



**AVİYONİK BİR BİRİMİN TİTREŞİM YALITICI TASARIMI VE
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Çağrı KOÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2019

Çağrı KOÇ tarafından hazırlanan “AVİYONİK BİR BİRİMİN TİTREŞİM YALITICI TASARIMI VE DENEYSEL İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Ömer KELEŞ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Sadettin ORHAN

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 21/11/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu dönem projesi çalışmasında;

- Dönem projesi içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - dönem projesi çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu dönem projesinde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Çağrı KOÇ

21/11/2019

AVİYONİK BİR BİRİMİN TİTREŞİM YALITICI TASARIMI VE DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Çağrı KOÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2019

ÖZET

Ataletsel Ölçüm Birimi (AÖB), havacılık ve uzay sanayii uygulamalarında kullanılan kritik bir aviyonik birimdir. Kullanıldığı sistemin tanımlandığı asal koordinat takımına göre konum, hız, ivme ve atalet bilgilerini ölçer ve bunları ilgili sisteme bildirir. Kullanıldığı yerin şartlarına bağlı olarak ısı yükleri, statik yükler, mekanik şok yükleri, akustik vs. birçok çevresel şartlardan etkilenebilirler. Çevresel şartlardan kaynaklı problemlere önlem alınmaz ise bu aviyonik birimler görevlerini doğru şekilde yerine getiremeyebilir hatta hiçbir şekilde işlev görmez hale gelebilirler. Bu yüklerden en önemlilerinden biri de titreşim yükleridir. Titreşim yükleri askeri standartlara göre sınıflandırılmıştır ve askeri uygulamalarda kullanılan ekipmanların bu yüklere karşı görevlerini doğru bir şekilde yerine getirmeleri beklenir. Titreşim yüklerinden korunmanın en etkin yolu bu yüklere maruz kalan birimlerde titreşim yalıtıcılar kullanmaktır. Bunun için birçok ticari firma ve bunların ürettiği birçok titreşim yalıtıcı çeşidi vardır. Fakat bazen gerek geometrik isterler, gerek tedarik sıkıntıları, gerekse çevresel şartlardan dolayı bu ticari ürünlerin kullanımı mümkün olamamaktadır. Bu çalışmada bir aviyonik birim için titreşim yalıtıcı tasarımının nasıl yapıldığı, sonlu elemanlar analizi ve testler ile nasıl belirlenip doğrulandığı anlatılmaktadır.

Bilim Kodu : 91422

Anahtar Kelimeler : Titreşim yalıtımı, Dinamik Mekanik Analiz (DMA), Harmonik cevap analizi, modal testler

Sayfa Adedi : 87

Danışman : Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF VIBRATION ISOLATOR OF
AN AVIONIC UNIT

(M. Sc. Thesis)

Çağrı KOÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2019

ABSTRACT

Inertial Measurement Unit (IMU) is a critical avionic unit which is used for aerospace industry application. It measures location, velocity, acceleration and inertial information according to a system that IMU used and transmits them to the related system. IMU can be affected from environmental conditions which are thermal loads, static loads, mechanical shock loads, acoustic, etc. If the precautions are not taken for these environmental conditions, IMU cannot work correctly or do not work anymore. Vibration loads are one of the most important environmental condition, too. Vibration loads are classified according to military standards and it is expected that the equipment used for military applications must work successfully under these loads. The most efficient way in order to protect the units that are exposed vibration loads is using vibration isolator. There are many companies and their many commercial vibration isolator types. However, because of geometric constraints or purchasing problem or environmental conditions, it is impossible to use these commercial vibration isolators. In this thesis, how a vibration isolator can be designed for an inertial measurement unit and how it can be determined and validated with finite element analysis and modal tests are explained.

Science Code : 91422

Key Words : Vibration isolation, Dynamic Mechanical Analysis (DMA), Harmonic response analysis, modal tests

Page Number : 87

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Tuncay KARAÇAY

TEŞEKKÜR

Başta çalışmalarına temel oluşturan aviyonik birim projesinde bana araştırma, yazılım, test imkanları ve alt yapı olanaklarını sonuna kadar sunan ve çalışmaktan her gün gurur duyduğum güzide kurumum TÜBİTAK SAGE ve aviyonik birim proje yürütücüsü Sn. Mehdi DUMAN'a teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Yine en büyük teşekkürlerden birini çalışmalarımın her aşamasında büyük bir sabır ve motivasyon ile beni yönlendiren, bilgi ve tecrübeleri ile bana rehberlik eden danışman hocam Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY'a ve Gazi Üniversitesi'ne sunarım.

