also, an acoustic chamber is designed for noise measurements. The system was driven by an AC motor having 0...800 rpm variable speed range. The normal load was applied by weights hanging on the loading arm. The frictional force was measured with a force transducer placed on the pin holder.

Graphite reinforced cast polyamide 6, MoS₂ reinforced cast polyamide 6, MoS₂ reinforced polyamide 66 and polyamide 6 are used in experiments. Sound pressure level measurements are carried out for three different speeds 0,2 m/s, 0,5 m/s and 1 m/s under 45 N normal load. It is concluded that sound pressure level generally does not vary with the sliding distance whereas it slightly increases with the sliding speed in the low center frequencies of 1/3 octave bands. Moreover, in the cases where the coefficient of friction is relatively high, friction induced vibration has a significant effect on the increase of sound pressure level.

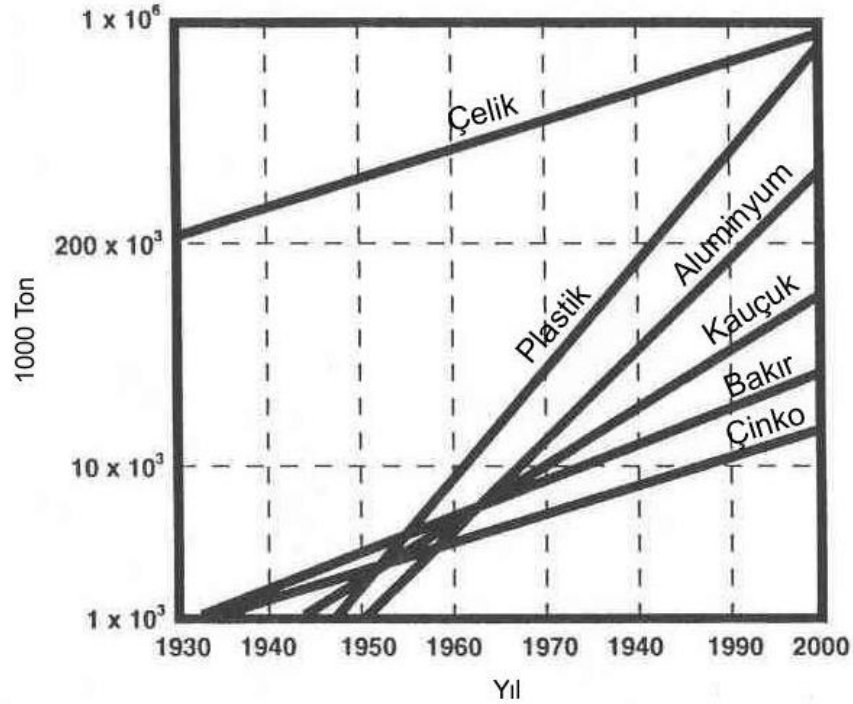
1. GİRİŞ

Bugün yaşadığımız modern dünyayı polimer malzemeler olmadan düşünmek oldukça güç olurdu. Polimer malzemeler çeşitli ev ürünlerinden, karmaşık bilimsel ve tıbbi cihazlara kadar geniş bir yelpazede hayatın her alanında karşımıza çıkmaktadır. Son zamanlarda mühendis ve tasarımcılar diğer alternatif malzemelerde olmayan birçok özelliklerinden dolayı polimerlere doğru bir eğilim göstermektedirler. Polimer malzemelerin en başta gelen avantajları hafiflik, esneklik, korozyona karşı direnç, çeşitli renklerde elde edilebilmesi, saydamlık, işleme kolaylığı vb. gibi olarak sayılabilir. Bu avantajlarının yanında polimerlerin kullanımını termal özellikler, düşük dayanım gibi hususlar sınırlamaktadır.

Geçtiğimiz yüzyılın son yarısından itibaren polimer malzemeler büyük gelişme göstererek 1983 yılında hacim olarak çelik ile aynı oranda kullanılmaya başlanmıştır. Bu yüzyılın başından itibaren ise Şekil 1.1’de görüleceği gibi ağırlık olarak polimer esaslı malzeme tüketimi çelik tüketimini geçmiştir [1]. Polimer malzeme tüketimindeki bu artışın bir kısmı polimer malzemelerin geleneksel malzemelerin yerini almasından kaynaklanırken, bir kısmı ise yeni pazarların oluşmasından ve bu pazarların gelişmesinden dolayı duyulan uygun malzeme ihtiyacından kaynaklanmaktadır.

Günümüzde dişli çark, kaymalı yatak, rulmanlı yatak kafesleri, takım tezgahlarının kızaklar vb. gibi makina elemanlarının yapımında kullanılan polimer malzemeler çok karmaşık şekilli parçaların dahi kolaylıkla ve az enerji harcanarak imal edilebilmesi, maliyetinin düşüklüğü, bakım masraflarının azlığı, montaj ve demontajdaki kolaylık, dayanım/ağırlık oranının iyi olması, korozyon ve kimyasal etkilere dirençlerinin çok yüksek olması, çok düşük sürtünme katsayılarına sahip olmaları gibi özelliklerinden dolayı büyük güçler iletmeyen, zorlanmaların çok büyük olmadığı, yüksek hız ve basınçların söz konusu olmadığı, belirli bir sıcaklık bölgesinde çalışan sistemlerde giderek daha yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Polimerlerin özellikle endüstriyel uygulamalardaki kullanımının artması, gürültü kontrolünün öneminin giderek arttığı

günümüzde, bu malzemelerin gürültü karakteristiklerinin bilinmesinin önemini arttırmaktadır. Yapılan çalışmada, endüstride kullanılan bazı polimerlerin belirli hız ve yük altında, metalle kuru sürtünme halinde oluşturdukları gürültünün özellikleri incelenmiştir.



Şekil 1.1 : Dünya Geneline 2000 Yılına Kadar Olan Ağırlıkça Plastik Tüketimi

1.1 Literatür Özeti

Sürtünmeden kaynaklanan gürültü ve bu gürültünün oluşma mekanizmalarıyla ilgili daha önce çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Sürtünmeden kaynaklanan gürültünün karakteristik özelliklerinin belirlenmesine yönelik ilk araştırma 1979 yılında Yokoi ve Nakai tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada kuru sürtünme halinde sürtünme kaynaklı gürültü deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlara dayanarak, sürtünme kaynaklı gürültü sürtme gürültüsü ve yüksek frekanslı gürültü olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Bunlardan sürtme gürültüsünün düşük seviyeli gürültü olduğu ve kayma yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetinin nispeten düşük olduğu durumda olduğu belirtilmiştir. Yüksek frekanslı gürültü ise sürtme gürültüsüne göre 20-30 dB daha yüksek ses basınç düzeyi (SPL) oluşturduğu ve sürtünme kuvvetlerinin daha büyük olduğu durumda meydana geldiği belirtilmiştir. Sürtünme katsayısının yüksek oranda artmasıyla sürtme gürültüsünün yüksek frekanslı

gürültüye dönüştüğü gözlemlenmiştir [2]. 1986 yılında, Symmons ve McNulty yaptıkları çalışmada PMMA-çelik, dökme demir-çelik ve çelik-çelik malzeme çiftlerinde tutma-bırakma (stick-slip) hareketi sonucu oluşan gürültü ve titreşimi incelemiştir. Sonuçlar PMMA-çelik çiftinde ses sinyali oluşurken, diğer temas durumlarında ses sinyali oluşmadığını göstermiştir. Bunun nedeni olarak, bırakma esnasında; PMMA-çelik temas durumunda, sürtünme kuvvetinde ani bir düşüş yaşanması ve böylece gürültü ve titreşimin oluşması, diğer temas durumlarında ise sürtünme kuvvetinin kademeli olarak düşmesi gösterilmiştir [3].

Sürtünmeden kaynaklanan gürültünün karakteristik özellikleriyle ilgili bir başka çalışma Othman, Elkholy ve Seireg tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, hassas bir ucun (stylus), bir sürtünme yüzeyi boyunca hareketi sonucu oluşan gürültünün ses basınç düzeyi ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki farklı yüklerde çelik, pirinç ve alüminyum malzemeleri için belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonucu her test edilen malzeme için belirli bir bant genişliğinde filtrelenmiş olan ses sinyalinin, genliğin maksimum olduğu belirli bir frekansı içerdiği görülmüştür. Baskın frekans olarak isimlendirilen bu frekansın herhangi bir malzeme için sabit olduğu, yüzey pürüzlülüğü ve yüke göre değişmediği gözlenmiştir. Ayrıca bu frekansın o malzemedeki ses hızıyla doğru orantılı olduğu belirlenmiştir [4]. İbrahim, Madhavan, Qiao ve Chang yaptıkları çalışmada dönel bir disk ile sürtünme elemanın temas yüzeyinde oluşan yüzey kuvvetlerinin, gürültü oluşumuna olan etkilerini deneysel ve analitik olarak incelemiştir. Diskin dönüş yönüne göre, saat yönüne dönüşle saat yönünün tersi istikamete dönüştü, elde edilen sürtünme-hız eğrisinin birbirinden tamamıyla farklı olduğu ve ayrıca elde edilen gürültünün frekans karakteristiklerinin de farklı olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler kayma yüzeyleri arasındaki sürtünme ve normal kuvvetlerdeki rasgele dalgalanmaların iki ana nedeni olduğunu ve bunların parçalardaki yüzey pürüzlülüğü ve eksen kaçıklığı ile bağlı hızdaki dalgalanmalar olduğunu göstermiştir [5]. Soom ve Kim yaptıkları çalışmada düşük hızlarda sürtünme kuvvetinde ve harekette meydana gelen dalgalanmaların nedenlerinden birinin, farklı boyut ve sayıdaki pürüz tepeliklerinin bir kısmının birbirine kaynaması ve daha önce birbirine kaynamış olan başka bir kısmının ise parçalanması olduğunu belirtmiştir [6].

Sürtünmeden kaynaklanan gürültünün nedenlerinden birinin de sürtünmeden kaynaklanan ve kendi kendini ikaz eden titreşimler olarak adlandırılan titreşimler

olduğu belirtilmiştir [7,8]. Bu titreşimlerin genel olarak tutma-bırakma ve sanki harmonik (quasi-harmonic) titreşimler olarak iki ayrı biçimde olduğu belirtilmiştir [9,10]. Ayrıca küçük normal yüklerde rasgele yüzey düzensizliklerinden kaynaklanan titreşimler olabileceği belirtilmiştir [6,10].

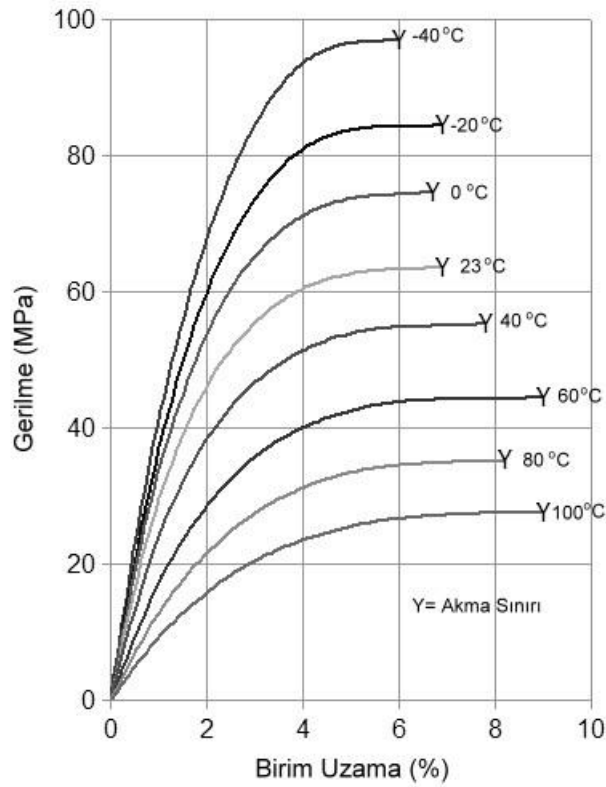
Sürtünmeden kaynaklanan titreşimlerin ve gürültünün sürtünme katsayısıyla kayma yüzeylerinin bağıl hızları arasındaki ilişkiye bağlı olduğu bildirilmiştir [7,11]. Bu konuda yapılan çalışmalardan birinde Ko ve Brockley tutma-bırakma titreşimlerinde sürtünme kuvvetinin, tutma hareketi boyunca zamana, bırakma hareketi boyunca ise hıza bağlı olduğunu göstermiştir. Sanki harmonik titreşimlerde ise hareket sadece hıza bağlı olarak sürtünme kuvveti tarafından belirlenmektedir [12].

Kayma sürtünmesi durumunda sistemi etkileyen parametreler ve bu parametrelerdeki değişikliklerin meydana getirdiği sonuçlar İbrahim'in yaptığı çalışmada ele alınmıştır [13]. Bu parametrelerden normal kuvvetin etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir [14,15]. Bu çalışmalarda iki metal yüzeyin kuru sürtünmesi durumunda, normal yük arttıkça; kararlı-lineer sürtünme bölgesi, lineer olmayan sürtünme bölgesi, geçici sürtünme bölgesi ve kendi kendini ikaz eden titreşimler bölgesi olmak üzere dört farklı sürtünme bölgesi elde edildiği görülmüştür. Ayrıca Aranov, D'Souza, Kalpakjian ve Shareef yaptıkları çalışmada bu dört sürtünme bölgesine karşılık gelen dört farklı titreşim bölgesi olduğunu göstermiştir [10].

Polimer malzemelerin teknikte olan kullanımının artması, beraberinde bu malzemelerin çeşitli karakteristik özelliklerinin bilinmesi ihtiyacını getirmiştir. Takdim edilen bu çalışmada polimer malzemelerin sürtünme kaynaklı gürültü karakteristiği deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan literatür araştırması sonucu, polimer malzemelerin gürültü karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik sınırlı oranda araştırma yapıldığı görülmüştür. Yapılan çalışma ile bu alanda oluşturulabilecek ve çeşitli tasarım ve uygulamalarda kullanılabilecek bir veri tabanına yardımcı olmak amaçlanmıştır. Deneylerde çelik karşı yüzeyle kuru sürtünme halinde grafit katkılı döküm PA 6, MoS₂ katkılı döküm PA 6, MoS₂ katkılı PA 66 ve saf PA 6 malzemelerinin üç farklı kayma hızı için SPL ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca katkının gürültüyü azaltıcı yönde bir etkisinin olup olmadığı da araştırılmaya çalışılmıştır.

2. POLİMERLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Termoplastik malzemeler genel olarak sünektirler ve kırılmadan önce plastik şekil değiştirirler. Mekanik özellikleri yükleme hızına, yükleme süresine ve sıcaklığa önemli ölçüde bağlıdır (Şekil 2.1). Termoplastik malzemeler gerilmeye maruz kaldığında bu gerilme etkisinde hem elastik olarak şekil değiştirirler hem de viskoz olarak akarlar. Yük kalktıktan sonra malzemedeki bağlar ilk haline dönmeye çalışacak ve zamana bağlı bir toparlanma söz konusu olacaktır. Polimer malzemelerin genelinde bu durum söz konusudur.

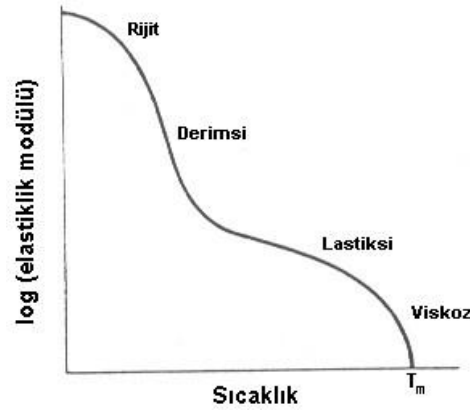


Şekil 2.1 : POM Malzemesinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri

Termosetler ise gevrekler ve plastik şekil değişimi olmadan hasara uğrarlar. Sıcaklık arttıkça mukavemetleri azalır, fakat yumuşamazlar. Sıcaklık çok arttırılırsa giderek kömürleşirler. Bunun nedeni yoğun çapraz bağların şekil değiştirmeyi kısıtlaması ve bu bağların yumuşama sıcaklığının üstünde dahi varlığını korumasıdır.

Elastomerlerin ise molekül zincirleri gelişigüzel bir diziliş gösterirler ve düşük oranda çapraz bağ oluştururlar. Yük uygulandığında çok yüksek oranda elastik şekil değişimi gösterirler. Çapraz bağlar çok yüksek sıcaklıkta parçalanabildiğinden ve sıcaklık düştüğünde tekrar bağ oluşumu mümkün olmadığından elastomerler ne erime gösterirler ne de çözünürler.

Polimerlerin mekanik davranışını sıcaklık ve yükleme hızı etkilemektedir. Yavaş artan yük altında önemli miktarda şekil değiştiren ve düşük gerilmede hasara uğrayan bir polimer, hızlı artan yük altında çok daha az şekil değiştirerek daha yüksek mukavemet göstermektedir. Yüksek sıcaklıkta viskoz davranış gösteren bir polimer düşük sıcaklıkta rijit ve gevrek olabilmektedir. Bu durumda elastiklik modülleri viskoz duruma göre 20-30 kat daha büyük olabilmektedir. Ancak metallere karşılaştırıldığında polimer malzemelerin elastiklik modülü çok düşük kalmaktadır ve sıcaklık değişimlerine karşı çok duyarlıdır. Sıcaklığın elastiklik modülü üzerindeki etkisi Şekil 2.2’de görülmektedir. Camsı hale geçiş sıcaklığı altında (T_g) polimer malzeme cam gibi davranır (rijit ve gevrek). T_g sıcaklığının üstünde malzeme ne cam kadar sağlam ve rijit ne de kırılgandır. Viskoz bölgeye kadar olan sıcaklık artışlarında herhangi bir yük uygulandığında elastik ve plastik şekil değişimi görünürken, viskoz bölgeye geçildiğinde malzeme yük altında viskoz olarak şekil değiştirmektedir.



Şekil 2.2 : Amorf Termoplastiklerde Sıcaklığın Elastiklik Modülüne Etkisi

2.1 Poliamidler ve Uygulama Alanları

Burada sadece çalışmada kullanılan poliamid türlerinin genel olarak özellikleri ve kullanım yerleri üzerinde durulacaktır.

2.1.1 Poliamid 6

Sentetik bir termoplastik olan PA 6, naylon türleri arasında mekanik ve fiziksel özellikleri en iyi olanıdır. Nem aktivitesi düşüktür ve döküm yöntemi ile imal edilebilir. Molekül ağırlığı ve yapısından dolayı darbe dayanımı yüksek olup, aşınma ve darbe dayanımının çok yüksek, nem aktivitesinin ise düşük olması gereken uygulamalarda tercih edilmektedir.

PA 6'nın sürtünme katsayısı ve aşınma miktarını etkileyen ana faktörler, malzeme çiftinin yüzey pürüzlülüğü ve sertliği, uygulanan basınç, temas yolunun uzunluğu, sürtünen yüzeylerin sıcaklığı ve yağlama durumudur. PA 6 zayıf asidik ve bazik kimyasallara ve organik çözücülere dayanıklıdır. Düşük ve normal kayma hızlarında, toz, kum vb. gibi aşındırıcı ortamlarda bu polimerin çalışma ömrü, dökme demir, bronz ve çelikten 2-10 kat arası daha fazladır.

PA 6, mekanik özelliklerinin iyi olmasından dolayı makina konstrüksiyonu, inşaat makinaları, paketlenme ve doldurma üniteleri, tekstil makinaları, otomotiv sanayi, gıda sanayi, tıbbi cihazlar, gemi imalatı vb. gibi birçok sanayi dalında kullanılmaktadır. Bu sanayi kollarında ip gericiler, ip olukları, kılavuz ve burçlu kaymalı yataklar, yatak segmanları, koni ve alın dişli çarklar, sonsuz vida, aşınma plakaları, vana yatakları, seramik ve beton kalıpları, bobin, elektrik prizleri vb. parçaların yapımında kullanılmaktadır.

2.1.2 Poliamid 66

PA 66 ticari olarak bulunabilen tüm poliamidler içerisinde en dayanıklı ve erime sıcaklığı en yüksek olanıdır. 264 °C'de eriyen PA 66'nın sürekli kullanım sıcaklığı 120 °C'dir. PA 66'ya PTFE, MoS₂ ve grafit katılarak özellikleri daha da iyileştirilebilir. Su alma özeliğinden dolayı imalatı sırasında dikkatli olunması gerekir. Ancak bitmiş parçaların su alması sağlanırsa basma dayanımında artış görülür. PA 66 çok yüksek eğilme ve çekme dayanımına, yüksek darbe dayanımına, düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Yük altında çalışmaya uygun olan PA 66, alkalilere ve birçok organik çözücüye karşı dayanıklıdır. Ancak yüksek sıcaklıklarda kuvvetli asitlere karşı dayanımı çok düşüktür. PA 66, su buharı haricinde birçok gaza karşı çok düşük geçirgenliğe sahiptir.

MoS₂ veya PTFE katkılı PA 66 ve cam elyaf takviyeli PA 66 geniş ölçüde dişli çarklar, makaralar ve avara kasnaklarda, düşük sürtünme direnci, eğilme yorulmasına karşı dayanım ve boyut kararlılığı gerektiren yatak burçlarında; saf PA 66, düşük sürtünme istenen, korozyon istenmeyen somunlar, civatalar, pimler ve demiryolu izolator yastıklarında kullanılmaktadır. Ayrıca takviyeli PA 66, zincir ve konveyör bandı bağlantılarında, fan kanatlarında, pompa çarklarında, sulama fiskeylerinde, pompa gövdelerinde, boru bağlantılarında, pencere doğraması izolasyonunda, akışkan hız ölçer ve manometre gövdelerinde, otomotiv sektöründe emme manifoldu, yakıt yolları, gaz teli kılavuzlanması ve vites değiştirme sistemlerindeki kılavuzlamalarda kullanılmaktadır.