Tasarım ve sayısal modelleme aşamasında vermiş oldukları fikirleri ve tecrübeleri ile Sn. Suat Ege YILDIZOĞLU ve Sn. Muhammed Yusuf ÜNGÖR'e çok büyük teşekkürlerimi sunarım.

Test aşamasındaki destekleri ve yardımlarından dolayı Sn. Ali Murat GÜLTEKİN, Sn. Ufuk TOSUN ve Sn. Setenay ÜNCE'ye teşekkürlerimi sunarım.

Üretim aşamasında özverili çalışmaları ve çözüm odaklı yaklaşımları ile KENTPAR firması ve onun değerli çalışanları Sn. Yüksel ÇETİNKAYA ve Sn. Ömer Faruk ÜNAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak çalışmamın her aşamasında bana manevi olarak destek ve itici güç olan sevgili eşim Tuğçe KOÇ'a teşekkür ve sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. VİSKOELATİK MALZEME KAREKTERİZASYONU.....	13
3.1. Viskoelastik Malzeme Davranışı	13
3.2. Dinamik Mekanik Analiz (DMA).....	18
4. MEKANİK TASARIM.....	27
4.1. Mekanik Tasarım Kriterleri ve Kısıtları.....	27
4.2. Titreşim Yalıtıcı Mekanik Tasarımı	29
5. SAYISAL MODELLEME.....	33
6. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	37
6.1. Serbest-Serbest Sınır Koşulu ile Sinüs Tarama Testleri	40
6.2. Sabit-Serbest Sınır Koşulu ile Sinüs Tarama Testleri.....	42
7. BULGULAR, YORUMLAR VE TARTIŞMA	47
7.1. Analiz Bulguları	47
7.2. Test Bulguları.....	61
7.2.1. Serbest-serbest sınır koşulu ile yapılmış olan test bulguları	62

Sayfa

7.2.2. Sabit-serbest sınır koşulu ile yapılmış olan test bulguları.....	72
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Aviyonik birimin mekanik özellikleri	27
Çizelge 4.2. Aviyonik birimin ilk 5 doğal frekansı	28
Çizelge 5.1. Analizde kullanılan alüminyum malzeme mekanik özellikleri	34
Çizelge 5.2. Msc.Marc viskoelastik malzeme kartları	34
Çizelge 5.3. Doğrusal olmayan malzeme tanımında kullanılan elastik özellikler	35
Çizelge 6.1. Tasarlanan fikstürün ilk altı doğal frekansı	39
Çizelge 7.1. 20° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A malzeme kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	48
Çizelge 7.2. 20° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	49
Çizelge 7.3. 20° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	50
Çizelge 7.4. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	52
Çizelge 7.5. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	53
Çizelge 7.6. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	55
Çizelge 7.7. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	56
Çizelge 7.8. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	58
Çizelge 7.9. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	59
Çizelge 7.10. 20°C’de Z, X ve Y yönleri için yapılmış olan analiz sonuçları	61
Çizelge 7.11. 50 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemedenden yapılmış yalıtıcının test sonuçları	63
Çizelge 7.12. 60 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemedenden yapılmış yalıtıcının test sonuçları	64

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.13. 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcının test sonuçları	65
Çizelge 7.14. 70 Sh A elastomer ve 20° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının test sonuçları	67
Çizelge 7.15. 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının test sonuçları	68
Çizelge 7.16. 70 Sh A elastomer ve 40° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının test sonuçları	70
Çizelge 7.17. Nihai titreşim yalıtıcının test sonuçları	71
Çizelge 7.18. Profil 1 ve Profil 2 titreşim profilleri ile yapılmış olan test sonuçları	73
Çizelge 7.19. Nihai yalıtıcı ile Profil 1 ve Profil 2 titreşim profilleri ile Z yönü için yapılmış olan test sonuçları	74
Çizelge 7.20. Nihai yalıtıcı ile Profil 1 ve Profil 2 titreşim profilleri ile X yönü için yapılmış olan test sonuçları	75
Çizelge 7.21. Nihai yalıtıcı ile Profil 1 ve Profil 2 titreşim profilleri ile X yönü için yapılmış olan test sonuçları	76
Çizelge 7.22. Z eksenini için analiz ve test sonuçları	77
Çizelge 7.23. X eksenini için analiz ve test sonuçları	79
Çizelge 7.24. Y eksenini için analiz ve test sonuçları	80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Titreşim Yalıtıcı iş akış şeması.....	2
Şekil 2.1. Örnek kurlenme eğrisi	6
Şekil 2.2. Konik titreşim yalıtıcı kesit görseli	8
Şekil 2.3. Elastomer titreşim yalıtıcıların karakterini etkileyen faktörler	9
Şekil 2.4. Sönüm artışı ile iletim oranının azalması	10
Şekil 3.1. Elastomer malzemelerin kompleks modülü davranışı üzerinde frekansın etkisi	14
Şekil 3.2. Elastomer malzemelerin kompleks modülü davranışı üzerinde sıcaklığın etkisi	15
Şekil 3.3. Elastomerlerin çalışabildiği aktif sıcaklık aralıkları.....	17
Şekil 3.4. Elastomer malzemelerin sıcaklığa kayıp faktörü değişimi.....	18
Şekil 3.5. DMA cihazının şematik gösterimi.....	19
Şekil 3.6. DMA’da elde edilen gerilim-gerinim eğrisi	20
Şekil 3.7. DMA yükleme şekilleri	20
Şekil 3.8. Silikon 50 Sh A’nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı depolama modülü grafiği	21
Şekil 3.9. Silikon 50 Sh A’nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı kayıp modülü grafiği	22
Şekil 3.10. Silikon 60 Sh A’nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı depolama modülü grafiği	23
Şekil 3.11. Silikon 60 Sh A’nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı kayıp modülü grafiği	24
Şekil 3.12. Silikon 70 Sh A’nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı depolama modülü grafiği	25
Şekil 3.13. Silikon 70 Sh A’nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı kayıp modülü grafiği	26
Şekil 4.1. Ataltsel ölçüm biriminin 3B geometrisi	27
Şekil 4.2. Ralyal yöndeki geometrik kısıtlar	28

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Eksenel yöndeki geometrik kısıtlar	29
Şekil 4.4. Aviyonik birimin merkezinden geçen eksene göre 20° mekanik ara yüze sahip tasarım.....	30
Şekil 4.5. Aviyonik birimin merkezinden geçen eksene göre 30° mekanik ara yüze sahip tasarım.....	30
Şekil 4.6. Aviyonik birimin merkezinden geçen eksene göre 40° mekanik ara yüze sahip tasarım.....	31
Şekil 4.7. Titreşim yalıtıcıların aviyonik birim üzerindeki yerleşimi.....	31
Şekil 5.1. Msc. Patran yazılımı kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar ağı	33
Şekil 6.1. Testlerde kullanılan fikstür.....	37
Şekil 6.2. Fikstürün birinci mod şekli.....	38
Şekil 6.3. Fikstürün ikinci mod şekli	38
Şekil 6.4. Fikstürün üçüncü mod şekli.....	39
Şekil 6.5. Testlerde kullanılan X, Y ve Z yönü Profil 1 titreşim yükleri.....	45
Şekil 6.6. Testlerde kullanılan X, Y ve Z yönü Profil 2 titreşim yükleri.....	46
Şekil 7.1. 20° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	47
Şekil 7.2. 20° mekanik ara yüz ve silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	48
Şekil 7.3. 20° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	50
Şekil 7.4. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	51
Şekil 7.5. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	53
Şekil 7.6. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	54
Şekil 7.7. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	56
Şekil 7.8. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	57

Şekil	Sayfa
Şekil 7.9. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları	59
Şekil 7.10. Z, X ve Y yönleri için yapılmış olan analiz sonuçları	60
Şekil 7.11. Silikon 50 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler	62
Şekil 7.12. Silikon 60 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler	63
Şekil 7.13. Silikon 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler	65
Şekil 7.14. Silikon 70 Sh A elastomer ve 20° geometriye sahip Al6061 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler	67
Şekil 7.15. Silikon 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip Al6061 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler	68
Şekil 7.16. Silikon 70 Sh A elastomer ve 40° geometriye sahip Al6061 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler	69
Şekil 7.17. Farklı genlikte yüklemeler için Silikon 70 Sh A malzeme ve Al6061 malzemenin vulkanizasyonu ile üretilen 30 derece yalıtıcılarla test	71
Şekil 7.18. Profil 1 ve Profil 2 yükleri ile Z yönünde yapılan test sonuçları.....	73
Şekil 7.19. Profil 1 ve Profil 2 yükleri ile Z yönünde yapılan test sonuçları.....	74
Şekil 7.20. Profil 1 ve Profil 2 yükleri ile X yönünde yapılan test sonuçları	75
Şekil 7.21. Profil 1 ve Profil 2 yükleri ile Y yönünde yapılan test sonuçları	76
Şekil 7.22. Oda sıcaklığında (20°C ‘de) Z ekseninde yapılmış olan analiz ve test sonuçları	77
Şekil 7.23. Oda sıcaklığında (20°C ‘de) X ekseninde yapılmış olan analiz ve test sonuçları	78
Şekil 7.24. Oda sıcaklığında (20°C ‘de) Y ekseninde yapılmış olan analiz ve test sonuçları	79