2.1.3 Döküm poliamid 6

Döküm PA 6 yüksek elastiklik modülü, iyi aşınma dayanımı, iyi kimyasal dayanım, yüksek erime sıcaklığı, hafiflik, ses ve titreşim sönümlemesi gibi özelliklerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu özelliklerinin yanında, döküm metoduyla imal edilen döküm PA 6 parçaların mukavemetleri, enjeksiyon ve ekstrüzyon ile imal edilen poliamid parçalara göre çok daha iyidir.

Döküm PA 6 ulaşımda ve endüstri uygulamalarında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Teknelerin itki pervanelerinin kanatlarında, tekne dümenlerinde, boru bağlantılarında ve mobil vinçlerde kullanılmaktadır. Vinçlerde kullanılan döküm PA 6 kasnaklar, ölü ağırlığı azaltmakta, vincin kararlılığını arttırmakta ve daha büyük yüklerin kaldırılmasına olanak sağlamaktadır.

3. SÜRTÜNME

Sürtünme, birbirine temas eden iki yüzeyin birbirine göre kayma veya yuvarlanma hareketi yapmasına karşı gösterilen direnç olarak tanımlanabilir. Sürtünme bağıl hareketin büyüklüğüne bağlı olmaksızın, bazen çok küçük değerler almasına karşın, pratikte daima mevcuttur. Her zaman bağıl harekete karşı direnç göstermekte olan sürtünme iki rol üstlenmektedir. Bunlardan ilki enerjinin bir yüzeyden diğerine aktarılması iken ikincisi ise bağıl harekete karşı direnç oluşturarak enerji kaybı oluşturmaktadır. Bu iki işlev, enerji iletimi ve kaybı, çoğunlukla bir arada meydana gelmektedir.

Sürtünme kanunları bilimsel olarak Amontons (1699) ve Coulomb (1785) tarafından ortaya konmuştur. Temel olarak bu kanunlar; sürtünme kuvvetinin normal kuvvetle orantılı olduğunu, sürtünme kuvvetinin kayma yüzeyleri arasındaki temas alanından bağımsız olduğunu ve statik sürtünme katsayısının, kinetik sürtünme katsayısından büyük olduğunu belirtmektedir. Ancak, günümüzde sürtünmenin bu kadar kolay açıklanabilecek bir durum olmadığı bilinmektedir. Mesela, plastiklerin şekil değiştirmesi sonucu genelde plastiklerde sürtünme kuvveti artan yüklerle birlikte azalmaktadır. Ayrıca sürtünme kuvveti kayma yüzeyleri, bağıl hız, zaman ve sıcaklık gibi diğer faktörlere bağlıdır [5]. Dolayısıyla Coulomb kanunları her zaman geçerli olmamaktadır.

3.1 Polimer Malzemelerde Sürtünme

Herhangi bir katı cismin yüzeyi elektron mikroskopuyla incelendiğinde, gerçek temas alanı Şekil 3.1’de görüleceği gibi görünürdeki temas alanından çok daha küçüktür. F_N normal kuvveti uygulandığında, kayma yüzeyinde birbirine değen pürüz tepecikleri plastik olarak şekil değiştirecek ve birbirine kaynayacaktır. A ve B parçalarının birbirine göre kayma hareketi yapması ise ancak ve ancak kaynayan pürüz tepeciklerinin parçalanmasıyla mümkün olacaktır. Dolayısıyla sürtünme

direnci F_S , birbirine kaynayan pürüz tepeciklerini birbirinden ayırmak için gerekli kuvvetle (F_A), bir kısım pürüz tepeciklerini birbiri üzerinde deforme etmek için gerekli kuvvetin (F_D) toplamıdır.

$$F_S = F_A + F_D \quad (3.1)$$

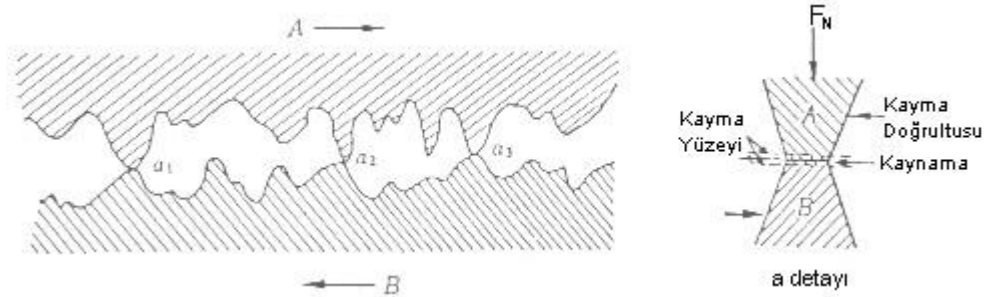
Gerçekte, sürtünmenin deformasyon bileşeni diğer bileşen yanında çok küçük kaldığından ihmal edilebilir. Dolayısıyla sürtünme kuvveti;

$$F_S = A_{\text{gerçek}} \cdot \tau \quad (3.2)$$

bağıntısından dolayı gerçek değme alanına bağlıdır. Burada τ , dayanımı düşük olan malzemenin dayanabileceği maksimum kayma gerilmesidir. Gerçek değme alanı denklem 3.3 ile verilebilir.

$$A_{\text{gerçek}} = K \cdot F_N^m \quad (3.3)$$

Burada K ve m birer sabittir ve malzemeye göre değişmektedir.



Şekil 3.1 : Temas Yüzeyinin Yapısı

Değme alanının teorik olarak bulunmasında Hertz teorisi veya Meyer teorisi kullanılabilir. Burada elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar birbirleriyle uyumlu olduğundan Bowden ve Tabor'un ortaya koyduğu kaynama-kesme teorisinin bazı kabullerle birlikte plastiklerde de kayma sürtünmesinin açıklanmasında temel olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [16].

Elastomerler ve camsı hale geçiş sıcaklığı üzerinde bulunan polimer malzemeler viskoz olarak şekil değiştirerek rijit karşı yüzeyin kaba pürüz tepeciklerini çevresel olarak kapladığından, bu durumda sürtünmenin deformasyon bileşeni önemli bir rol

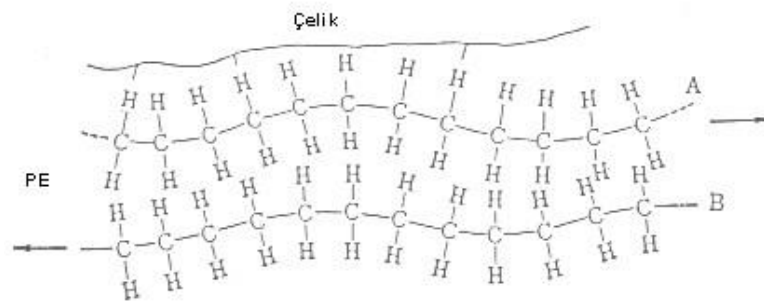
oynar ve sürtünmenin histerezis bileşeni olarak adlandırılır. Fakat yapılan çalışmada bu durumla karşılaşmadığından bu konuya değinilmeyecektir.

3.2 Polimer Malzemelerde Sürtünmeye Etki Eden Parametreler

Polimer malzemelerin sürtünme özelliklerini polimer malzemenin iç yapı özellikleri (kristal yapı, moleküler ağırlık vb.), normal kuvvet, izafi kayma hızı, sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü, temas zamanı, malzeme çifti, nem vb. gibi çeşitli parametreler etkilemektedir. Bu bölümde bu parametrelerden bazılarının üzerinde durulacaktır.

3.2.1 İç yapı

Kaynama-kesme teorisi sürtünme kuvvetinin, birbirleriyle kaynamış pürüz tepciklerini parçalamak için gerekli kuvvete eşit olduğunu belirtmekteydi. Şekil 3.2 iki katı yüzey (PE ve çelik) arasındaki sürtünme ve temas durumunu göstermektedir. Bu durumda, bağıl kayma hareketi A ve B molekülleri arasında meydana gelmektedir. Çünkü PE malzemesinin A molekülü ile çelik arasında meydana gelen bağların dayanımı, PE moleküllerinin birbirleri arasındaki bağların dayanımından daha büyüktür. Dolayısıyla sürtünme direnci A ve B molekülleri arasındaki Van der Waals bağlarını koparmak için gerekli kuvvete eşittir. Buna ek olarak, simetrik olmayan atom dağılımının söz konusu olduğu polimer malzemelerde bu durumda göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

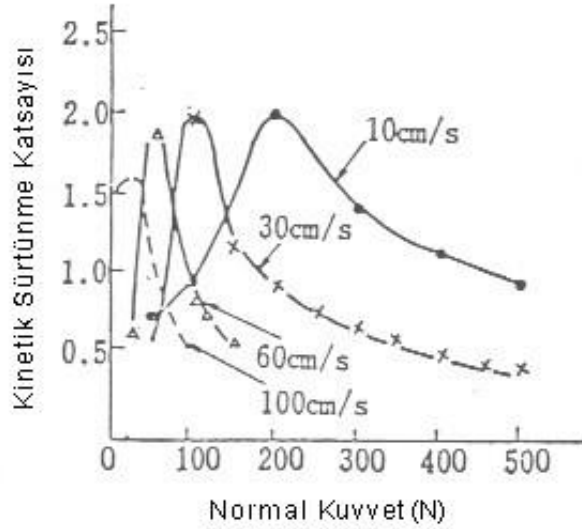


Şekil 3.2 : Molekül Zincirleri Arasında Kayma Hali

3.2.2 Normal kuvvet

Kuru ve sınır sürtünme durumunda normal kuvvetle sürtünme katsayısı arasındaki ilişki Hertz kanunu ve Meyer kanununa göre verilmektedir. Buna göre, sürtünme

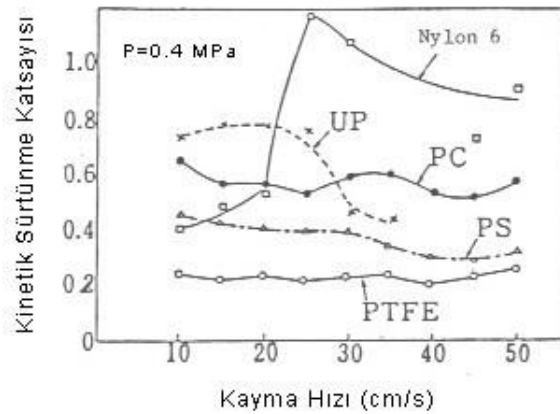
katsayısı $F_N^0 \sim F_N^{-1/3}$ ile orantılı olarak değişmektedir. Dolayısıyla, sürtünme katsayısı artan normal yükü biraz düşüş göstermektedir. Fakat bu durum, Şekil 3.3’de görülebileceği gibi kritik bir normal kuvvetin üzerinde gerçekleşmektedir. Artan kayma hızıyla birlikte kritik normal kuvvet düşmektedir.



Şekil 3.3 : PA-Çelik Teması için Farklı Kayma Hızlarında Normal Kuvvet-Kinetik Sürtünme Katsayısı İlişkisi [16]

3.2.3 İzafi kayma hızı

Polimer malzemeler için sürtünme katsayısının kayma hızıyla değişimi hakkında kesin bir şey söylenememektedir (Şekil 3.4). Bunun nedeni ise artan kayma hızıyla birlikte sürtünme sonucu meydana gelen ısınmanın artması ve dolayısıyla hızın yanında sıcaklığın da sürtünmeye etki etmesidir. Özellikle süreksizliklerin olduğu camsı hale geçiş sıcaklığı civarında bu etki daha belirgin olarak görülmektedir [16].



Şekil 3.4 : Çeşitli Polimer Malzemeler için Kayma Hızının Sürtünme Üzerindeki Etkisi

3.2.4 Sıcaklık

Temas eden iki katı cismin birbirine göre hareket etmesi sonucu sürtünme ısısı meydana gelmektedir. Polimer malzemelerin erime ya da bozulma sıcaklığı düşük olduğundan, dayanabilecekleri sıcaklık değerleri metallere göre çok daha düşüktür. Bu sebeple bir polimerin izafi hareketi sıcaklık yükselmesi durumunda sürekli olarak devam edemez. Polimerin izafi kayma hareketini devam ettirebilmesi için “sınır pv değeri” ya da “pv limiti” olarak tanımlanan bir pv değeri vardır. Bu pv değerinin üzerinde polimerlerin sürekli olarak kayma hareketine devam etmesi mümkün değildir.

Genel olarak sıcaklığın artmasıyla elastiklik modülü düşmekte ve gerçek temas alanı artmaktadır. Bunun sonucu olarak da sürtünme direnci artmaktadır. Buna karşılık, artan sıcaklık ile polimerin kayma mukavemetinin düşmesi sonucu sürtünme direnci düşebilir [16]. Dolayısıyla, polimer malzemelerin sürtünme katsayılarının sıcaklıkla olan ilişkisi incelenirken, artan sıcaklık ile kayma mukavemetinde meydana gelen düşüşle, elastiklik modülünün azalmasıyla gerçek temas alanında meydana gelen artışın etkisi birlikte değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, elastiklik modülünün ve kayma mukavemetinin sıcaklıkla değişimi doğrusal değildir ve erime sıcaklığı ile camsı hale geçiş sıcaklığı bölgelerinde karmaşık ve süreksiz bir ilişki göstermektedir. Dolayısıyla, polimer malzemeler için sıcaklıkla sürtünme katsayısı arasında basit bir ilişki kurmak mümkün değildir.

4. SÜRTÜNME DEN KAYNAKLANAN GÜRÜLTÜ

İki yüzeyin birbirine nazaran yük altında kayma hareketi sonucu ses ve titreşim oluşumu eski çağlardan bu yana bilinmekte olan bir olgudur. Çoğu durumda bu ses istenmediğinden ses terimi yerine gürültü terimi kullanılmaktadır. Sürtünmeden kaynaklanan gürültünün problem olarak ortaya çıktığı tarihte bilinen ilk örnek bundan 3500 sene önce Sümer’lerde yük arabalarında karşılaşılan fren gürültüsüdür. Tekerlek muylusu etrafına dolanılan bronz zincir yardımıyla yokuşlarda sağlanan hız kontrolü etkin bir yöntem olmasına karşılık kayıtlarda bahsedilecek kadar da gürültülü bir yöntemdi. Bunun dışında, sürtünme kaynaklı gürültü çeşitli müzik enstrümanlarının geliştirilmesine de olanak sağlamıştır. Telli çalgılarda, tellerin başka bir yüzeyle sürtünmesi telleri kendi doğal frekanslarında titreştirmekte ve belirli tonlarda ses oluşumuna neden olmaktadır [7].

Sürtünmeden kaynaklanan gürültüye günlük yaşantımızdan örnekler verilebilir. Basket veya tenis maçlarında genelde parke yüzeylerde spor ayakkabılarının çıkardığı sesler, karda yürürken çıkan ses, yağlanmamış kapı menteşelerinden gelen ses, tebeşirle tahtaya yazarken çıkan ses, otomobillerin iç kabinlerindeki 1 kHz ile 10 kHz arasında değişen gürültüler, uçak veya otomobil frenlerinden kaynaklanan gürültüler, kayış-kasnak mekanizmalarında ortaya çıkan gürültü, tren tekerleklerinin raylar üzerinde giderken çıkardığı gürültü ve daha birçok genelde rahatsız edici ses sürtünmeden kaynaklanmaktadır [17]. Sürtünmeden kaynaklanan gürültünün avantaj olarak kullanıldığı durumlara ise örnek olarak telli çalgılar ve kestirimci bakım cihazları verilebilir. Bu cihazlar kullanılarak malzemede yorulma sonucu oluşan çatlaklar, çatlak yüzeylerinin birbirine sürtmesi sonucu çıkardıkları ses sayesinde, daha çatlak oluşumunun ilk aşamalarında anında tespit edilebilmektedir.

Sürtünme kaynaklı gürültü çoğu zaman kısa süreli ve kararsızdır. Spor ayakkabılarının viskoelastik malzemeden yapılmış tabanlarının parke yüzey üzerinde kayması sonucu oluşan gürültü veya şişirilmiş bir balonun üzerinde parmaklarımızı gezdirmemiz sonucu oluşan gürültü kısa süreli gürültüye örnektir. Belirli bir

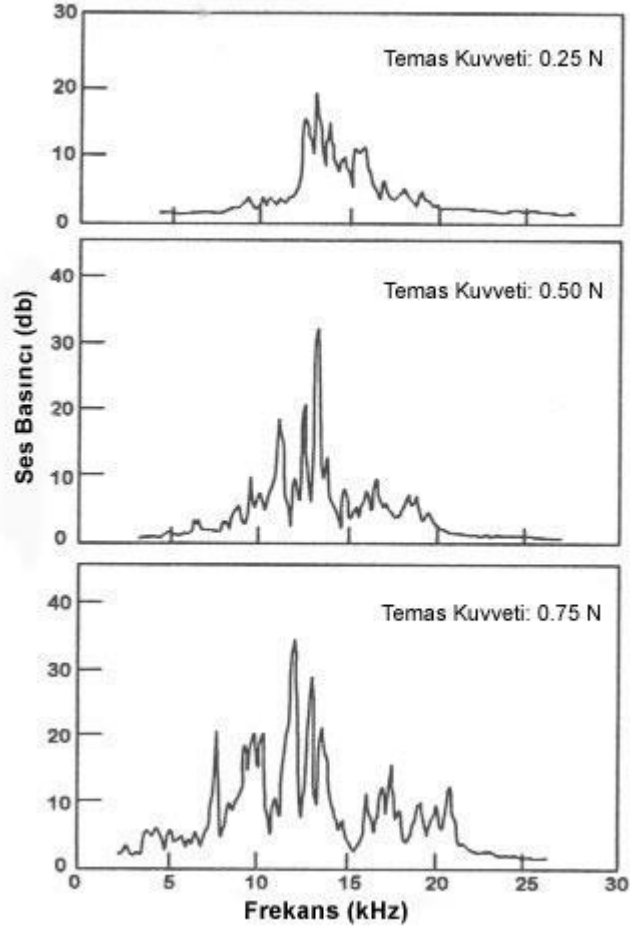
malzeme çifti için bile, ortaya çıkan gürültünün farklı olabilmesinin nedeni ise büyük çoğunlukla kaymanın gerçekleştiği sürtünme yüzeyinde temas kuvvetlerinin değişmesidir. Başka bir deyişle, temas kuvvetleri, sürtünme yüzeyi özelliklerine ve teması sağlayan dış kuvvetlere bağlıdır [17].

Sürtünme kaynaklı gürültü birçok sistemde, temas eden parçaların mükemmel bir geometriye sahip olmamasından (yüzeylerin vadi ve tepeciklerle dolu olmasından), malzemenin üniform özelliklere sahip olmamasından, temas yüzeyinin sürtünme özelliklerinin zamanla değişmesinden, temas alanının ve kuvvetinin değişmesinden, form toleranslarından veya parçaların hatalı işlenmesinden, montajdan kaynaklanan eksen kaçıklıklarından ve bunun gibi nedenlerden dolayı meydana gelmektedir [5,17]. Sistemde, bahsedilen faktörler ayrı ayrı etkileyebileceği gibi, bu faktörler bir arada da bulunabilir. Fakat asıl olarak sürtünme kaynaklı gürültünün oluşma mekanizmasıyla ilgili iki durumdan söz edilebilir. Bunlardan ilki pürüz tepeciklerinin birbirleriyle etkileşimi sonucu oluşan yüzey dalgalarının ortaya çıkardığı sürtme gürültüsü, ikincisi ise sürtünmeden kaynaklanan kendi kendini ikaz eden titreşimlerin oluşturduğu gürültüdür.

4.1 Sürtme Gürültüsü

Makinalarda ve hareketli yüzeylerde ortaya çıkan gürültünün ana sebeplerinden biri sürtünmedir. Makinaların veya cihazların hareketli parçalarının birbirine göre hareket etmesi sonucu oluşan bu tarz gürültüler iki grupta toplanabilir. Bunlardan ilki olan sürtme gürültüsü kayma yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetlerinin nispeten düşük olduğu durumda ortaya çıkar. Yüksek frekanslı gürültü ise bu kuvvetlerin büyük olduğu durumda ortaya çıkar ve bu gürültünün SPL'si 20-30 dB daha fazladır. Parça yüzeylerindeki aşınma ya da sürtünme katsayısı büyük oranda arttığında sürtme gürültüsü yüksek frekanslı gürültüye dönüşür [2]. Sürtme gürültüsünün özelliklerine bakıldığında, sürtme gürültüsünde filtrelenmiş ses sinyali her malzeme için belirli bir frekansta maksimum değere ulaşmaktadır. Baskın frekans olarak adlandırılan bu frekans, yüzey pürüzlülüğünden ve temas kuvvetinden bağımsızdır ve o malzemedeki ses hızıyla doğru orantılıdır. Yüzey pürüzlülüğü ve temas kuvvetindeki değişimler ise sadece SPL'nin maksimum değerini değiştirmektedir. Ayrıca SPL'nin büyüklüğü temas kuvvetindeki değişime karşı hassastır ve temas

kuvveti arttıkça SPL değerleri de artış göstermektedir. Fakat elde edilen spektrumun genel eğilimi Şekil 4.1’de görüldüğü gibi hemen hemen aynı kalmaktadır. Bunlara ek olarak, SPL yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılı olarak artmaktadır [4,7].