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Serbest-Serbest sınır koşulu ile sinüs tarama testi düzeneği	40
Resim 6.2. Serbest-Serbest sınır koşulu ile yapılan testlerde referans alınan eksen takımı ve ilgili tanımlamalar	42
Resim 6.3. Z eksen yönünde sabit serbest sınır koşulu ile gerçekleştirilen test bütünü	43
Resim 6.4. X ve Y eksenlerinde sabit serbest sınır koşulu ile gerçekleştirilen test bütünü	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

$\tilde{E}^*$	Kompleks modül
$E'(w)$	Depolama modülü
E''	Kayıp modülü
σ_0	Gerilme genliği
ε_0	Gerinim genliği
g	Yerçekimi
Hz	Hertz
I_x	X eksenindeki kütle atalet momenti
I_y	Y eksenindeki kütle atalet momenti
I_z	Z eksenindeki kütle atalet momenti
kg	Kilogram
mm	Milimetre
mm²	Milimetrekare
mm³	Milimetreküp
MPa	Megapaskal
$\eta(w)$	Kayıp faktörü
s^2	Saniyekare
w	Frekans, rad/s
$\varepsilon(t)$	Gerinim
$\sigma(t)$	Gerilme

Kısaltmalar

Açıklamalar

3B	Üç boyutlu
AÖB	Ataletsel ölçüm birimi
DMA	Dinamik Mekanik analiz
IMU	Inertial Measurement Unit

Kısaltmalar**Açıklamalar****Shore****Sh**

1. GİRİŞ

Titreşimin etkin olduğu bir yapının titreşim yalıtımı yapılmadığı takdirde mekanik, elektriksel, optik vb. açılardan, o yapının zarar görme ihtimali her zaman mümkündür. Titreşim yalıtımı problemi için birçok seçenek bulunur. Sönüm yayları, elastomer takoz ve endüstriyel titreşim yalıtıcılar bu seçeneklerden sıklıkla kullanılanlardır. Elastomer malzemeler; malzeme davranışı sıcaklık, yükleme frekansı, yükleme genliği, sahip olduğu kimyasal içerik ve katkı maddelerine göre değişen, doğrusal olmayan bir malzeme çeşididir. Bu malzemelerin mekanik ve dinamik özellikleri, yükleme koşulları ve şeklinden etkilendiği gibi, üzerine uygulanan sınır koşulları da yalıtım performansına etki etmektedir.

Tezin amacı TÜBİTAK SAGE’de geliştirilmiş olan bir aviyonik kutu için titreşim yalıtıcı tasarımı yapmaktır. Bu yalıtım problemine yönelik ticari çözümler olmakla birlikte gerek geometrik kısıtlar, gerekse süreç içerisinde dış alım yapılarak kullanılan titreşim yalıtıcıların tedariki zorluklar oluşturmaktadır. Bu kapsamda hem aviyonik kutunun titreşim yalıtımı problemi çözülecek, hem de özgün titreşim yalıtıcılarının tasarlanıp kullanma kabiliyeti kazanılmış olacaktır.

Tez çalışmaları için Şekil 1.1’de gösterilen iş akış şeması takip edilmiştir.

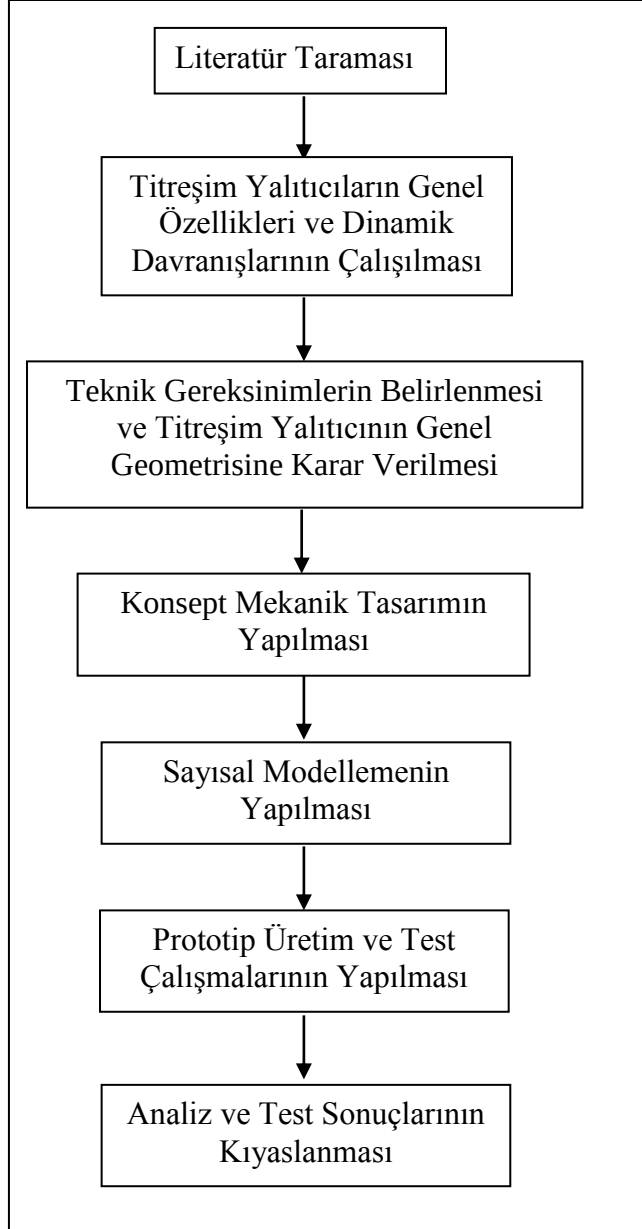
Bu akış şemasına göre çalışma literatür araştırması ile başlamıştır. Burada titreşim yalıtımı ile alakalı temel kavramlar, yapılan araştırma ve çalışmalar sonucunda öğrenilmiştir. Daha önce bu konu hakkında yapılmış olan çalışmalar incelenerek yapılan çalışmanın bu çalışmalar içerisinde bulunduğu yer belirlenmiştir.

Daha sonra piyasa da standart ürün olarak kullanılan titreşim yalıtıcılar araştırılmıştır. Bunların kullanım şartları, genel ve dinamik özellikleri öğrenilerek bizim uygulamamıza uygun olabilecek malzeme ve yalıtıcı kesit geometrisi ortaya konulmuştur.

Geometrik kısıtlar ve olması öngörülen yalıtıcı kesit geometrisi göz önüne alınarak titreşim yalıtıcının ön tasarımı yapılmıştır. Belirlenen malzemelerin dinamik özellikleri yapılacak olan DMA testleri ile belirlenmiştir. Yapılan tasarımların parametrik sonlu elemanlar modeli hazırlanarak harmonik cevap analizleri yapılmıştır. Yapılan analiz çalışmalar sonucunda titreşim yalıtıcının detaylı tasarımı yapılmıştır.

Daha sonra detaylı tasarımı yapılmış olan titreşim yalıtıcının ilk prototip üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretimi yapılan titreşim yalıtıcıların performans testleri gerçekleştirilerek analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Tezde yapılacak çalışmalar sekiz ana başlıkta ele alınmıştır. Bu başlıklar; “Giriş”, “Önceki Çalışmalar”, “Viskoelastik Malzeme Karakterizasyonu”, “Mekanik Tasarım”,



Şekil 1.1. Titreşim Yalıtıcı iş akış şeması

“Sayısal Modelleme”, “Deneysel Çalışmalar”, “Bulgular, Yorumlar Ve Tartışma” ve “Sonuç Ve Öneriler” dir. Giriş bölümünde genel itibariyle titreşim yalıtımı ve çözüm

yöntemlerinden bahsedilip çalışmanın yol haritası anlatılmıştır. Önceki çalışmalar başlığı altında daha önce bu konu hakkında yapılmış olan çalışmalar ve çalışmaların elde edilen sonuçları incelenmiştir. Viskoelastik malzeme karakterizasyonu bölümünde viskoelastik malzemeler konusunda bilgi verilerek elastomer bir malzemenin DMA analizlerinin yapılışı anlatılmıştır. Tez kapsamında yapılmış olan DMA testleri de yine bu bölümde anlatılmıştır. Mekanik tasarım kısmında titreşim yalıtıcının mekanik tasarım kriterleri ve kısıtları açıklanarak yapılmış olan mekanik tasarım çalışmaları anlatılacaktır. Sayısal modelleme bölümünde belirlenen malzemeler ve mekanik tasarım seçenekleri kullanılarak sonlu elemanlar analiz modelleri hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar bölümünde yapılmış olan modal testler açıklanmıştır. Bulgular, yorumlar ve tartışma bölümünde yapılan analiz ve test çalışmalarının sonuçları açıklanmıştır. Yapılan farklı denemeler ve birbirlerine göre olan kıyaslamaları ortaya konulmuştur. Sonuç ve öneriler kısmında ise elde edilen sonuçlar yorumlanıp varsa eksik kısımlar ortaya konulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