Şekil 4.1 : Tungsten Karbür-Çelik Teması için Elde Edilen SPL Spektrumu ($R_a=8 \mu m$) [4]

4.2 Sürtünme Kaynaklı Titreşimlerin Oluşturduğu Gürültü

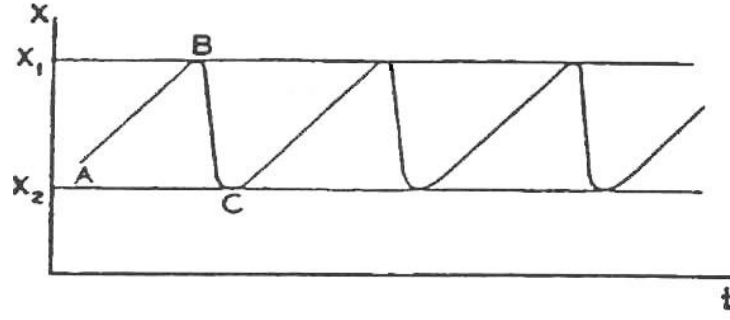
Sürtünme sonucu oluşan titreşimlerin meydana getirdiği gürültüye birçok durumda rastlanmaktadır. Burada oluşan titreşimler genelde kendi kendini ikaz eden titreşimler olarak bilinmektedir. Bu titreşimlerin bu şekilde tanımlanmasının sebebi, sistemdeki titreşimlerin kendisinin sürtünme direncine neden olması ve bu şekilde hareketin devamı için gerekli olan enerjiyi sağlamasıdır. Titreşimin frekansı, dolayısıyla sistemin doğal frekansı ile aynı ya da sistemin doğal frekansına yakın olmaktadır. Kendi kendini ikaz eden titreşimlere örnek olarak, parça işlenmesi sırasında meydana gelen titreşimler, fren titreşimleri, çeşitli mafsallarda meydana

gelen titreşimler verilebilir. Bu titreşimler sadece ses oluşumuna değil, aşınmanın artmasına, yüzey hasarlarına ve yorulmaya neden olarak sistemin işlevini ve performansını etkilemektedir [13].

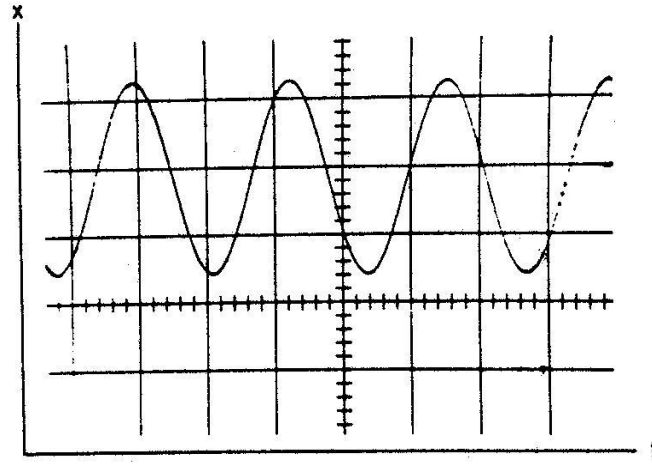
Kendi kendini ikaz eden titreşimler sonucu ortaya çıkan gürültüye kayma yüzeyleri arasındaki kuru sürtünmenin neden olduğu bilinmesine karşın, bu tip gürültüye nasıl bir mekanizmanın neden olduğu hala tam olarak anlaşılamamıştır. Literatürde tutma-bırakma, kitleme-bırakma ve negatif hız-sürtünme ilişkisi gibi olası mekanizmalardan bahsedilmiştir [5].

4.2.1 Tutma-bırakma

Tutma-bırakma titreşimleri Şekil 4.2’de görüldüğü gibi testere ağzı tipinde yer değiştirme-zaman grafiğine sahip, periyodik hareket ve dinlenme çevrimleri içeren, genelde birbiri üzerinde yavaşça hareket eden kuru ya da sınır sürtünme durumundaki yüzeylerde meydana gelmektedir. Tutma-bırakma hareketinin tutma kısmında kayma yüzeylerinin birbirlerine göre hızları sıfırdır ve bu esnada enerji depolanır. Bırakma esnasında ise bu enerji bir anda boşalır ve gürültü oluşumuna neden olur. Tutma-bırakma olayının temas yüzeylerinin sürtünme karakteristiklerine ve özellikle sistemin toparlanma parametrelerine bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. 1950’li yıllardan bu yana üzerinde çalışılan bu konu, genelde düşük hız bölgelerinde tutma boyunca statik sürtünme katsayısının bırakma boyunca kinetik sürtünme katsayısından daha büyük olmasına ve toparlanma esnasında statik sürtünmenin kararlı durumdaki değerine ulaşmasının belirli bir süre almasına bağlanmıştır. Kayma hızı artarak belirli bir kritik değeri aşınca tutma-bırakma titreşimleri azalmakta ve sonunda kaybolmaktadır. Hızın daha fazla artması bazı durumlarda kararlı kaymaya neden olurken, bazı durumlarda da sanki harmonik titreşimlere neden olmaktadır [18]. Bu tür titreşimlerin yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 4.3’deki gibi sinüs eğrisine benzer yapıdadır. Burada hareket sadece kinetik sürtünme kuvvetine bağlı olarak başlar ve devam eder. Bu tür titreşimlerin oluşabilmesi için gerekli şartlardan biri sürtünme-hız eğrisinin Şekil 4.4’de verilen yapıda olmasıdır. Bu tip sürtünme-hız eğrilerine kuru ve yağlı sürtünme durumundaki metal ve metal olmayan kayma yüzeylerinde rastlanmaktadır. Hız arttıkça sanki harmonik titreşimin genliği artmakta ve belirli bir kritik hız değerinden sonra titreşimler yok olmaktadır [9].



Şekil 4.2 : Tutma-Bırakma Titreşimlerinde Testere Ağzına Benzer Yer Değiştirme-Zaman Grafiği [19]



Şekil 4.3 : Sanki Harmonik Titreşimler için Yer Değiştirme-Zaman Grafiği [12]

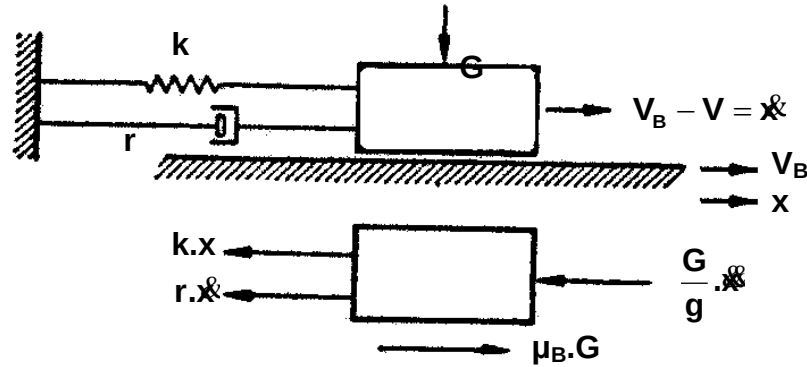


Şekil 4.4 : Dalgalı Karakterde Tipik Bir Sürtünme-Hız Eğrisi [13]

Birçok yayında tutma-bırakma titreşimlerinin ana nedeninin statik ve kinetik sürtünme katsayıları arasındaki fark olduğunun belirtilmesine karşın özellikle polimer malzemeler için sürtünme kaynaklı titreşimlerin nedeninin bu olmadığına

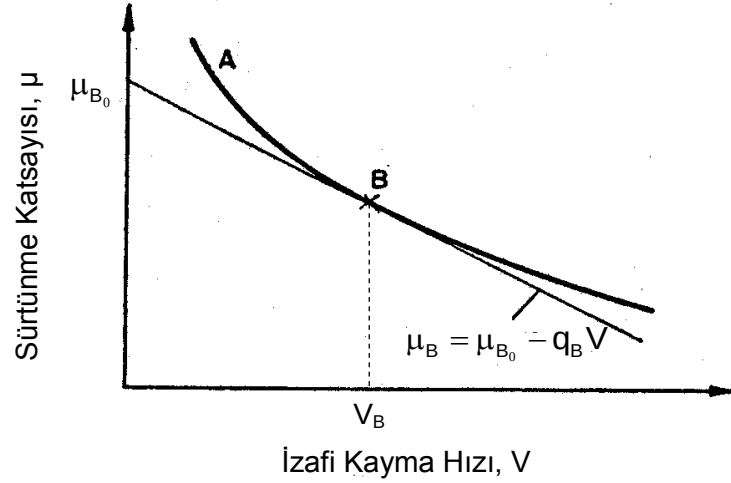
dair güçlü bulgular elde edilmiştir. 90'lı yıllardan bu yana yapılan araştırmalarda polimer malzemeler için statik ve kinetik sürtünme katsayıları arasında fark olmasına ve statik sürtünmenin önemli ölçüde statik temas zamanına¹ bağlı olmasına rağmen bu tür titreşimlerin nedeni olarak sürtünme-hız eğrilerindeki negatif eğim gösterilmiştir. Elastomer malzemelerde düşük kayma hızlarında sürtünme kaynaklı titreşim oluşmazken, yüksek kayma hızlarında bu titreşimlerin oluşması; termoplastiklerde de düşük hızlarda tutma-bırakma oluşurken, sürtünme-hız eğrisinin pozitif eğimli olduğu yüksek hızlarda bu titreşimlerin yok olması bu görüşü desteklemektedir [8]. Dolayısıyla, sürtünmenin hıza bağlı oluşu birçok durumda sürtünmeden kaynaklanan kararsızlıkların tek ve ana nedeni değildir [11, 18]. Görüldüğü üzere, tutma-bırakma hareketinin oluşumunu tahmin etmek oldukça güçtür. Bunun nedeni ise sürtünmenin kendisinin belirsiz bir parametre olması ve kayma sistemindeki diğer parametrelerle etkileşim içinde olmasıdır [13].

Tutma-bırakma titreşimlerinin nedenlerini belirtmek amacıyla Şekil 4.5'deki gibi basit bir fiziksel model ele alınmıştır. Burada, bir serbestlik dereceli titreşim sisteminde titreşen kitlenin ağırlığı G ve sınır sürtünme halinin geçerli olduğu tribolojik ortam, bir yay ve viskoz elemandan oluşan Maxwell modelidir. Tutma-bırakma titreşimlerinin herhangi bir V_B kayma hızı civarında ortaya çıkabileceği varsayılarak (Şekil 4.6), B noktası civarındaki sürtünme katsayısının V hızı ile değişimi, çok küçük titreşim genlikleri için, denklem 4.1 ile elde edilir.



Şekil 4.5 : Basitleştirilmiş Fiziksel Model

¹ Statik temas zamanı: Temas eden yüzeylerin, birbirlerine göre hareket etmediği durumda statik sürtünme katsayısının kararlı bir değere ulaşması için gerekli süre.



Şekil 4.6 : Sürtünme Katsayısının Kayma Hızı ile Değişimi

$$\mu_B = \mu_{B_0} - q_B V \quad (4.1)$$

Burada, q_B , Şekil 4.6'daki eğrinin B noktasındaki eğimi, μ_{B_0} bir sabit, V ise izafi kayma hızıdır. Şekil 4.5'de gösterilen basitleştirilmiş fiziksel model için hareket denklemi;

$$\frac{G}{g} \ddot{x} + r \dot{x} + k \cdot x = \mu_B \cdot G \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir. Eğer bu denkleme sürtünme katsayısı fonksiyonu konulup denklem düzenlenirse denklem 4.3 elde edilir.

$$\ddot{x} + g \left(\frac{r}{G} - q_B \right) \dot{x} + g \cdot \frac{k}{G} \cdot x = g(\mu_{B_0} - q_B V_B) \quad (4.3)$$

Denklem 4.3 daha basitleştirilmiş olarak;

$$\ddot{x} + K_1 \cdot \dot{x} + K_2 \cdot x = K_3 \quad (4.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada K_1 , K_2 ve K_3 , B noktasına göre yazılmış olan denklem sabitleridir. Buradan, viskoz sönüm katsayısı negatifse veya $q_B > \frac{r}{G}$ ise, titreşim genliklerinin büyüme ile üstel olarak arttığı görülmektedir. Diğer bir deyişle, incelenen sürtünme katsayısının azalış oranı ne kadar fazla ise sistemde tutma-

bırakma titreşimlerinin ortaya çıkma eğilimi ve titreşimlerin şiddeti o kadar fazla olacaktır. Tutma-bırakma titreşimlerini önlemek veya şiddetini azaltmak için sistemin yaylanma rijitliğini arttırmak veya daha uygun olarak sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişim eğilimini azaltmak gerekmektedir.

Kuru sürtünme bölgesinde de, eğer tribolojik ortamın yaylanma rijitliği küçükse, örneğin elastomer yüzeyin katı karşı yüzeyle olan sürtünmesi halinde, kuvvetli tutma-bırakma titreşimleri kendini gösterir. Şekil 4.5'deki modelde viskoz sürtünme ihmal edilirse bu hal için hareket denklemi;

$$\frac{G}{g} + k \cdot x = \mu_k \cdot G \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemin çözümü;

$$x = \frac{G}{k} [(\mu_s - \mu_k) \cos \omega t + \mu_k] + \frac{\sin \omega t}{\omega} \quad (4.6)$$

şeklindedir. $t=0$ anında (Şekil 4.7'deki B noktası);

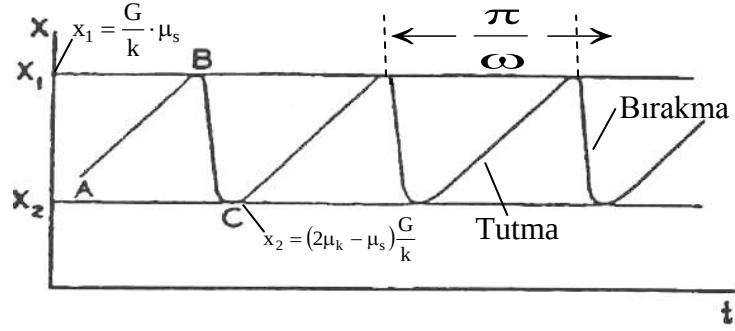
$$x = \frac{G}{k} \cdot \mu_s \quad (4.7)$$

olmaktadır. Eğer V_B 'nin ortalama izafi hıza oranla küçük olduğu kabul edilirse, çözüm denklem 4.8'deki gibi basitleştirilebilir.

$$x = \frac{G}{k} [(\mu_s - \mu_k) \cos \omega t + \mu_k] \quad (4.8)$$

Burada, μ_s statik, μ_k ise kinetik sürtünme katsayısını göstermektedir. İzafi kayma sıfır olduğunda ($\omega=0$) tutma hali dolayısıyla statik sürtünme katsayısı olacak ve bu durum $\omega t = \pi a$ halinde tekrarlanacaktır. $a=1, 2, 3, \dots$ değerleri için t değerleri denklem 4.8'e konulursa denklem 4.9 elde edilir.

$$x = (2\mu_k - \mu_s) \frac{G}{k} \quad (4.9)$$



Şekil 4.7 : Tutma-Bırakma Titreşimlerinde Yer Değiştirme-Zaman Grafiği

Şekil 4.7 incelendiğinde, ilk hareketin A noktasında başladığı düşünülürse, bu esnada sisteme statik sürtünme katsayısı etkimektedir. Sürtünme yüzeyinin elastik olarak deformasyonu zamanla doğrusal olarak arttığı varsayılırsa (k sabit), yüzeydeki elastik kayma (ayrılma olmadan) x_1 olacaktır. B noktasına erişildiğinde tam kayma başlayacak ve bu şekilde C noktasına kadar devam edecektir. Kayma miktarı;

$$\overline{BC} = \mu_s \frac{G}{k} - (2\mu_k - \mu_s) \frac{G}{k} = (2\mu_s - 2\mu_k) \frac{G}{k} \quad (4.10)$$

olacaktır. Buradan, tutma-bırakma genliğinin, $(\mu_s - \mu_k)$ ne kadar küçükse o kadar küçük olacağı görülmektedir. Doğal olarak bu farkın sıfır olması halinde tutma-bırakma titreşiminin ortadan kalkacağı görülmektedir. Ayrıca, yaylanma rijitliği k , ne kadar büyükse genlik o oranda azalmaktadır.

4.2.2 Kitleme-bırakma (sprag-slip)

İdeal haldeki iki kayma yüzeyinde, yüzeyler birbirine tam olarak oturmaktadır ve yüzeyler ile dönme eksenleri arasında diklik söz konusudur. Fakat gerçekte parçaların hatalı işlenmesi, makina elemanlarının montajı vb. gibi durumlar eksen kaçıklıklarına neden olmaktadır. Bu gibi durumlar üç grupta toplanabilir. Bunlardan ilki, sürtünme elemanının dönme ekseninin tam olarak yatay olmaması ve sıfırdan farklı bir açıya sahip olmasıdır. İkincisi ise, disk yüzeyi ile dönme ekseninin birbirine tam olarak dik olmaması ve aradaki açının 90° den farklı olmasıdır. Bu iki açının toplamı atak açısını (θ) oluşturmaktadır. Üçüncü ve son olarak ise, disk yüzeyi tam olarak düz değildir ve vadi ve tepeciklerle dolu bir yapıya sahiptir. Bu durum, bazı noktalarda temasa yol açarken bazı noktalarda da temasın kaybolmasına yol

açtığından normal kuvvette periyodik dalgalanmalara ve ortaya çıkan θ 'ya göre durum değişikliklerine neden olmaktadır. Eğer disk saat yönünde dönüyorsa atak açısı genelde 90^0 'den küçüktür (tersi yönünde dönüşte $\theta > 90^0$). Eğer θ , 90^0 'den küçükse kitleme-bırakma mekanizması sonucu disk ve sürtünme elemanı arasında büyük, bağıl hareketi engelleyici kuvvetler oluşmakta ve sürtünme elemanı şiddetli olarak sürtünmeden kaynaklanan titreşime maruz kalmaktadır. Bu titreşimler sürtünme katsayısının sabit olduğu durumda bile meydana gelebilmektedir [5].

İlk olarak 1961 yılında Spurr tarafından yapılan araştırmada kitleme-bırakma titreşimlerinin sürtünme elemanının kayma yüzeyiyle kilitlenmesi sonucu ortaya çıktığı belirtilmiştir [19]. Spurr'a göre sürtünme kuvvetinin artarak yüksek değerlere ulaşması sürtünme elemanı ile dönme yüzeyini birlikte hareket etmeye zorlamaktadır (kitleme). Sürtünme kuvvetinde meydana gelen düşüş sonucu da sürtünme elemanı ile dönme yüzeyi birbirine göre hareket etmeye başlamakta (bırakma) ve bu çevrim böyle devam etmektedir [19,20]. Daha öncede belirtildiği üzere, kitleme-bırakma titreşimleri $\theta < 90^0$ durumunda meydana gelmektedir.

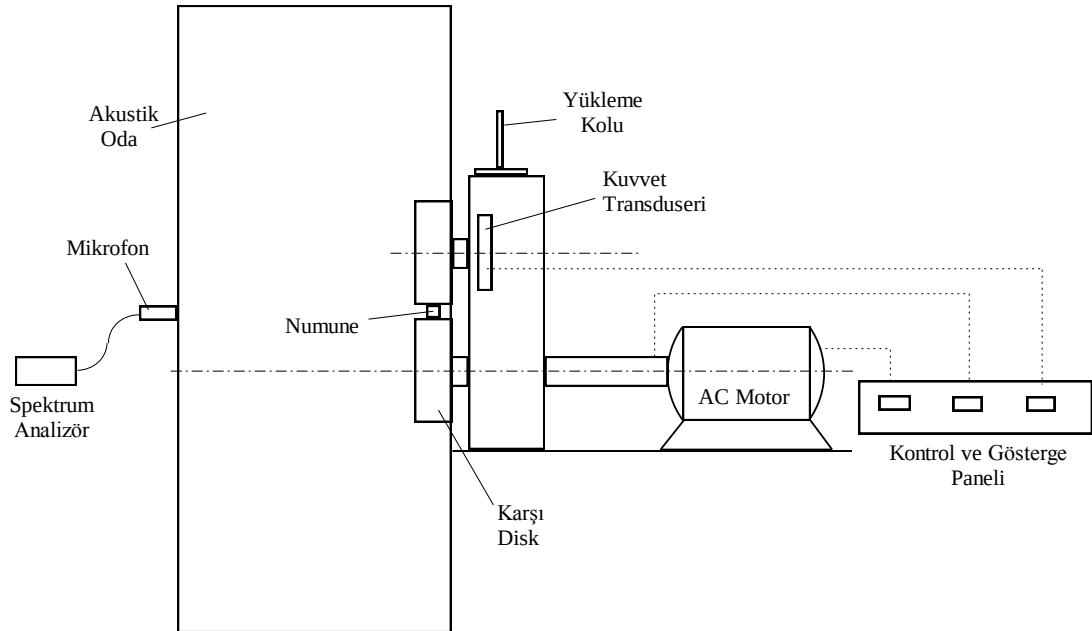
4.2.3 Negatif hız-sürtünme ilişkisi

Genel olarak ele alınırsa, sürtünme katsayısı kayma hızından bağımsızsa veya pozitif olarak etkileniyorsa, bu durumda sürtünme kuvveti bir dış kuvvet tarafından sağlanan hareketi engelleyici bir etki gösterecektir [5]. Bu şartlarda sürtünme kuvveti beraberinde enerji harcanmasına neden olan pozitif sönüm etkisi meydana getirecektir ve bu pozitif sönüm sürtünme kaynaklı titreşimi engelleyecektir. Eğer sürtünme ile hız arasındaki ilişki negatifse, yani sürtünme katsayısı kayma hızıyla ters orantılı olarak değişiyorsa, bu durum negatif sönüme neden olacaktır. Burada sürtünme enerjisinin sisteme verilmesi sonucu kararlı olan kayma hareketi kararsız hale gelecek ve sonuç olarak kendi kendini ikaz eden titreşimler meydana gelecektir [19,20]. Fakat, kendi kendini ikaz eden titreşimlerin, negatif sürtünme-hız ilişkisinin olmadığı yerlerde de gözlenebildiğini belirtmek gerekmektedir.