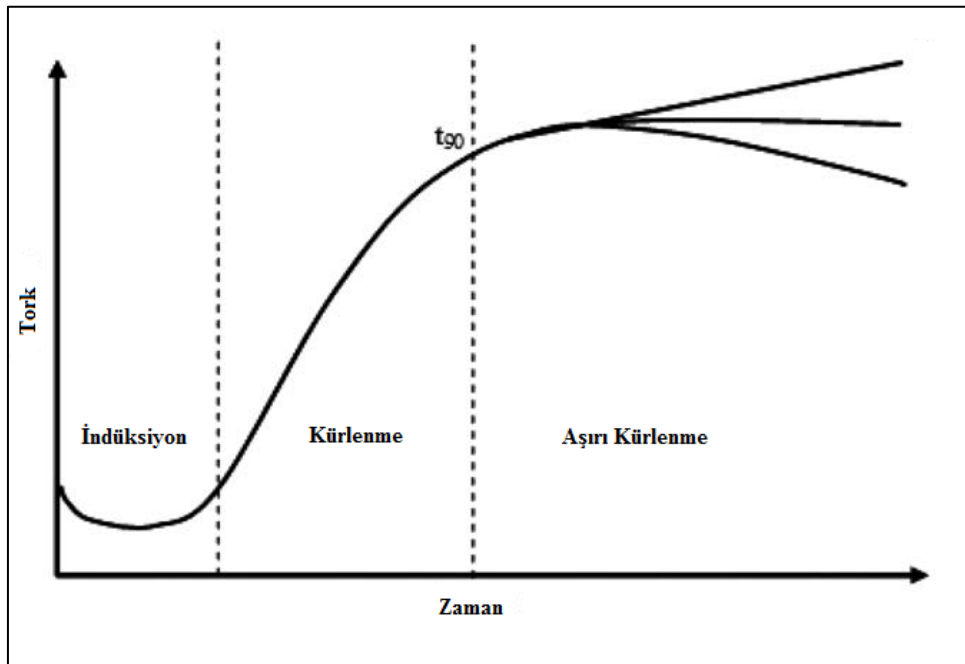
Titreşim yalıtıcılar 2 durumda kullanılır. Birincisi; makine ve ekipmanlar içindeki parçaların dönel hareketinden dolayı etrafındaki parçalara etki eden titreşimin iletimini azaltmaktır. İkincisi ise destek zemin parçalarından iletilen titreşim etkilerinden makine ve ekipmanı korumaktır. Seçilen veya tasarlanan titreşim yalıtıcıların aşağıdaki 3 şartı sağlaması beklenir:

- Sürünme olayı ve başarısızlık olmadan, yalıtılan yapının ölü kütlelerini desteklenmesi
- Zemin yapıdan makineyi veya makineden zemin yapıları titreşim iletiminden korumak için yeterli olan katılığa sahip olması
- Uygun sönüm performansına sahip olması [1]

Elastomer malzemeler; doğal kauçuklara benzer mekanik özelliklere sahip olan polimer malzemelerdir. Çeşitli şekillerde üretimi, düşükten yükseğe farklı katılık değerlerine sahip olması, metallere daha fazla sönüm davranışına sahip olması, minimum kütle ve hakim gerekliliklerini karşılaması, metaller ile etkili bir şekilde bağlanabilmesi elastomerlerin yaygın bir şekilde titreşim yalıtıcılarda kullanılması için önemli özelliklerdir. Elastomerler yüksek deformasyonlara engel olabilir ve kalıcı deformasyona uğramadan eski hallerine geri dönebilirler. Ayrıca birçok yükleme türü ile kullanılabilir. Bunlar; basma, kesme, çekme veya eğilme, veya bunların kombinasyonu olabilir [2].

Elastomer malzemelerin mekanik özellikleri, içeriğine katılan farklı dolgu malzemeleri ile geliştirilebilmektedir. Örneğin bu dolgu malzemeleri ile sertlik değerleri artırılabilir veya yine bazı organik veya inorganik eklemeler ile malzemenin sönüm özelliği artırılabilir veya azaltılabilir. Buna paralel olarak malzemenin statik ve dinamik dayanım, ısıl kararlılık gibi özellikleri de bu eklentilerden pozitif veya negatif olarak etkilenebilir [3]. Elastomerlerin sertlik özellikleri malzeme üzerinde çentik oluşumuna karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır ve ASTM test prosedürlerine göre ‘Shore A’ veya ‘Shore D’ olarak ifade edilir. Durometre denilen ölçme cihazları ile ölçülür [3,4]. Dolgu maddelerinin yanı sıra fiziksel yaşlandırma da elastomerlerin zamana bağlı özelliklerini ciddi şekilde etkilemektedir [5, 6]. Yani elastomer malzemelerin çok uzun süreli kullanımı mekanik özelliklerini zayıflatır. Buda kullanım ömrünün ve güvenilirliğini doğrudan etkiler [6,7]. Elastomerlerin mekanik özelliklerini etkileyen en büyük parametrelerden biri de

vulkanizasyondur [8]. Ham mamul elastomer malzemeler eğer hiçbir işleme maruz kalmazlar ise bileşenleri arasında hiçbir bağ bulunmadığı için akışkan bir yapıdadırlar [3]. Vulkanizasyon; elastomer malzemelerin belli sıcaklık değerlerinde belli sürelerde bekletilerek aralarında cross-link denilen kimyasal bağlantıların oluşturulduğu bir ısı işlem prosesidir [3]. Bu proseste elastomerler arasında sıcaklığın artması ile cross-link denilen moleküler bağlar oluşur. Burada meydana gelen bağ tek yönlüdür ve sonucunda üç boyutlu bir yapı ortaya çıkar [3,8,9]. Her elastomerin kendine has bir vulkanizasyon eğrisi vardır. Bu eğri bir adet salınım diski ve kürlenme ölçeri olarak da adlandırılan rheometre ve hareketli kalıp rheometresi ile elde edilir [8,10,11] ve bir elastomer parçası üzerinde rotor yardımı ile belli bir sıcaklıkta açılmal deplasman oluşturarak, verilen torkun zamana bağı olarak ölçülmesi ile elde edilir [8,11,12]. Vulkanizasyon her elastomer için kendine ait kürlenme sıcaklığında ve zamanda yapılmazsa optimum bir performansın elde edilmesi beklenemez [8,12,13]. Örnek bir vulkanizasyon eğrisi Şekil 2.1’de gösterilmiştir [8].



Şekil 2.1. Örnek kürlenme eğrisi

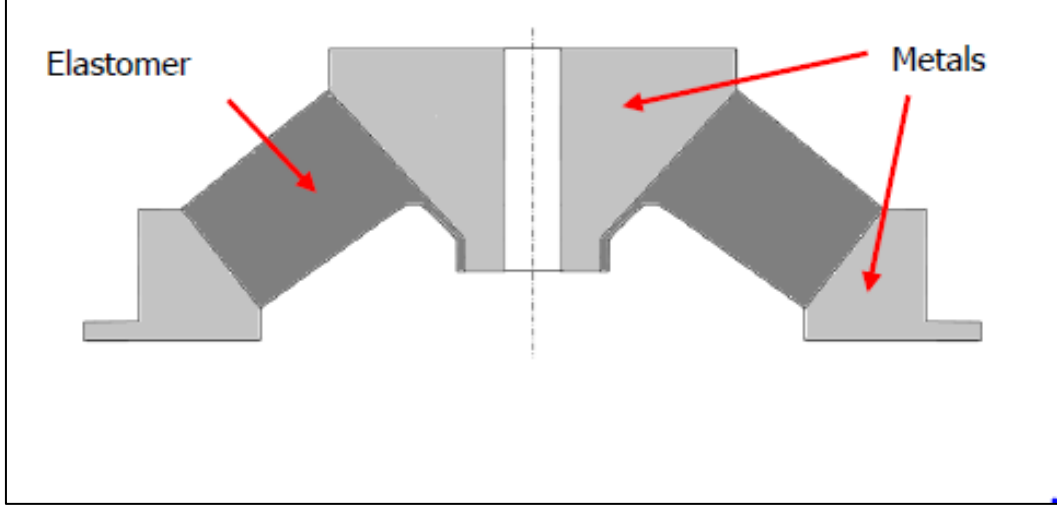
Elastomerler, hem elastik hem de viskoz malzeme özelliklerine sahip oldukları için farklı türden test yöntemleri ile karakterize edilirler. Bu farklı tür testler temelde iki ana gruba ayrılırlar. Birinci grup testler, elastomerlerin hiperelastik davranışını belirlemek için yapılan testlerdir. İkinci grup testler ise elastomerlerin viskoelastik özelliklerini belirlemek için yapılan testlerdir [14].