5. DENEY TESİSATI ve DENEYLER

5.1 Deney Tesisatının Tanıtılması

Deneylerde laboratuarda bulunan PLINT marka pim-ring deney tesisatı kullanılmıştır. Deney tesisatının şematik resmi Şekil 5.1’de ve genel görünüşü Şekil 5.2’de görülmektedir. Sistemde normal kuvvet, yük koluna asılan ağırlıklar yardımı ile uygulanmaktadır. Böylece sabit pim, sabit hızla dönen ringin yüzeyine bastırmaktadır. Sistem yüksüz durumda iken, yük kolunun kendi ağırlığından dolayı sisteme 4,3 N’luk bir kuvvet etki etmektedir. Harekete karşı oluşan sürtünme direnci ise sabit diske yerleştirilmiş kuvvet transdüseri yardımı ile kontrol ünitesinden izlenebilmektedir. Kullanılan transdüser ± 200 N’a kadarlık bir kuvvet değişimini ± 2 mV hassasiyetle ölçebilmektedir. Bu da yapılan ölçümlerde en fazla $\pm 0,1$ N’luk bir hataya neden olmaktadır.



Şekil 5.1 : Deney Tesisatının Şematik Görünüşü



Şekil 5.2 : Deney Tesisatının Genel Görünüşü

Deney tesisatı 0,25 kW'lık bir AC motor ile tahrik edilmektedir. Motor hızı, bir hız ayar ünitesi yardımı ile 0...800 d/dak arasında ayarlanabilmektedir. Tahrik mili üzerinden okuma yapan bir manyetik takometre ve kontrol ünitesindeki sayaç yardımıyla kaç tur yapıldığı ölçülebilmektedir. Böylece toplam alınan yol hesaplanabilmektedir.

Polimer malzemenin temas edeceği karşı yüzey krom molibden alaşımlı çelikten imal edilmiş ve yüzeyi parlatılmıştır. Böylece yüzey pürüzlülüğünün etkisi ihmal edilebilmektedir (yüzey pürüzlülük değeri $<0,1 \mu\text{m}$).

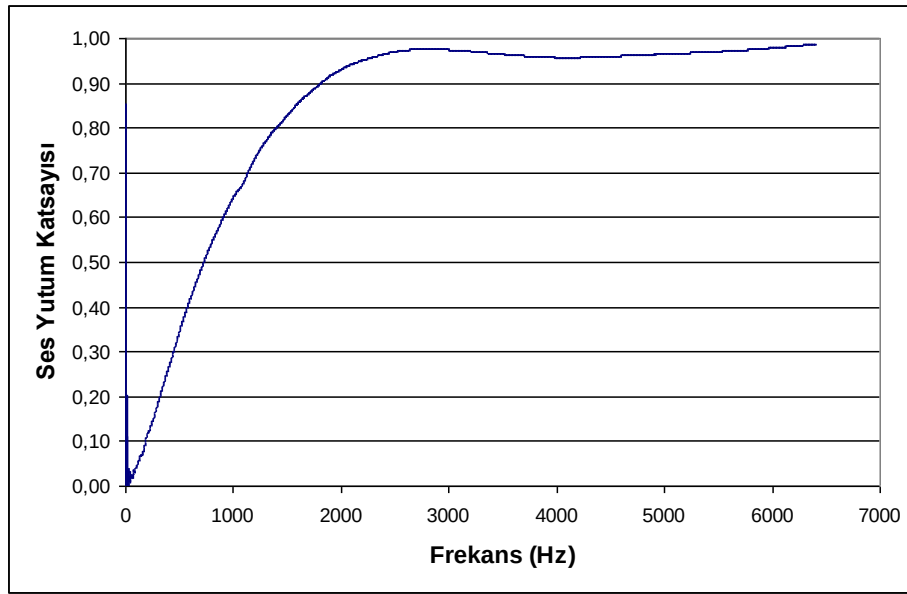
Deneylerde grafit katkılı döküm PA 6, MoS₂ katkılı döküm PA 6, MoS₂ katkılı PA 66 ve saf PA 6 malzemeler kullanılmıştır. Böylece katkının sürtünme kaynaklı gürültüyü azaltıcı yönde bir etkisi olup olmadığı araştırılmaya çalışılmıştır. Numuneler 10 mm çapında ve 10 mm uzunlukta, temas yüzeyinde eğrilik yarıçapı ringle aynı olacak şekilde hazırlanmıştır.

5.2 Akustik Oda

Yapılan literatür incelemesi sonucunda frekansın 400 ile 20000 Hz aralığında olmasının anlamlı olacağı görülmüştür [3,4]. Oda boyutlarının belirlenmesi için,

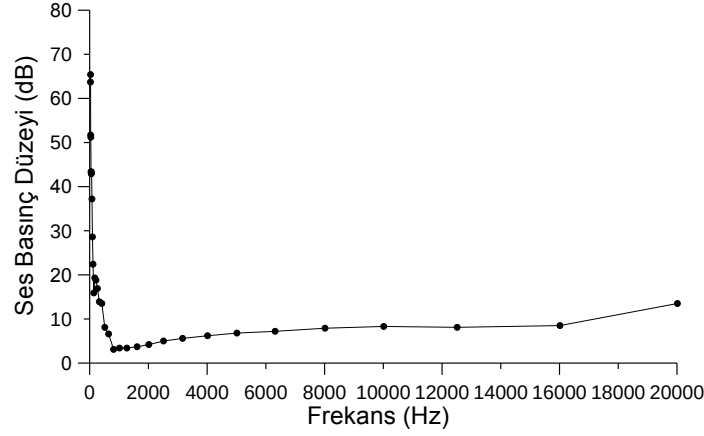
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5.1)$$

bağıntısı kullanılmıştır. Bu bağıntıda λ ; sesin dalga boyunu (m), c; sesin havadaki hızını (344 m/sn), f; frekansı (400 Hz) göstermektedir. Buna göre, ölçüm odasının boyutları temas noktasına her yönden 85 cm uzaklıkta olacak şekilde belirlenmiştir. Ölçüm odasının içi ses yutucu karakteristiği Şekil 5.3'te görülen 5 cm kalınlığındaki cam yünü ile kaplanmıştır. Temas yüzeyinin tam karşısına yerleştirilen B&K 2260 mikrofoni ile ses ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 5.3 : Cam Yünü Malzemesinin Ses Yutum Katsayısı-Frekans İlişkisi

Deney tesisatı çalışırken motordan gelebilecek gürültü ve titreşimlerin yapılan ölçümlere olan etkisini azaltmak için akustik odanın tesisata bağlantısı, pim-ring temasının olduğu noktadan ses yutucu esnek bir bağlantı yardımı ile yapılmıştır. Şekil 5.4'de sistem sükunette iken odanın ses basınç düzeyi (SPL) spektrumu görülmektedir. Buradan da görülebileceği üzere çok geniş bir frekans aralığında oldukça düşük ses basınç düzeyi ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.4 : Sistem Sükunette iken Akustik Odanın Ses Basınç Düzeyi Spektrumu

5.3 Deneylerin Yapılışı

Deneyler 20°C ortam sıcaklığı ve yaklaşık %60 nem oranındaki laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir.

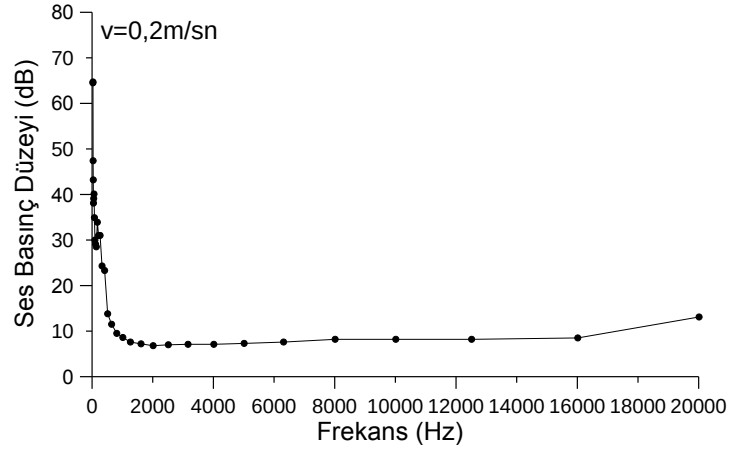
Mikrofon deneyler başlamadan önce ses kalibratörü yardımı ile kalibre edilmiştir. 1/3 oktav bandında 0,8-80,8 dB aralığında ölçümler yapılmıştır.

Deneyler, $F_N=45$ N'luk sabit yük altında, 0,2; 0,5 ve 1 m/sn'lik üç farklı hızda gerçekleştirilmiştir. Deneylere başlamadan önce her bir hız değerinde sistemin yüksüz haldeki çalışma durumunda oluşan ses ölçülerek kaydedilmiştir. Bu arka plan gürültülerinin değişimleri sırasıyla Şekil 5.5-5.6-5.7'de görülmektedir. Şekil 5.4'de verilen sükunet hali değerleri ile bu değerler kıyaslandığında akustik odanın düşük frekanslardaki bir iki küçük düzensizlik dışında amaca uygun tasarlandığı söylenebilir.

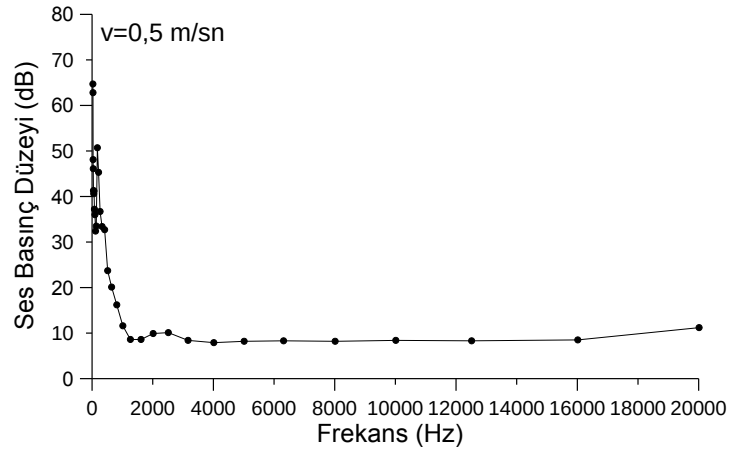
Yüksüz çalışma halinde elde edilen değerler, daha sonra sistem yüklü halde iken yapılan deney sonuçlarından çıkarılarak sadece sürtünme sonucu oluşan gürültünün değeri belirlenmeye çalışılmıştır. Ses basınç değerlerinin birbirine göre farkı her bir merkez frekansı için denklem 5.2 kullanılarak belirlenmiştir.

$$SPL = 10 \times \log(10^{L_{p-\text{son}}/10} - 10^{L_{p-\text{ilk}}/10}) \quad (5.2)$$

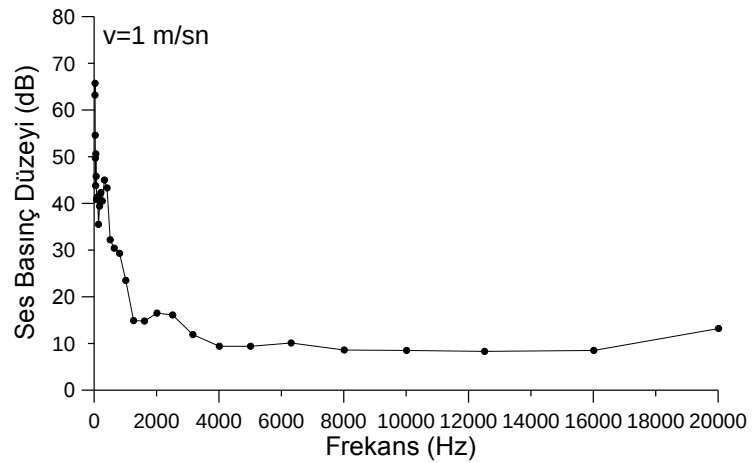
Burada, L_p ; her bir merkez frekansı için ölçülen ses basınç düzeyini göstermektedir.



Şekil 5.5 : $v=0.2$ m/s Hızdaki Arka Plan SPL Spektrumu



Şekil 5.6 : $v=0.5$ m/s Hızdaki Arka Plan SPL Spektrumu



Şekil 5.7 : $v=1$ m/s Hızdaki Arka Plan SPL Spektrumu

6. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

6.1 Deney Sonuçları

Takdim edilen bu çalışmada sabit yük altında farklı hızlar için ses basınç düzeyinin (SPL), frekans ve alınan yolla değişimi üç boyutlu grafiklerle verilmiştir. Artan hızla ses basınç düzeyinin frekansla değişimi ise iki boyutlu grafiklerle verilmiştir. Ayrıca 1/3 oktav bandında merkez frekanslardaki ses basınç düzeyinin hızla değişimi de verilmektedir. Sürtünme katsayısının alınan yolla değişimleri de her bir kayma hızı değeri için iki boyutlu grafiklerle verilmektedir. Böylece ses basınç düzeyinin hem alınan yolla hem frekansla hem de sürtünme katsayılı ile nasıl değiştiği görülebilmektedir. Her bir malzemenin birbiri ile karşılaştırılabilmesi için ses basınç düzeyinin frekans değişimleri toplu olarak da verilmektedir.

Şekil A.1-A.4'te grafit katkılı döküm PA 6 için sırasıyla $v=0,2$ m/sn, $v=0,5$ m/sn ve $v=1$ m/sn hızlarında ses basınç düzeyinin, alınan yol ve frekansla değişimi üç boyutlu grafik üzerinde görülmektedir. Şekil A.5'te ise sürtünme katsayısının alınan yol ile değişimi aynı malzeme için her bir hız değeri için görülmektedir. Şekil A.6 ve A.7'de başlangıç anındaki ses basınç düzeyinin frekansla değişimi sırasıyla lineer artış durumu ve 1/3 oktav bandındaki merkez frekanslar için görülmektedir. Şekil A.8 ve A.9'da ise benzer şekilde 200 m'lik çalışma sonundaki ses basınç düzeyi değişimleri verilmektedir. Benzer eğriler MoS_2 katkılı döküm PA 6 için Şekil A.10-A.17'de verilmektedir. Şekil A.18-A.25'de benzer şekiller MoS_2 katkılı PA 66 için, Şekil A.26-A.33'de ise benzer şekiller saf PA 6 için görülmektedir. Ayrıca $v=0,2$ m/sn kayma hızı için incelenen tüm malzemelerin ses basınç düzeylerinin karşılaştırmalı olarak Şekil A.34 ve A.35'te sırasıyla başlangıç anı ve 200 m'lik çalışma sonundaki frekansla değişimleri görülmektedir. Benzer şekilde $v=0,5$ m/sn kayma hızı için Şekil A.36 ve A.37, $v=1$ m/sn için Şekil A.38 ve A.39'da görülmektedir.

6.2 Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil A.1-A.3'deki grafit katkılı döküm PA 6'a ait değişimler incelendiğinde tüm kayma hızları için ses basınç düzeyinin frekansla değişiminin, yolla çok büyük değişimler göstermediği ve belli bir frekans değerinden sonra hemen hemen sabit kaldığı söylenebilir. Şekil A.3 ve A.4, $v=1$ m/sn hız için değişimleri göstermektedir. Grafit katkılı döküm PA 6 için bu hız değerinde bir kararsızlık gözlenmiştir. Bu nedenle bu hız değeri için yapılan iki ölçüm sonuçları da verilmiştir. Şekil A.4'te belli bir yol alınıncaya kadar ses basınç düzeyinin daha yüksek değerlerde salındığı ancak deney sonuna doğru Şekil A.3'tekine benzer bir değişime ulaştığı gözlenmiştir. Sürtünme katsayısının değişimi de incelendiğinde sürtünme katsayısının düştüğü noktadan itibaren SPL değerinin de düştüğü görülmektedir. Buna göre sürtünme kaynaklı titreşimin bu artışa neden olduğu söylenebilir. Şekil A.5'te ise sürtünme katsayısının yolla kayda değer bir değişim göstermediği ancak artan hız değeri ile arttığı görülmektedir. Sürtünme katsayısı düşük hızlarda 0,15 , yüksek hızlarda ise 0,25 civarında değiştiği görülmektedir. Başlangıç anı için Şekil A.6 ve A.7 incelendiğinde artan hızla ses basınç düzeyinin kayda değer bir artış göstermediği görülmektedir. Ancak yüksek hız değerinde biraz artış olduğu söylenebilir. Akustik oda tasarımı 400 Hz frekansa göre yapıldığı için bu değer altındaki değişimler güvenilir kabul edilemez. Bu nedenle 400 Hz üzerindeki değerler incelemede göz önünde bulundurulmuştur. 800 ve 1600 Hz civarında ses basınç düzeyinin tepe noktaları oluşturduğu söylenebilir. Şekil A.8 ve A.9'dan 200 m'lik çalışma sonunda ise yüksek hızda ses basınç düzeyi daha düşük değerler vermiştir.

MoS₂ katkılı döküm PA 6'a ait Şekil A.10-A.12'deki değişimler incelendiğinde benzer şekilde tüm kayma hızları için ses basınç düzeyinin frekansla değişiminin yolla çok büyük değişimler göstermediği ve belli bir frekans değerinden sonra hemen hemen sabit kaldığı söylenebilir. Şekil A.13'te görülen sürtünme katsayısının yolla değişimi incelendiğinde artan yolla kayda değer bir değişim göstermediği ancak artan hız değeri ile arttığı görülmektedir. Sürtünme katsayısının düşük hızlarda 0,1 , yüksek hızlarda ise 0,2 civarında değiştiği görülmektedir. Şekil A.14 ve A.15'te başlangıç anı için verilen SPL değişimleri incelendiğinde düşük frekans değerlerinde yüksek hız değeri için bir artış gösterirken yüksek frekans değerlerinde her bir kayma

hızında birbirine oldukça yakın bir değişim vermektedir. 500 Hz civarında SPL değerinin bir tepe noktası oluşturduğu söylenebilir. 5000 Hz civarından sonra ise nerdeyse sıfıra yakın SPL değerleri elde edilmiştir. Şekil A.16 ve A.17’de 200 m’lik çalışma sonunda başlangıç anına benzer bir karakteristik görülmektedir. Yine 500 Hz civarında bir tepe noktası oluşmaktadır. $v=0,2$ ile $v=0,5$ m/sn hızlarında 3150 Hz frekans değerinden sonra sıfıra yakın SPL değerleri elde edilmesine karşılık $v=1$ m/sn hızda bu frekans değeri yaklaşık 5000 Hz değerinden sonra sıfıra düşmektedir.

MoS₂ katkılı PA 66’a ait Şekil A.18-A.20’deki değişimler incelendiğinde diğer numuneler ile benzer bir karakteristikte SPL değerleri elde edildiği söylenebilir. Şekil A. 21’de görülen sürtünme katsayısının yolla değişimi incelendiğinde artan hızla sürtünme katsayısı artmakta, $v=0,2$ m/sn kayma hızında 100 m’ye kadar bir artış gözlenmekte daha sonra ise sabit bir değer etrafında değişmektedir. Diğer kayma hızı değerlerinde ise yolla sabit kaldığı söylenebilir. Sürtünme katsayısının değeri 0,15 ile 0,25 arasında değişmektedir. Şekil A.22 ve A.23’te başlangıç anı için verilen SPL değişimleri incelendiğinde artan kayma hızı ile SPL değerlerinin arttığı söylenebilir. 630 Hz civarında SPL değerinin bir tepe noktası oluşturduğu görülmektedir. $v=0,2$ m/sn kayma hızı için nerdeyse sessiz çalışmakta, ancak diğer kayma hızlarında 3150 Hz civarında SPL değeri sıfıra düşmektedir. Şekil A.24 ve A.25’de 200 m’lik çalışma sonunda başlangıç anına benzer bir karakteristik elde edilmiştir. Ancak $v=0,2$ m/sn kayma hızında merkez frekanslardaki SPL değerlerinde artış görülmektedir. Yine 630 Hz civarında bir tepe noktası oluşmaktadır.

Saf PA 6’a ait Şekil A.26-A.28’deki eğriler incelendiğinde diğer numuneler ile benzer bir karakteristikte SPL değişimleri elde edildiği söylenebilir. Ancak SPL seviyesi daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Şekil A. 29’de görülen sürtünme katsayısının yolla değişimi incelendiğinde sürtünme katsayısının diğer numunelerden oldukça büyük bir değerde olduğu gözlenmektedir. Özellikle yüksek hız değerlerinde 150 m’lik alınan yol boyunca sürtünme katsayısı artmakta daha sonra sabit bir değer etrafında kalmaktadır. Sürtünme katsayısı 0,5 gibi oldukça yüksek değerlere çıkmaktadır. Şekil A.30 ve A.31’de başlangıç anı için verilen SPL değişimleri incelendiğinde $v=0,2$ m/sn kayma hızı için oldukça düşük bir seviyede kalmasına karşın diğer kayma hızlarında oldukça büyük değerlere ulaşmaktadır. Genel bir tepe noktası göstermemektedir. Şekil A.32 ve A.33’de 200 m’lik çalışma sonunda başlangıç anına benzer bir karakteristik elde edilmiştir.

Şekil A.34 ve A.35'deki eğriler incelendiğinde $v=0,2$ m/sn kayma hızı için PA 6 oldukça düşük bir ses basınç düzeyi göstermektedir. Ancak grafit katkılı döküm PA 6 diğerlerine kıyasla daha yüksek bir SPL değeri vermektedir. Şekil A.36 ve A.37'deki eğriler incelendiğinde ise $v=0,5$ m/sn kayma hızında PA 6'nın oldukça yüksek bir ses basınç düzeyi gösterdiği görülmektedir. Bu malzemenin bu çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısının da oldukça yüksek olduğu dikkat çekmektedir. MoS₂ katkılı döküm PA 6 ile MoS₂ katkılı PA 6 ise oldukça küçük SPL değerlerinde kalmaktadır. Şekil A.38 ve A.39'deki eğriler incelendiğinde ise $v=1$ m/sn kayma hızında yine PA 6'nın oldukça yüksek bir ses basınç düzeyi gösterdiği görülmektedir. Benzer şekilde MoS₂ katkılı döküm PA 6 ile MoS₂ katkılı PA 6 ise oldukça küçük SPL değerlerinde kalmaktadır.

Ses basınç düzeyinin genel olarak yolla değişmediği, 1/3 oktav bandındaki düşük merkez frekans değerleri için artan hızla bir miktar arttığı söylenebilir. Sürtünme katsayısının da bu artışta önemli bir etken olduğu ifade edilebilir. Sürtünme katsayısının yüksek olduğu durumlarda sürtünme kaynaklı titreşimin gürültüyü önemli ölçüde artırıcı yönde etki yaptığı söylenebilir. Grafit ve MoS₂ katkılarının saf malzemeye göre gürültüyü azaltıcı yönde etki yaptığı söylenebilir. Ancak grafit katkılı malzemenin bazı çalışma şartlarında kararsızlık gösterdiği tespit edilmiştir. MoS₂ katkısının ise hem daha düşük seviyeli gürültü oluşumuna neden olduğu hem de daha kararlı bir gürültü karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir.

Bu çalışmanın devamı olarak, titreşimin gürültüye etkisi incelenebilir. Ayrıca polimer-polimer temas durumunda SPL değerinin ne düzeyde kaldığı da ileriki bir çalışma konusu olarak ele alınabilir.

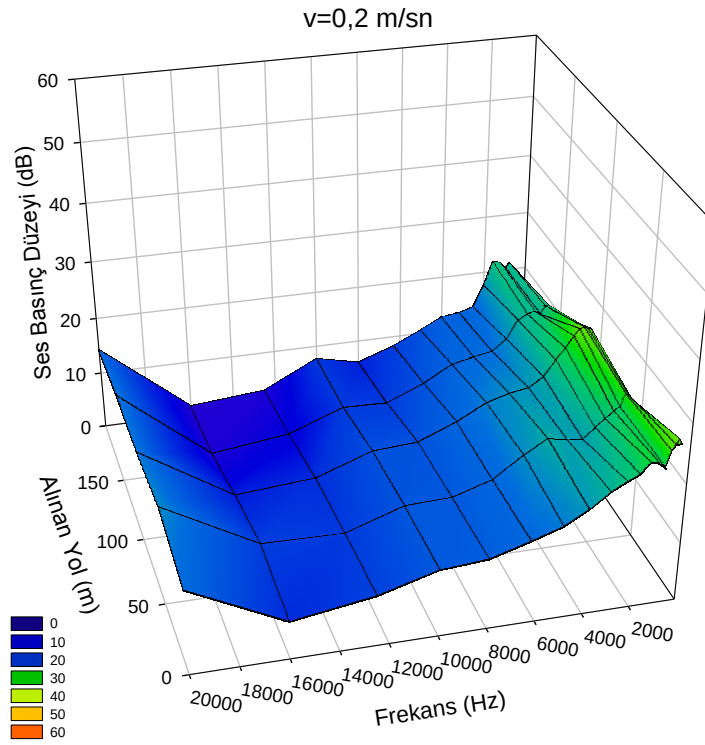
KAYNAKLAR

- [1] **Rosato, D. and Rosato, D.**, 2003. *Plastics engineered product design*, Elsevier Advanced Technology, Oxford; New York.
- [2] **Lu, M.**, 2001. Analysis of acoustic signals due to tool wear during machining, *PhD Thesis*, University of Michigan, Ann Arbor.
- [3] **Symmons, G.R. and McNulty, G.J.**, 1986. Acoustic output from stick-slip friction, *Wear*, **113**, 79-82.
- [4] **Othman, M.O., Elkholy, A.H. and Seireg, A.A.**, 1990. Experimental investigation of frictional noise and surface-roughness characteristics, *Experimental Mechanics*, **30**, 328-331.
- [5] **Ibrahim, R.A., Madhavan, S., Qiao, S.L. and Chang, W.K.**, 2000. Experimental investigation of friction-induced noise in disc brake systems, *International Journal of Vehicle Design*, **23**, 218-240.
- [6] **Soom, A. and Kim, C.**, 1983. Interaction between dynamic normal and frictional forces during unlubricated sliding, *ASME J. Lubr. Technol.*, **105**, 221-229.
- [7] **Seireg, A.A.**, 1998. *Friction and lubrication in mechanical design*, Marcel Dekker Inc., New York.
- [8] **Rorrer, R.A.L. and Juneja, V.**, 2002. Friction-induced vibration and noise generation of instrument panel material pairs, *Tribology International*, **35**, 523-531.
- [9] **Brockley, C.A. and Ko, P.L.**, 1970. Quasi-harmonic friction-induced vibration, *ASME J. Lubr. Technol. Trans.*, **92**, 550-556.
- [10] **Aronov, V., D'Souza, A.F., Kalpakjian, S. and Shareef, I.**, 1984. Interactions among friction, wear, and system stiffness - part 2: vibrations induced by dry friction, *Journal of Tribology*, **106**, 59-64.
- [11] **Tworzydło, W.W., Hamzeh, O.N., Zaton, W. and Judek, T.J.**, 1999. Friction-induced oscillations of a pin-on-disk slider: analytical and experimental studies, *Wear*, **236**, 9-23.
- [12] **Ko, P.L. and Brockley, C.A.**, 1970. The measurement of friction and friction induced vibration, *ASME J. Lubr. Technol. Trans.*, **92**, 543-549.

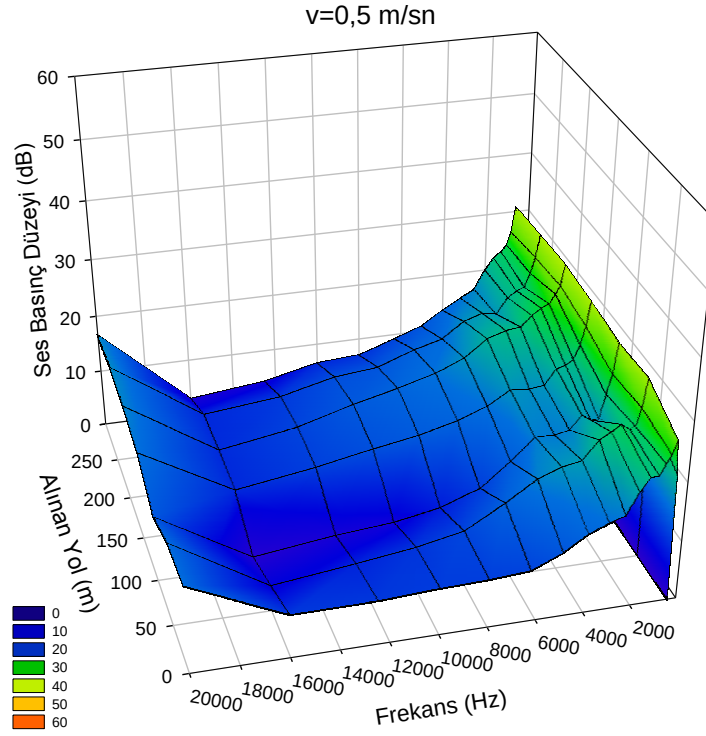
- [13] **Ibrahim, R.A.**, 1994. Friction-induced vibration, chatter, squeal, and chaos part I: mechanics of contact and friction, *Appl. Mech. Rev.*, **47**, 209-226.
- [14] **Aronov, V., D'Souza, A.F., Kalpakjian, S. and Shareef, I.**, 1984. Interactions among friction, wear, and system stiffness - part 1: effect of normal load and system stiffness, *Journal of Tribology*, **106**, 54-58.
- [15] **Dweib, A.H. and D'Souza, A.F.**, 1990. Self-excited vibrations induced by dry friction – part 1: experimental study, *Journal of Sound and Vibration*, **137**, 163-175.
- [16] **Yamaguchi, Y.**, 1990. Tribology of plastic materials: their characteristics and applications to sliding components, Elsevier, Amsterdam.
- [17] **Akay, A.**, 2002. Acoustics of friction, *J. Acoust. Soc. America*, **111**, 1525-1548.
- [18] **Baleri, M., Sassani, F. and Ko, P. L.**, 2003. Stick-slip vibration between two large concentric circular discs in rotational contact with multiple point loads, *Journal of Mechanical Design*, **125**, 786-792.
- [19] **Qiao, S.**, 2001. Stochastic characterization of friction induced vibration, *PhD Thesis*, Wayne State University, Detroit, Michigan.
- [20] **D'Souza, A.F. and Dweib, A. H.**, 1990. Self-excited vibrations induced by dry friction – part 2: stability and limit-cycle analysis, *Journal of Sound and Vibration*, **137**, 177-190.

EK A

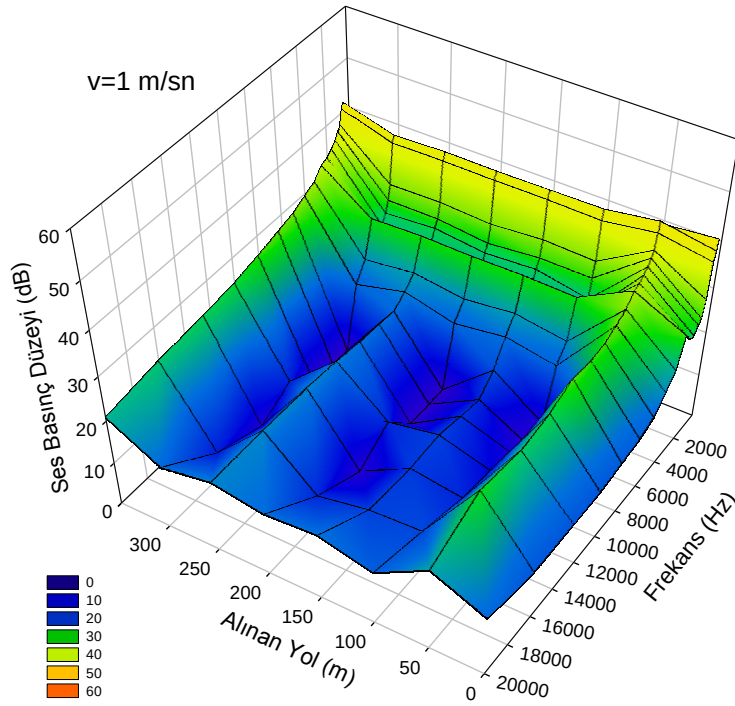
SONUÇ BÖLÜMÜNE AİT ŞEKİLLER



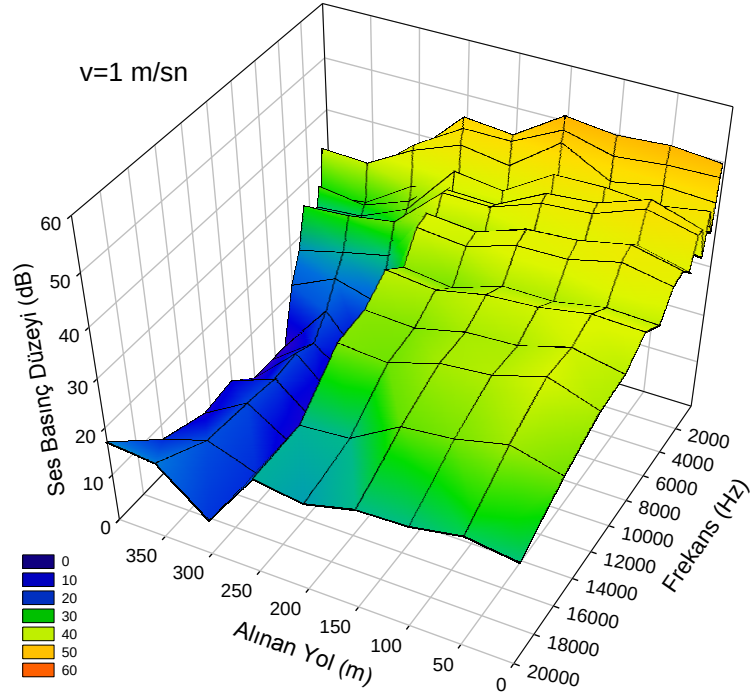
Şekil A.1 : Grafit Katkılı Döküm PA 6'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



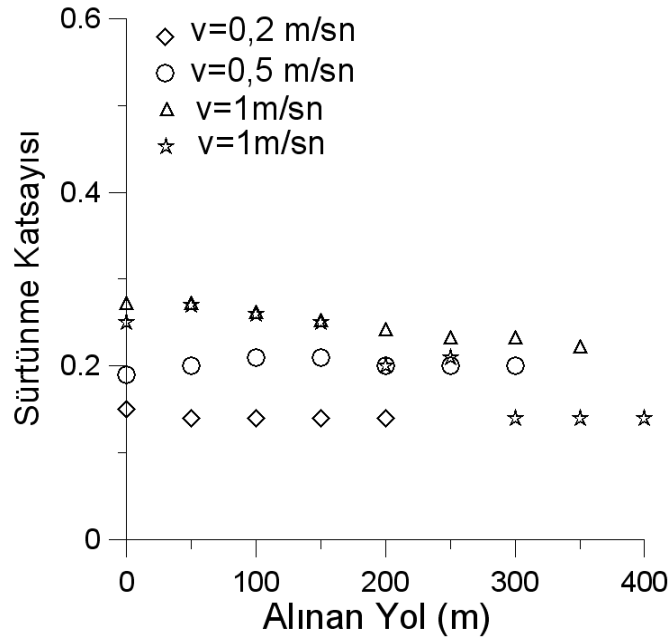
Şekil A.2 : Grafit Katkılı Döküm PA 6'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



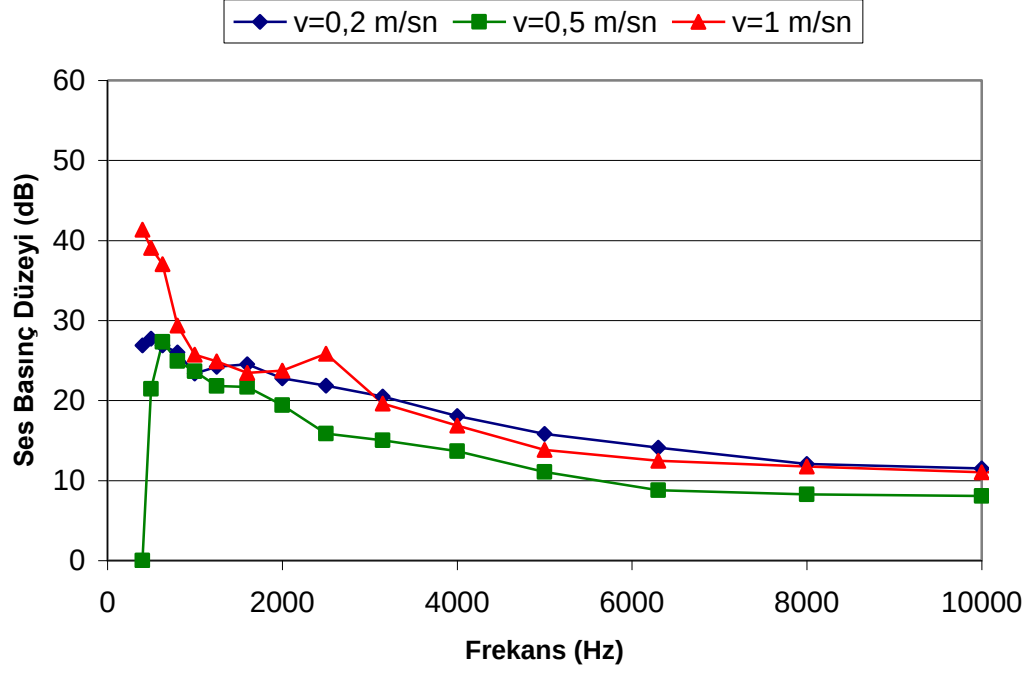
Şekil A.3 : Grafit Katkılı Döküm PA 6'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



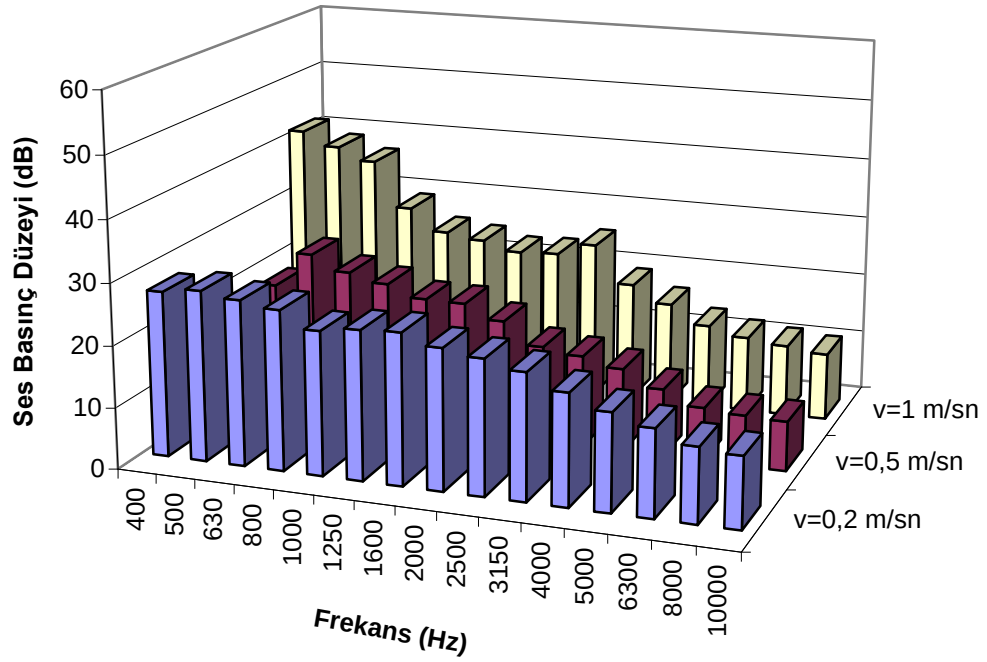
Şekil A.4 : Grafit Katkılı Döküm PA 6'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



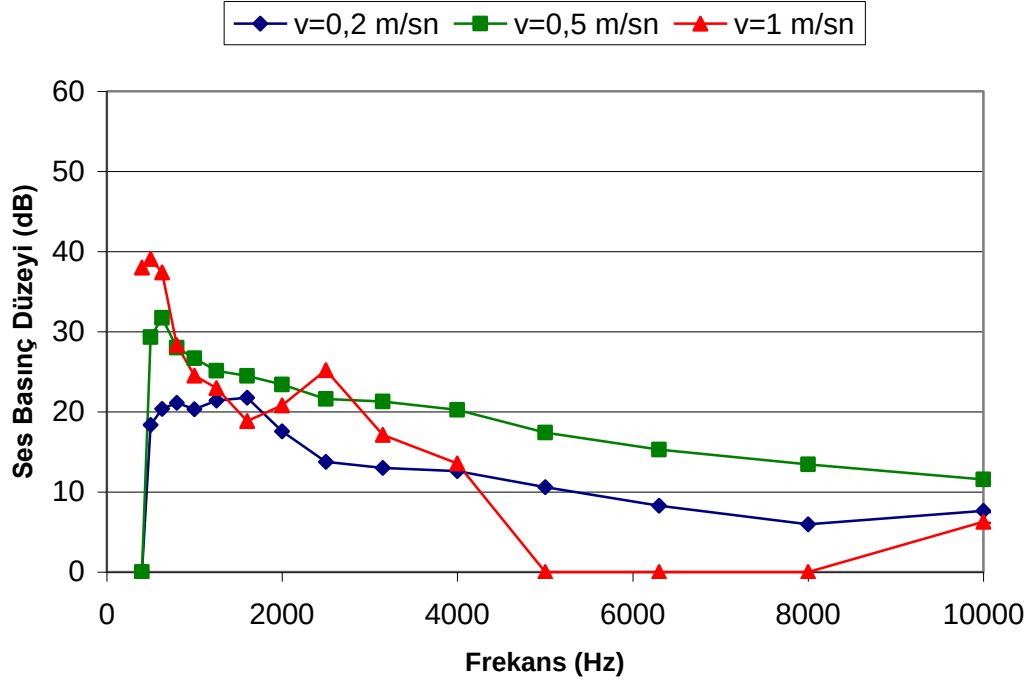
Şekil A.5 : Grafit Katkılı Döküm PA 6'nın Sürtünme Katsayısının, Alınan Yol ile Değişimi



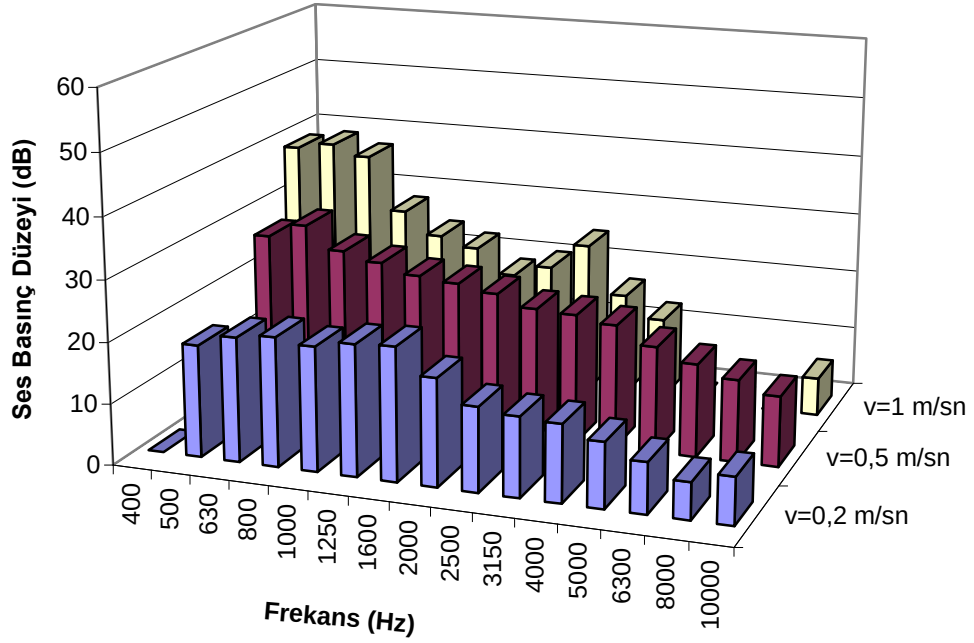
Şekil A.6 : Grafit Katkılı Döküm PA 6'nın Başlangıç Anındaki Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



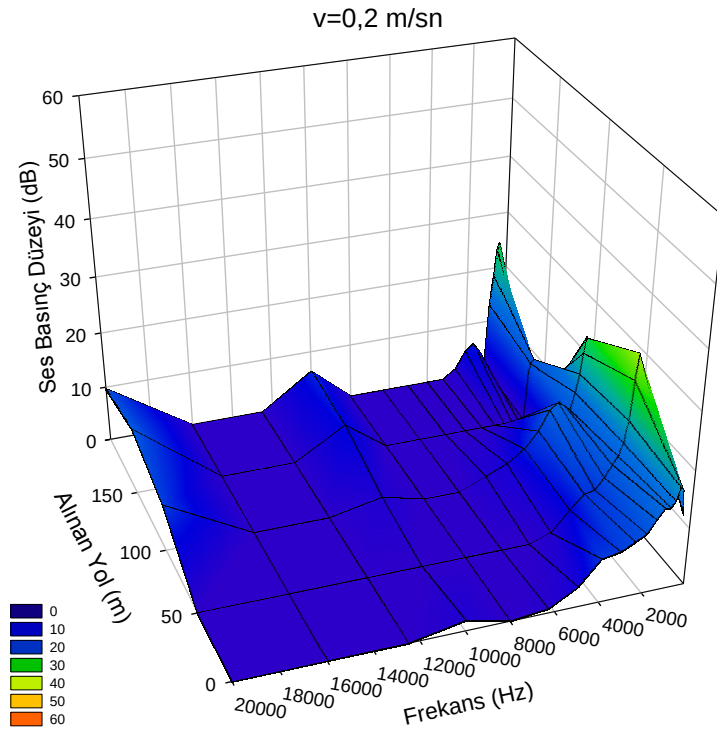
Şekil A.7 : Grafit Katkılı Döküm PA 6 için 1/3 Oktav Bandında Merkez Frekanslardaki Ses Basınç Düzeyinin Başlangıç Anında Hızla Değişimi



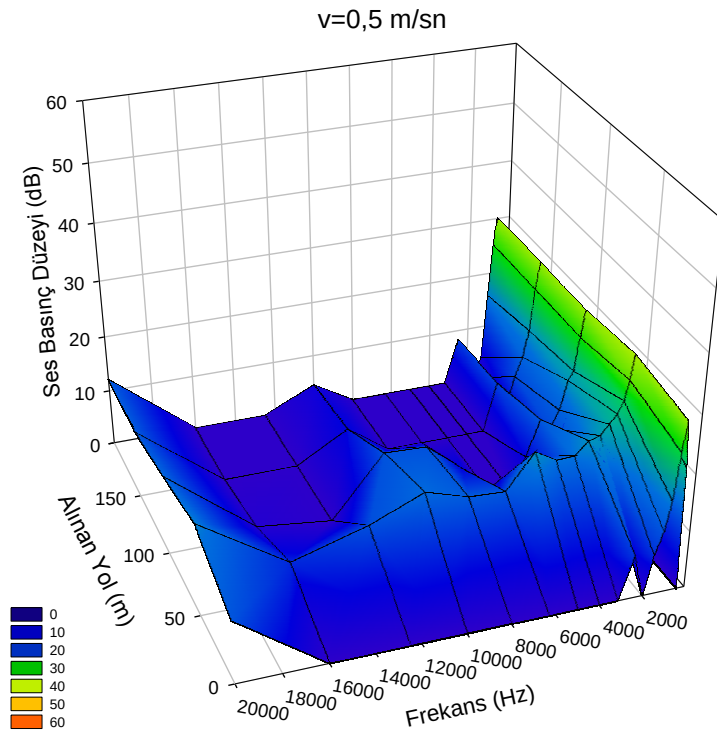
Şekil A.8 : Grafit Katkılı Döküm PA 6'nın 200 m'lik Çalışma Sonunda Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



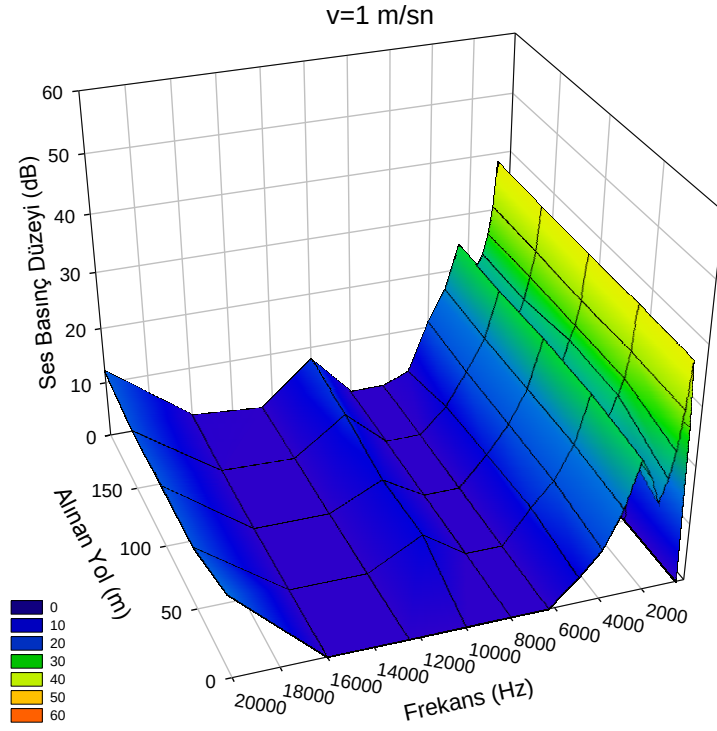
Şekil A.9 : Grafit Katkılı Döküm PA 6 için 1/3 Oktav Bandında Merkez Frekanslardaki Ses Basınç Düzeyinin 200 m'lik Çalışma Sonunda Hızla Değişimi



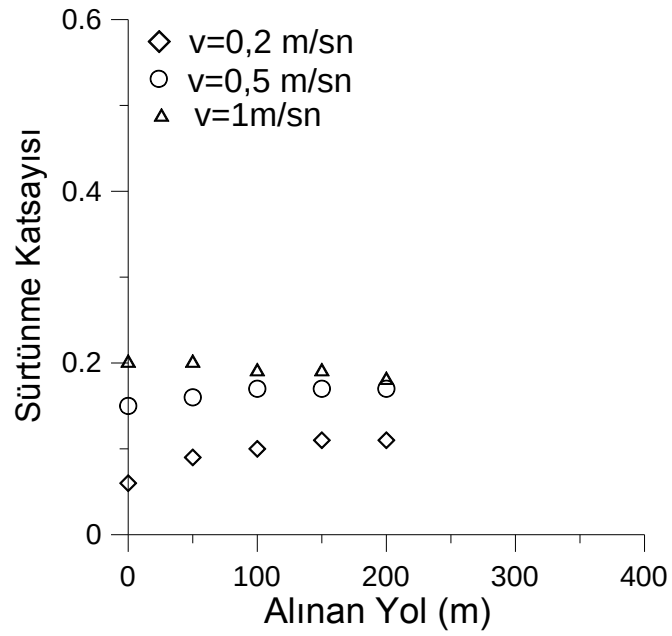
Şekil A.10 : MoS₂ Katkılı Döküm PA 6'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



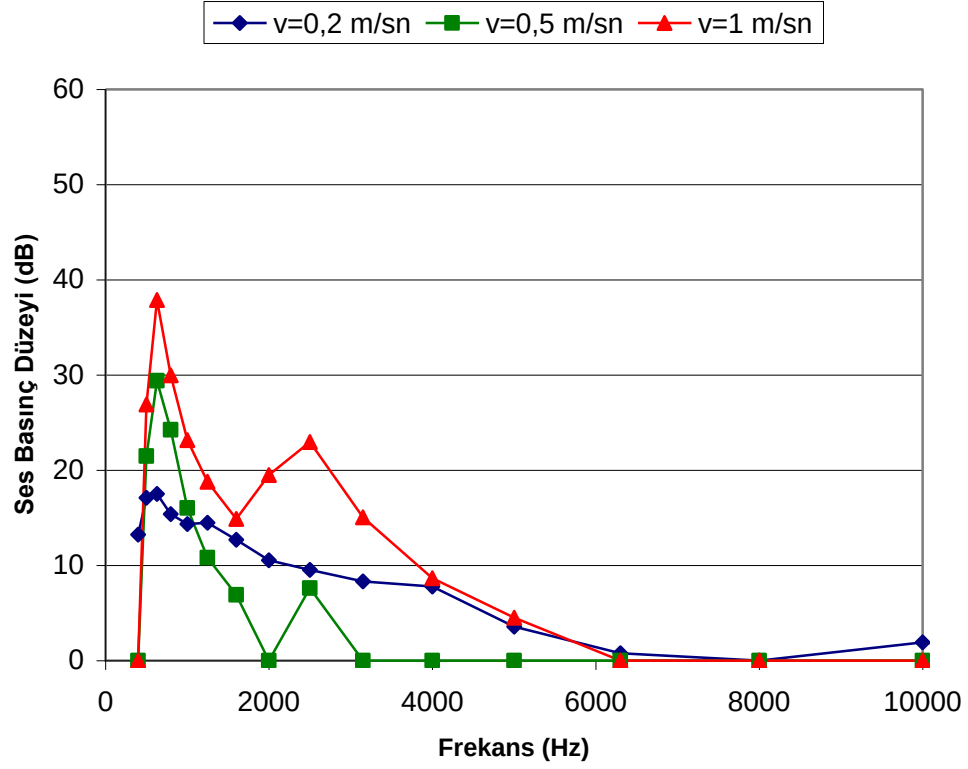
Şekil A.11 : MoS₂ Katkılı Döküm PA 6'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



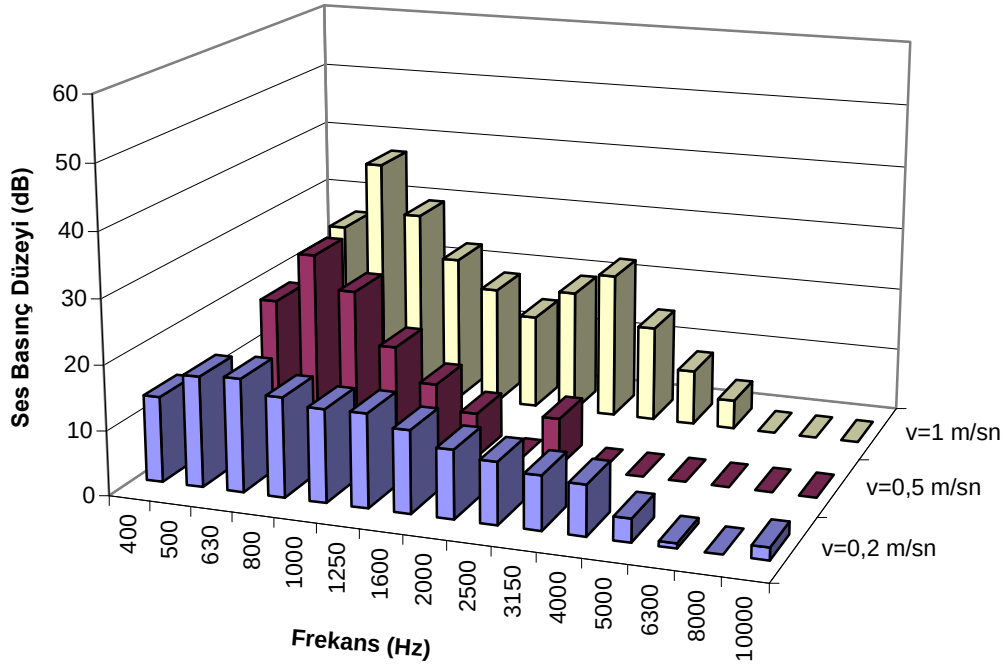
Şekil A.12 : MoS₂ Katkılı Döküm PA 6'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



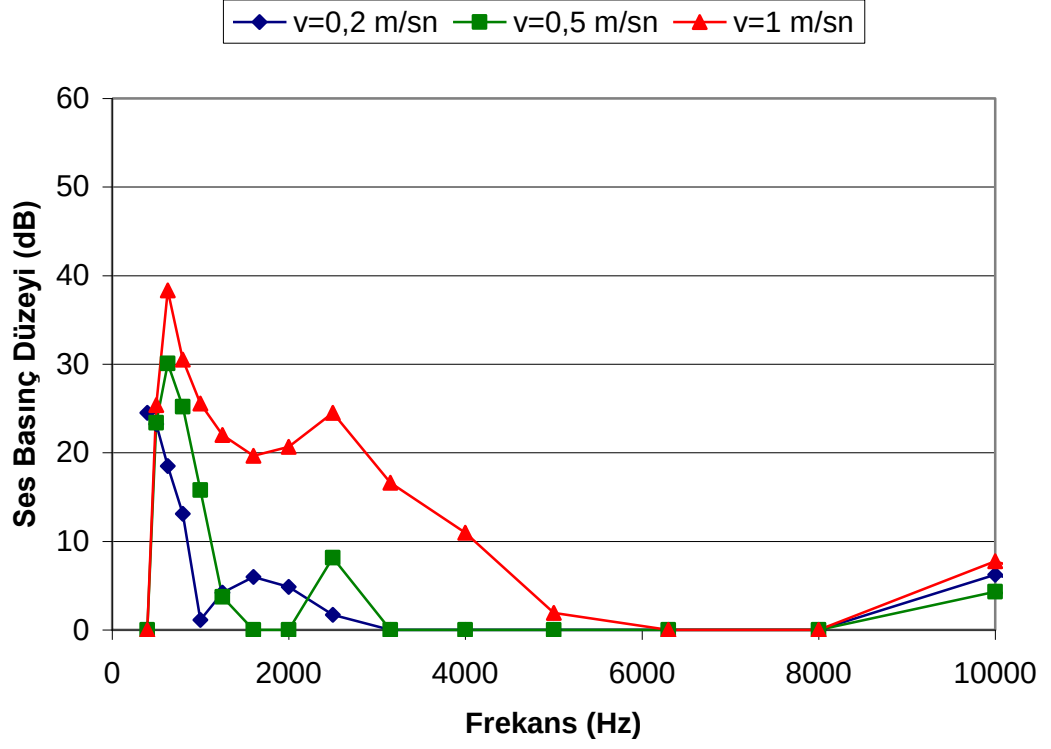
Şekil A.13 : MoS₂ Katkılı Döküm PA 6'nın Sürtünme Katsayısının, Alınan Yol ile Değişimi



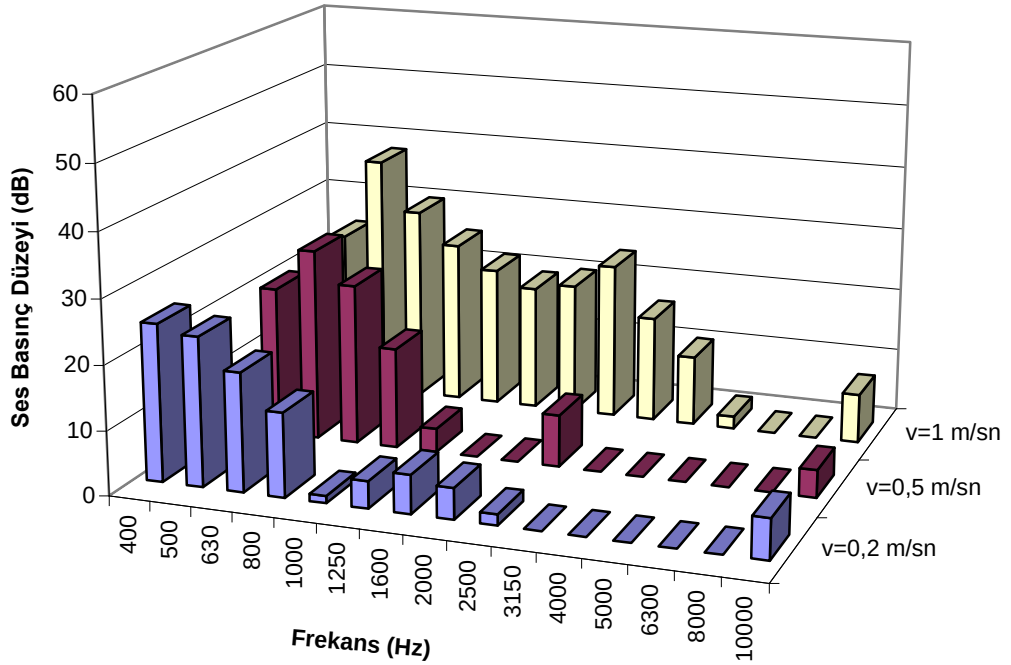
Şekil A.14 : MoS₂ Katkılı Döküm PA 6'nın Başlangıç Anındaki Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



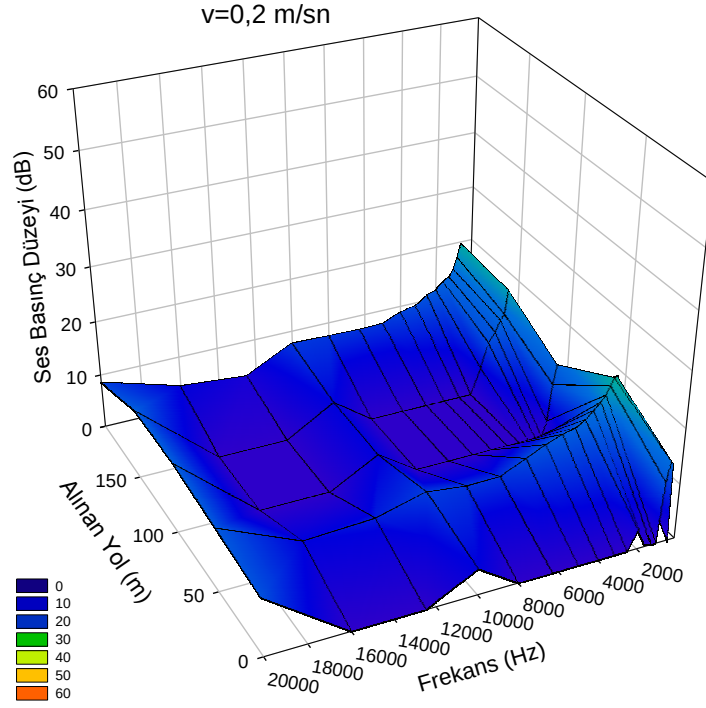
Şekil A.15 : MoS₂ Katkılı Döküm PA 6 için 1/3 Oktav Bandında Merkez Frekanslardaki Ses Basınç Düzeyinin Başlangıç Anında Hızla Değişimi



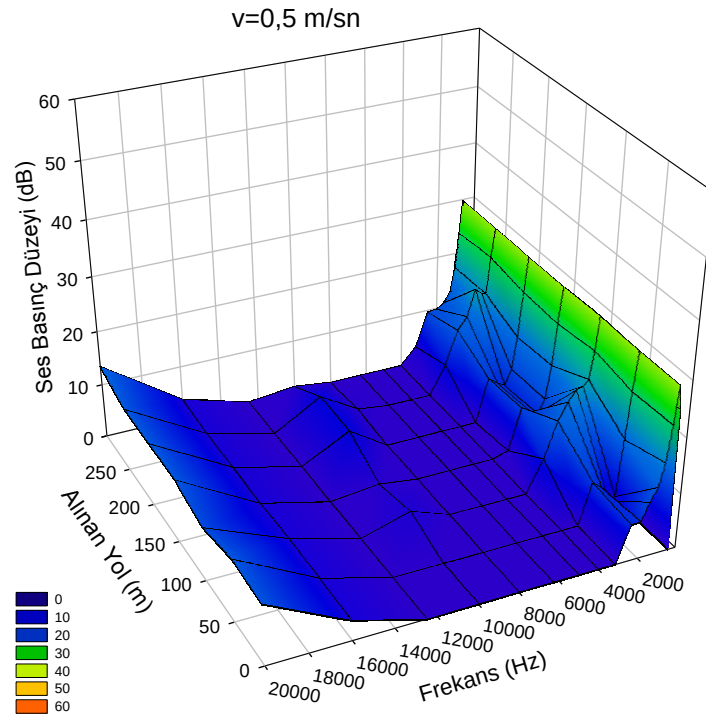
Şekil A.16 : MoS₂ Katkılı Döküm PA 6'nın 200 m'lik Çalışma Sonunda Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



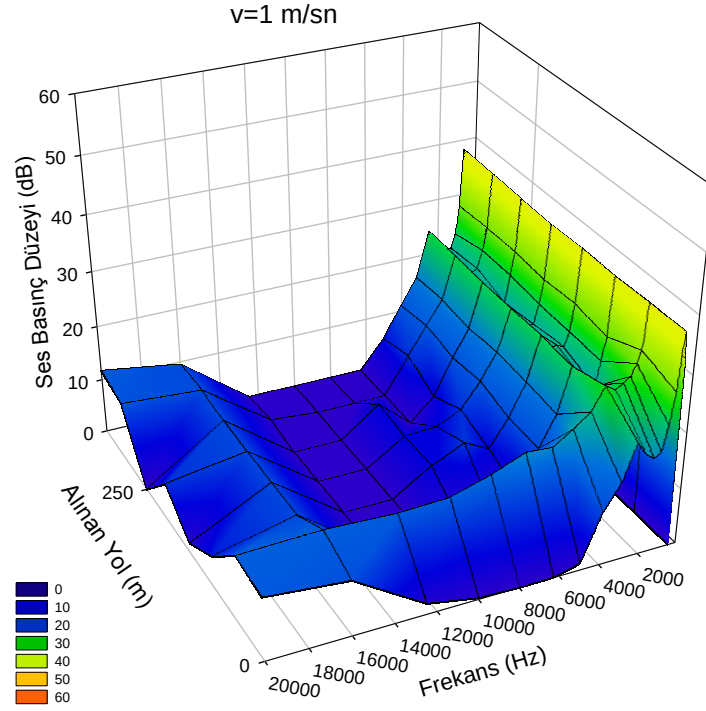
Şekil A.17 : MoS₂ Katkılı Döküm PA 6 için 1/3 Oktav Bandında Merkez Frekanslardaki Ses Basınç Düzeyinin 200 m'lik Çalışma Sonunda Hızla Değişimi



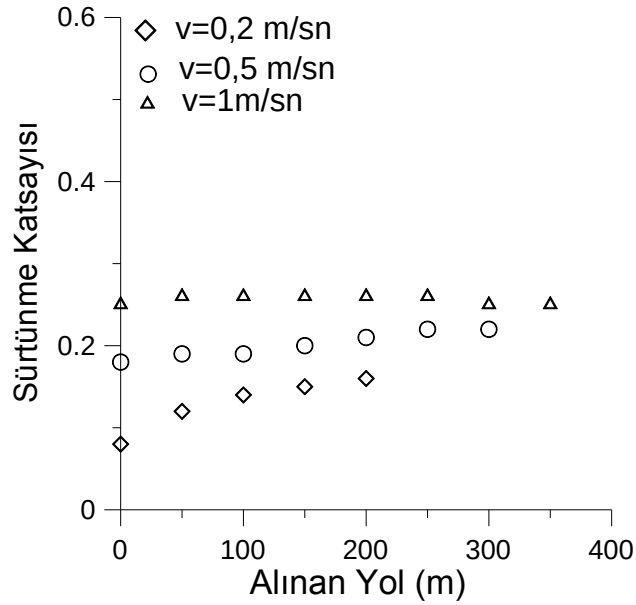
Şekil A.18 : MoS₂ Katkılı PA 66'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



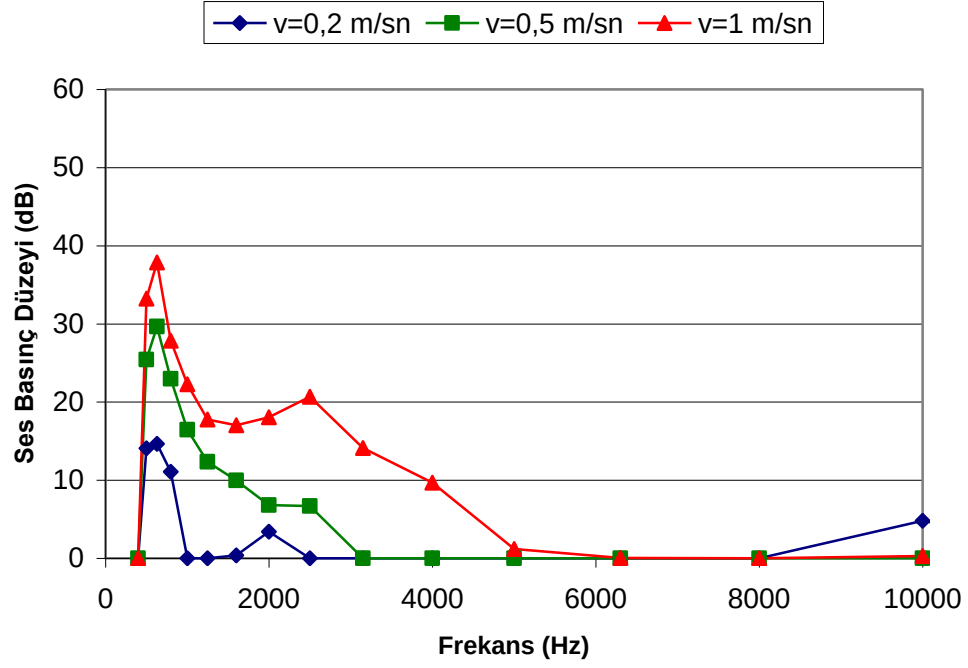
Şekil A.19 : MoS₂ Katkılı PA 66'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



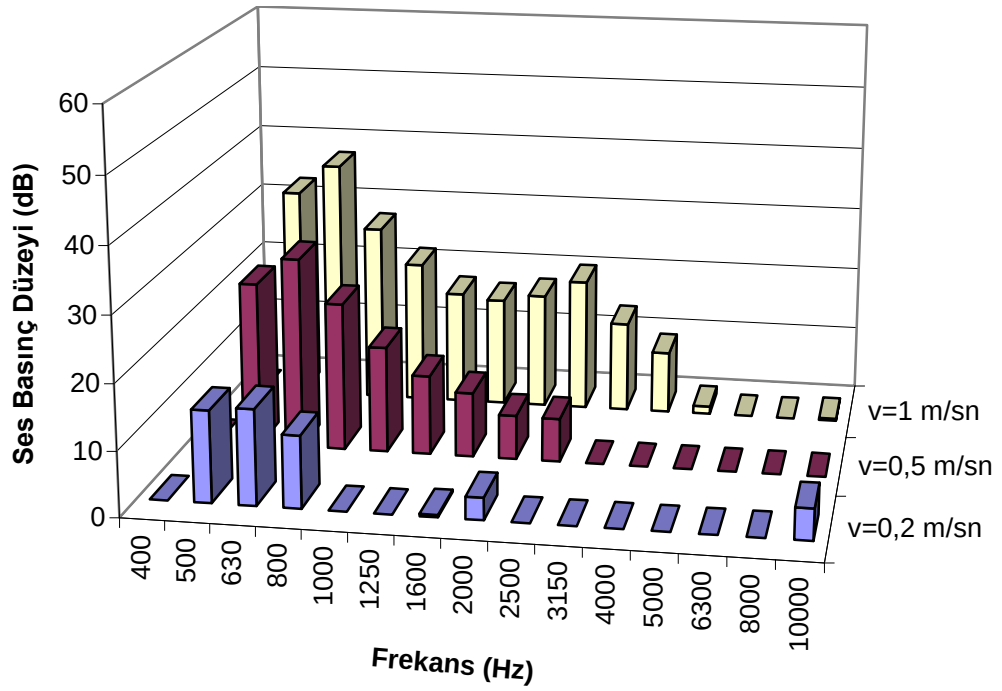
Şekil A.20 : MoS₂ Katkılı PA 66'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



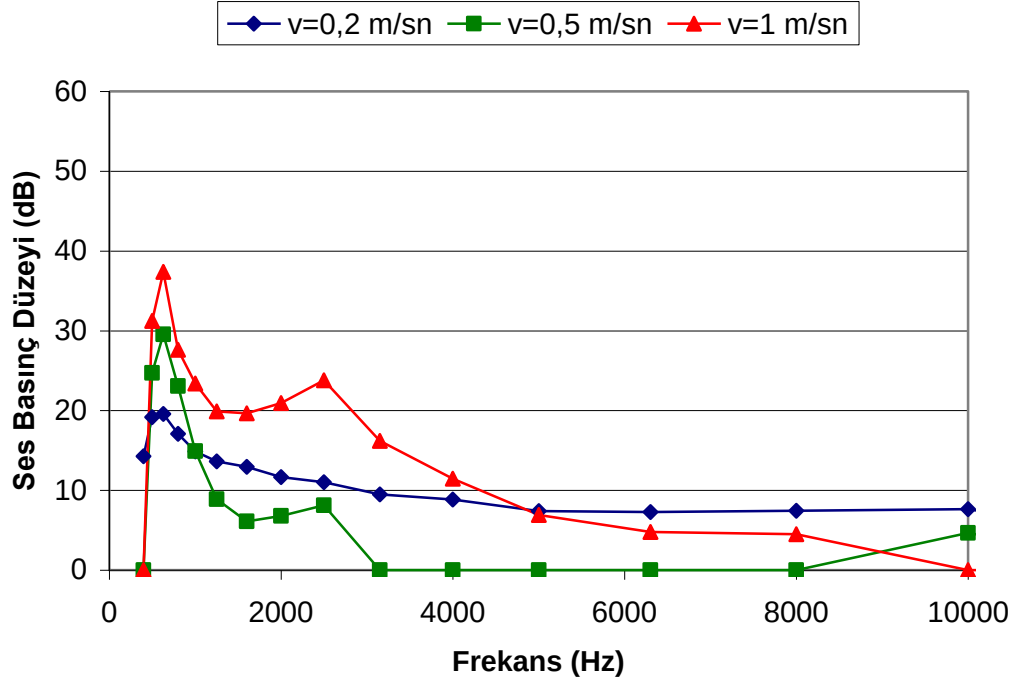
Şekil A.21 : MoS₂ Katkılı PA 66'nın Sürtünme Katsayısının, Alınan Yol ile Değişimi



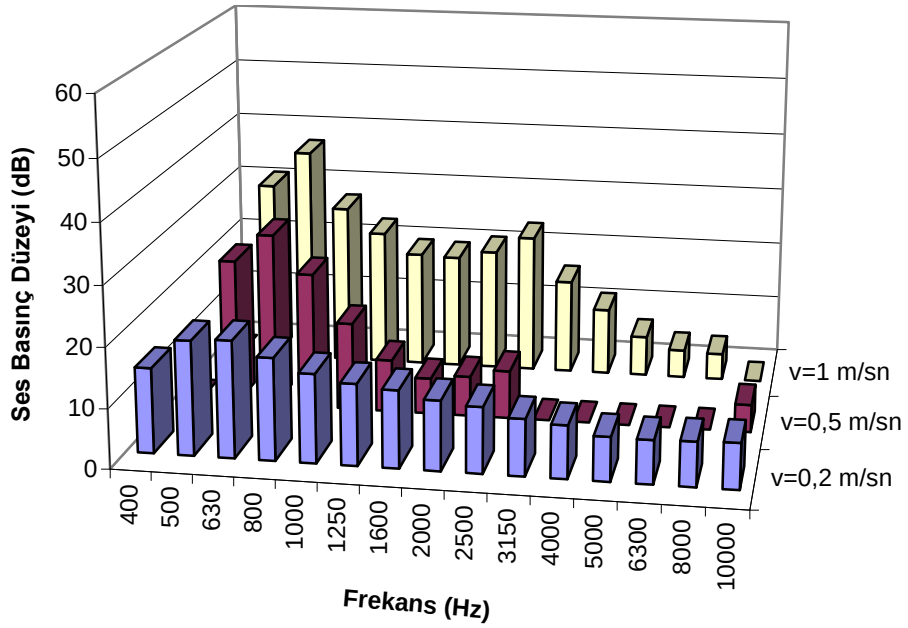
Şekil A.22 : MoS₂ Katkılı PA 66'nın Başlangıç Anındaki Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



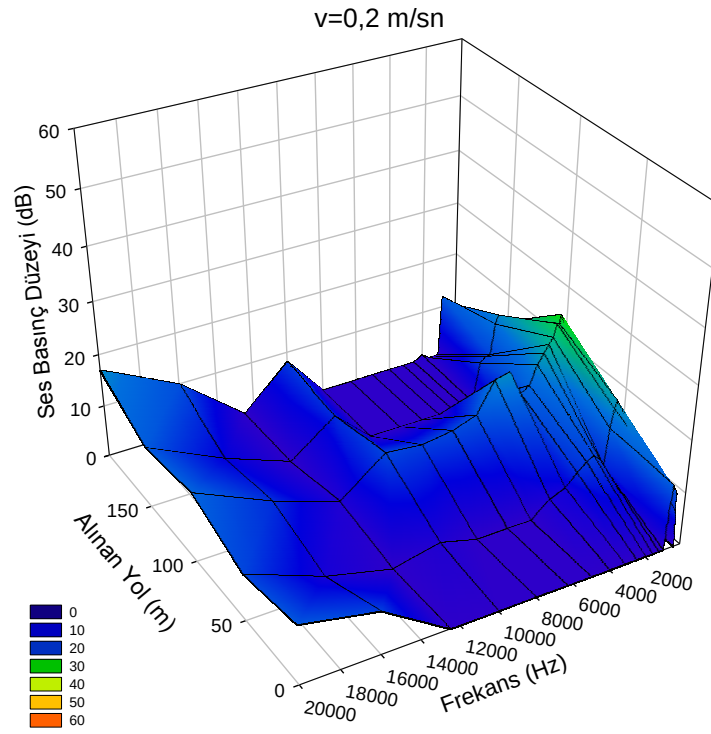
Şekil A.23 : MoS₂ Katkılı PA 66 için 1/3 Oktav Bandında Merkez Frekanslardaki Ses Basınç Düzeyinin Başlangıç Anında Hızla Değişimi



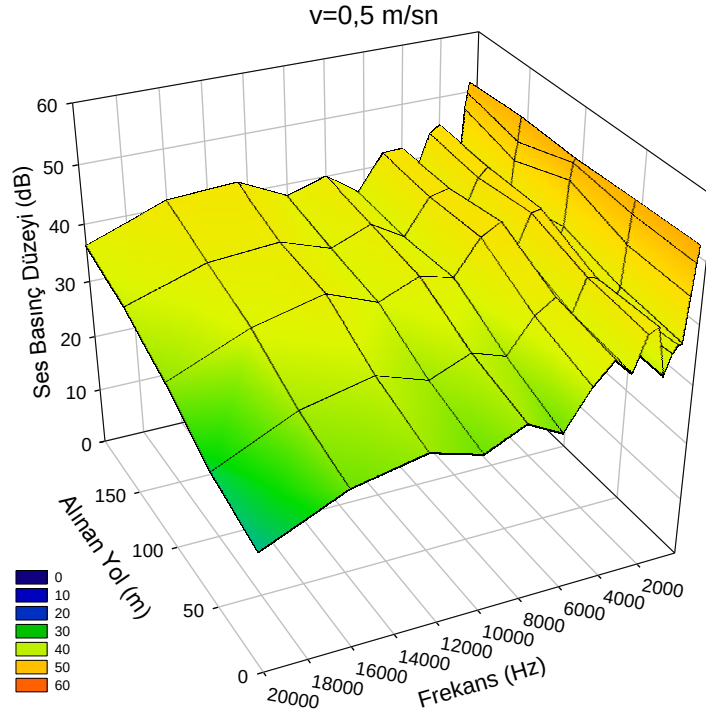
Şekil A.24 : MoS₂ Katkılı PA 66'nın 200 m'lik Çalışma Sonunda Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



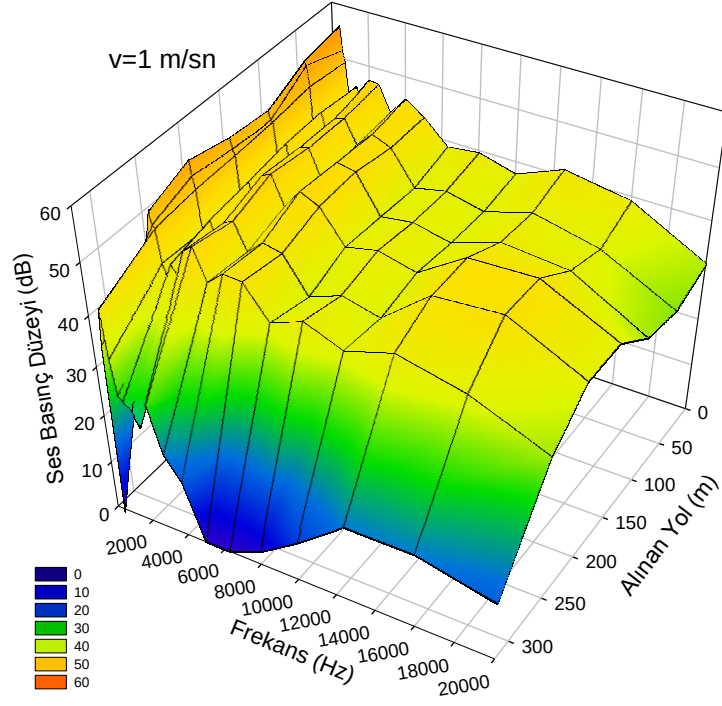
Şekil A.25 : MoS₂ Katkılı PA 66 için 1/3 Oktav Bandında Merkez Frekanslardaki Ses Basınç Düzeyinin 200 m'lik Çalışma Sonunda Hızla Değişimi



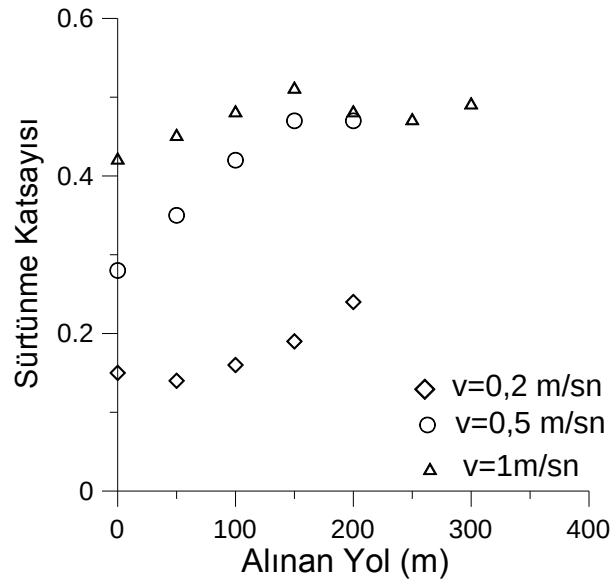
Şekil A.26 : PA 6'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



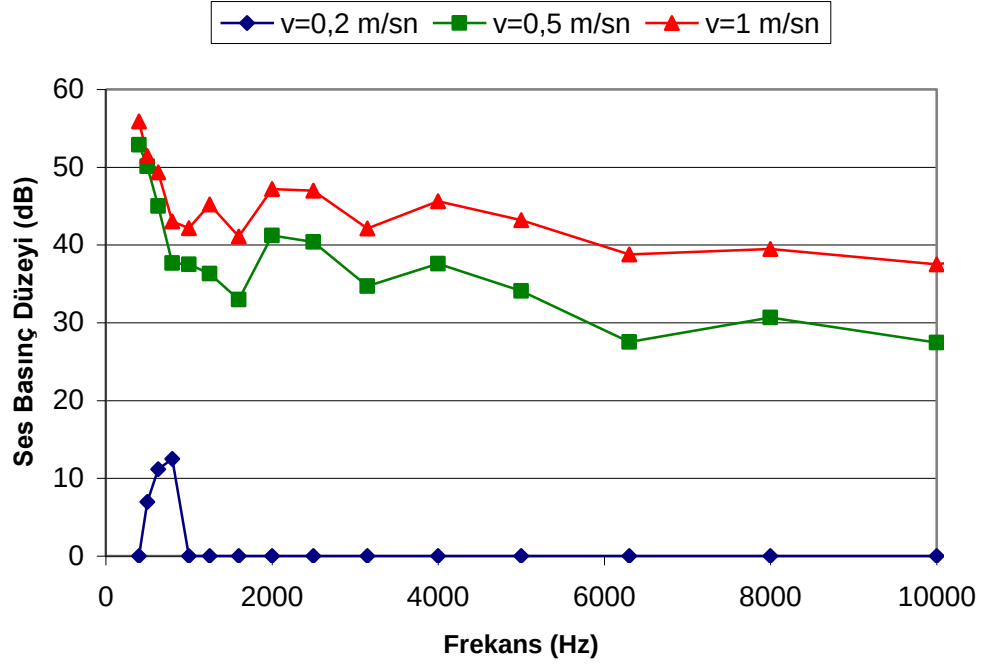
Şekil A.27 : PA 6'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



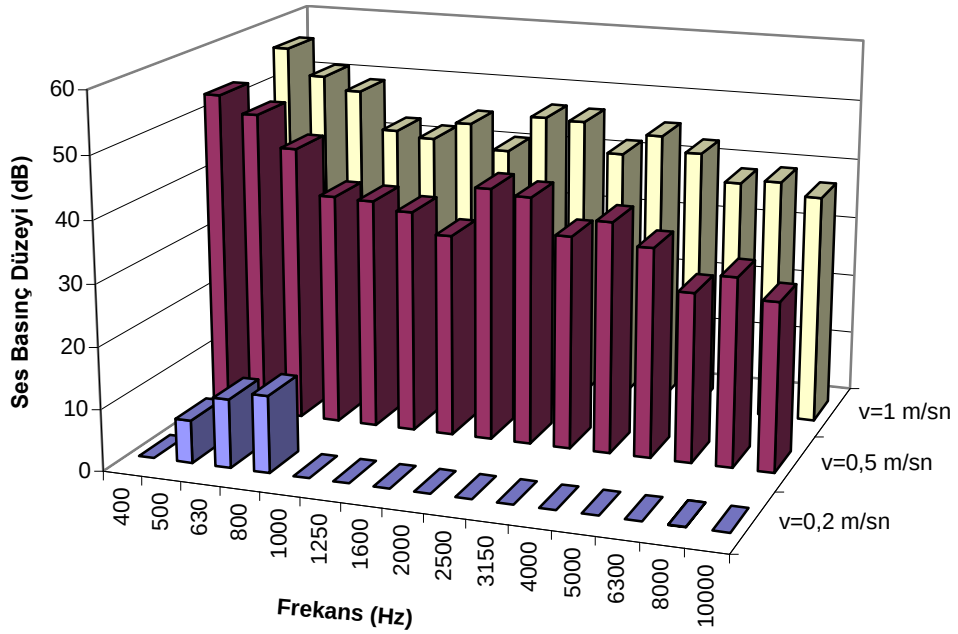
Şekil A.28 : PA 6'nın Ses Basınç Düzeyinin, Alınan Yol ve Frekans ile Değişimi



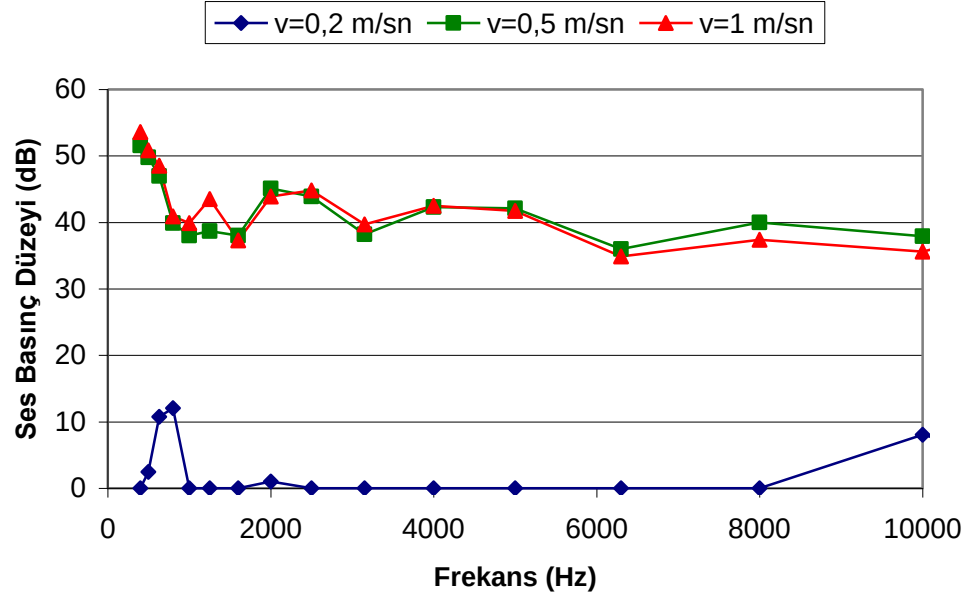
Şekil A.29 : PA 6'nın Sürtünme Katsayısının, Alınan Yol ile Değişimi



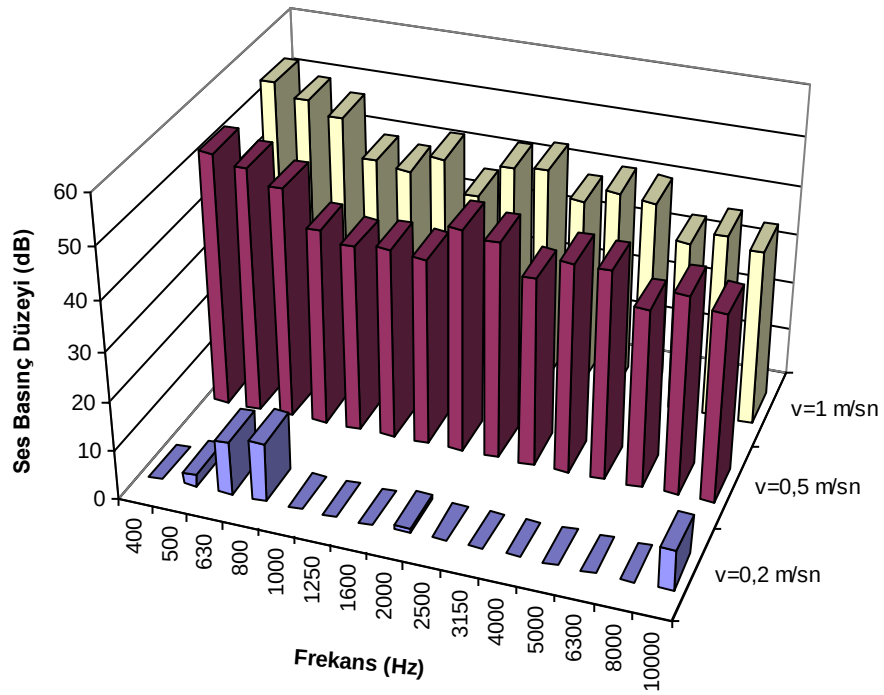
Şekil A.30 : PA 6'nın Başlangıç Anındaki Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



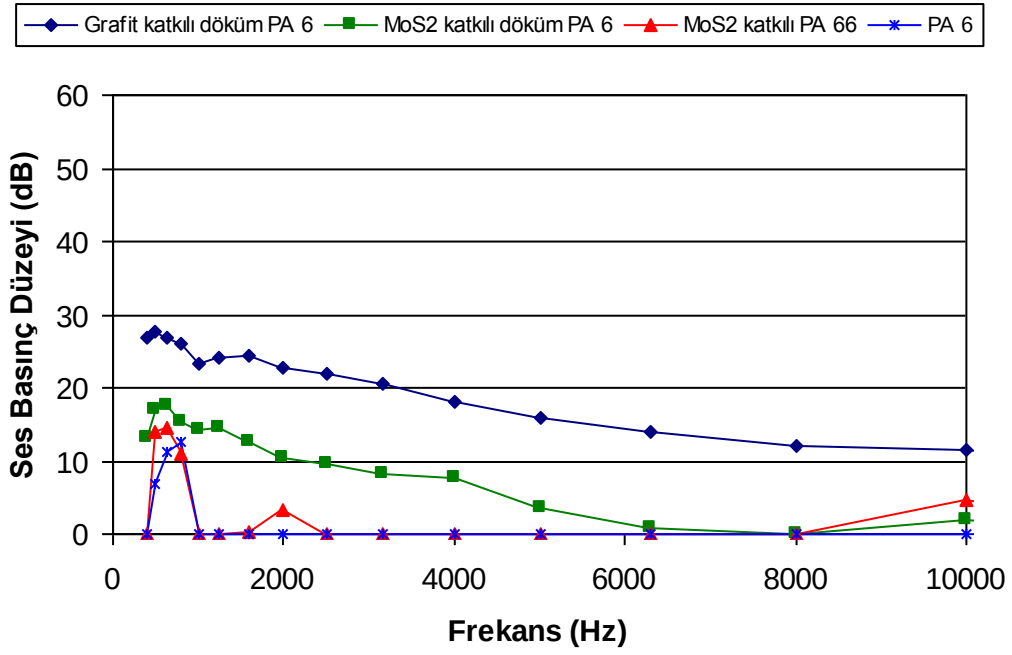
Şekil A.31 : PA 6 için 1/3 Oktav Bandında Merkez Frekanslardaki Ses Basınç Düzeyinin Başlangıç Anında Hızla Değişimi



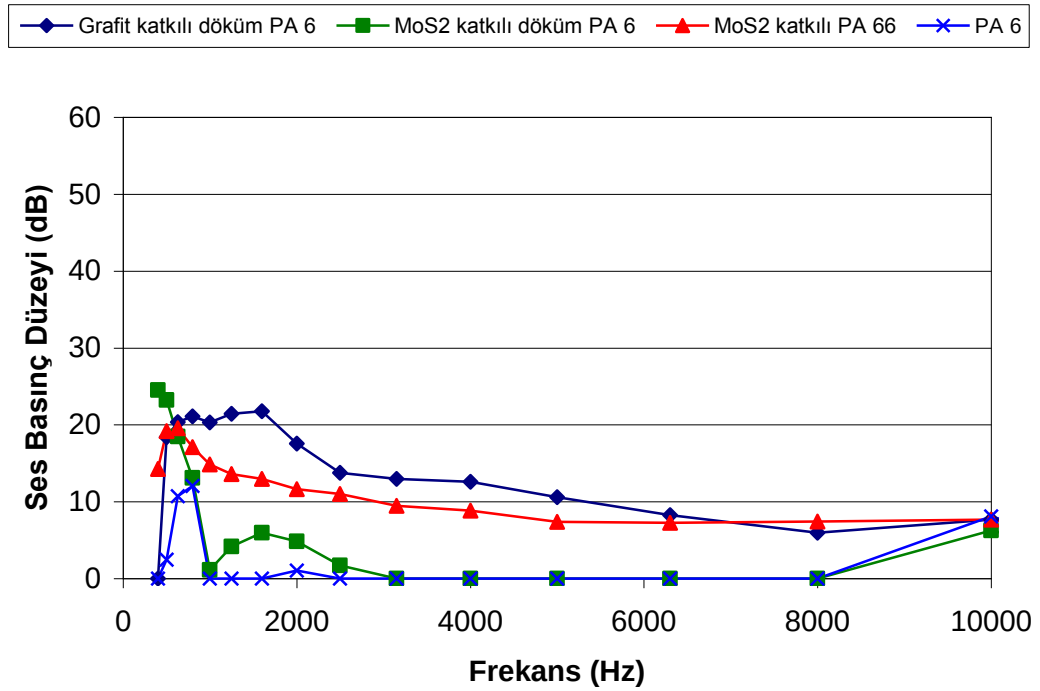
Şekil A.32 : PA 6'nın 200 m'lik Çalışma Sonunda Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



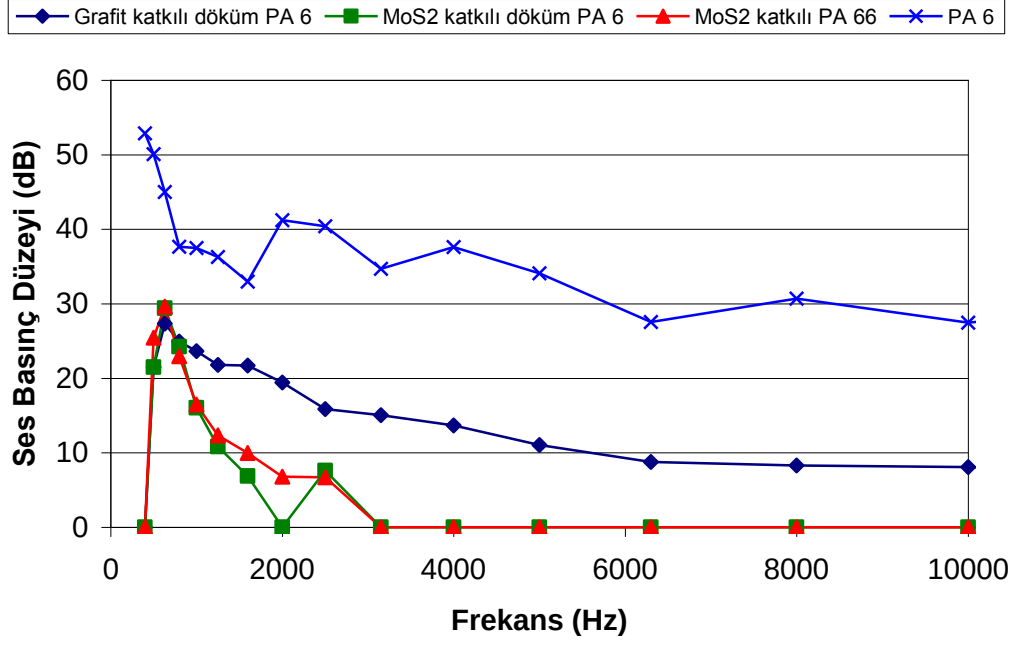
Şekil A.33 : PA 6 için 1/3 Oktav Bandında Merkez Frekanslardaki Ses Basınç Düzeyinin 200 m'lik Çalışma Sonunda Hızla Değişimi



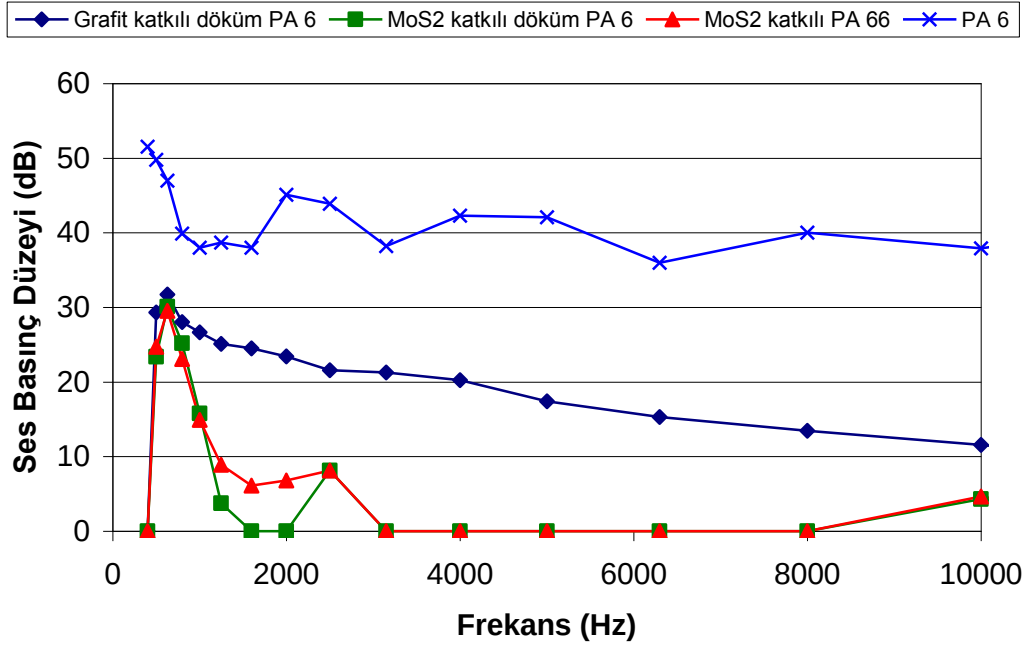
Şekil A.34 : $v=0,2$ m/sn'de Başlangıç Anındaki Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



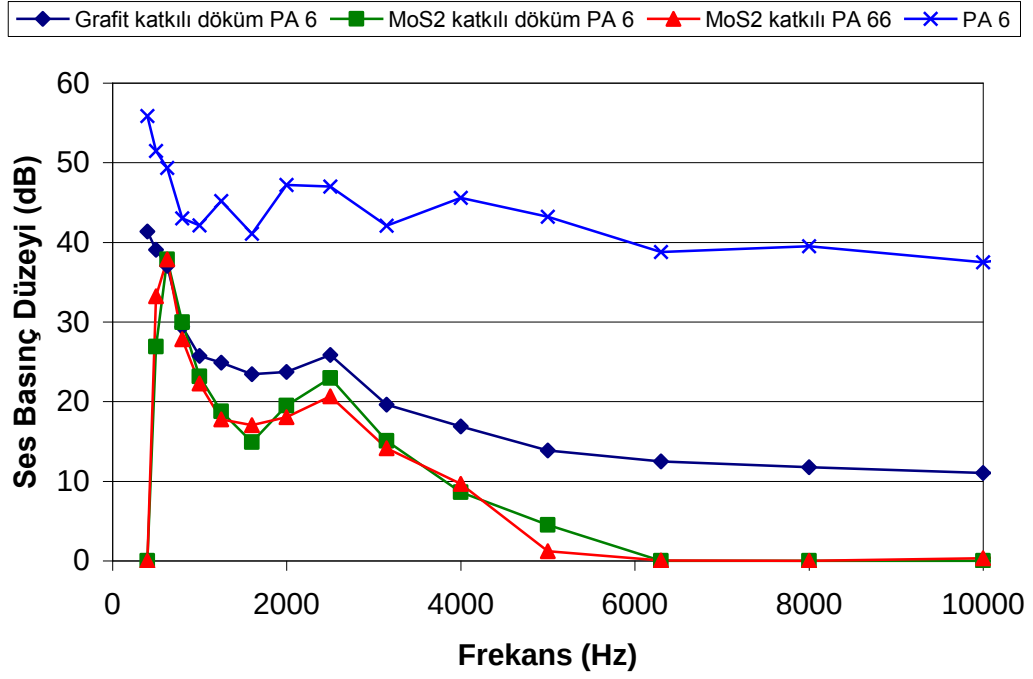
Şekil A.35 : $v=0,2$ m/sn'de 200 m'lik Çalışma Sonunda Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



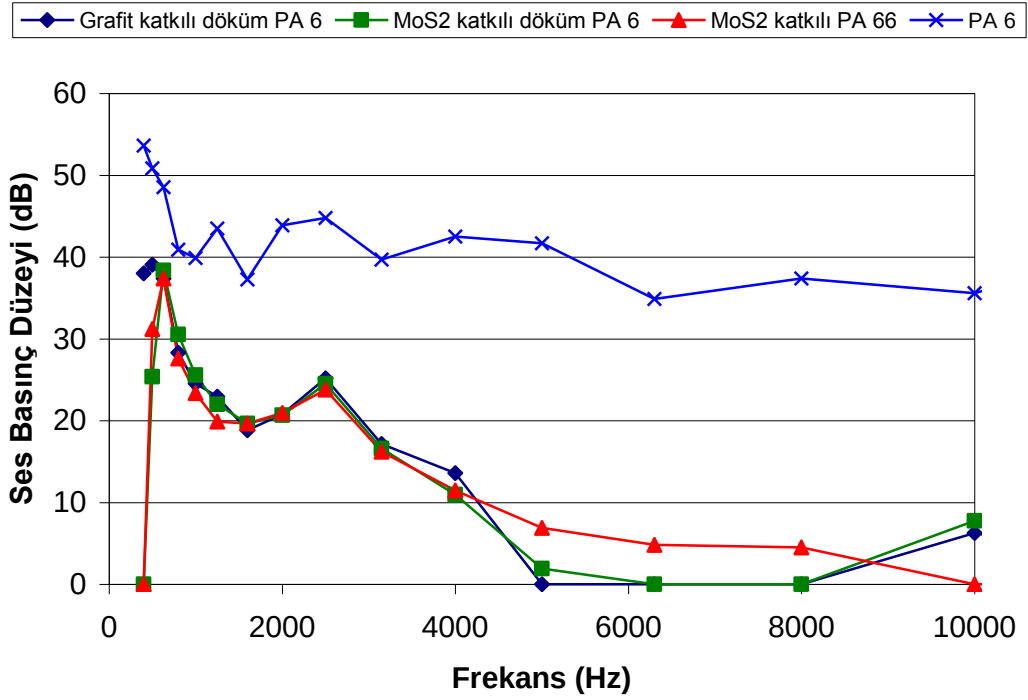
Şekil A.36 : $v=0,5$ m/sn’de Başlangıç Anındaki Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



Şekil A.37 : $v=0,5$ m/sn’de 200 m’lik Çalışma Sonunda Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



Şekil A.38 : $v=1$ m/sn'de Başlangıç Anındaki Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi



Şekil A.39 : $v=1$ m/sn'de 200 m'lik Çalışma Sonunda Ses Basınç Düzeyinin Frekansla Değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Atakan ALTINKAYNAK, 1981 yılında Trabzon'da doğdu. 1992 yılında Emlak Kredi Bankası İlkokulu'nu, 1999 yılında da Vatan Anadolu Lisesi'ni bitirdi. Aynı yıl İTÜ Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'ne girdi ve 2003 yılında ikincilikle mezun oldu. Öğrenimine, aynı yıl girdiği İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programı'nda devam etti.

2004 yılında İTÜ Makina Fakültesi Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başlayan Atakan ALTINKAYNAK halen bu görevini sürdürmekte ve ayrıca Makina Mühendisliği Kalite Güvence Sistemi çalışmalarına yardımcı olmaktadır.