Hiperelastik özellikleri belirlemek için yapılan testler; tek yönlü çekme testi (*ing.uniaxial tensile test*), tek yönlü basma testi (*ing.uniaxial compression test*), iki eksenli çekme testi (*ing.biaxial tensile test*), iki eksenli basma testi (*ing.biaxial compression test*), yüzeysel çekme, kesme (*ing.planar tension, planar shear test*) ve yalın kesme testleri (*ing.pure shear test*), dörtlü kat kesme testi (*ing.quad lap shear test*) ve hacimsel basma testi (*ing.volumetric compression test*)'dir. Bu testler ile sonlu elemanlar yazılımlarında kullanılan hiperelastik özellikleri tanımlayan malzeme kartları için gerekli olan katsayılar hesaplanır [14].

Viskoelastik özellikleri belirlemek için yapılan testler; gerilim gevşemesi testi (*ing.stress relaxation test*), sürünme testi (*ing.creep test*) ve dinamik mekanik analiz (DMA)(*ing.dynamic mechanical analysis*) testleridir [14]. Bu çalışmada viskoelastik malzeme davranışı üzerinde durulacaktır. Gerinim gevşeme testi; numune üzerinde sabit bir gerinim altında malzemenin zamana bağlı olarak üzerindeki gerilmenin değişimini ölçmeye dayanan bir testtir. Test, malzemenin kullanılacağı yerde maruz kalacağı yüke göre çekme, basma, iki yönlü çekme veya kesme yönlerinde yapılabilir [15]. Sürünme testi ise; gerilim gevşeme testinin aksine sabit bir gerilme altında gerinim değerinin zamana göre değişimi ölçen bir testtir [14]. DMA ise malzemelerin frekansa ve sıcaklığa bağlı özelliklerinin belirlendiği testtir. Bu çalışmada SAGE bünyesindeki test kabiliyetleri göz önüne alınarak malzeme karakterizasyonu DMA ile gerçekleştirilmiştir. Bu test ile alakalı detaylı bilgi Bölüm 3.2'de anlatılmıştır.

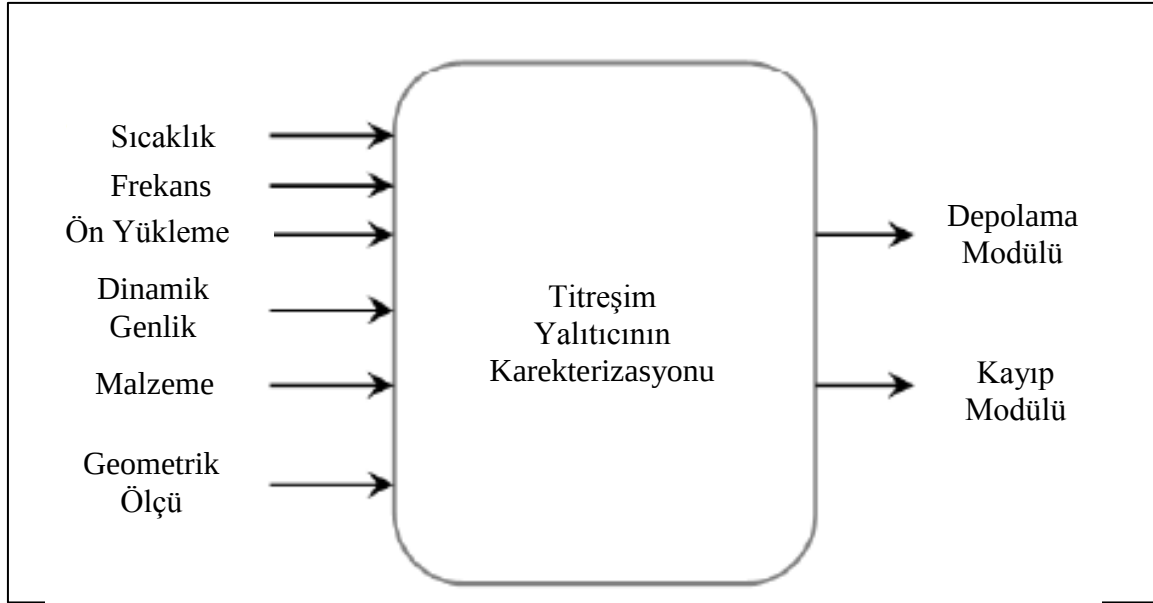
Titreşim yalıtımı problemi için uygulanan bir çok çözüm vardır. Sönüm yayları, elastomer yalıtıcılar ve endüstriyel titreşim yalıtıcılar kullanım alanına göre değerlendirilebilecek bazı çözüm seçenekleridir. Elastomerlerin üstün özellikleri göz önüne alındığında elastomer titreşim yalıtıcı kullanımı oldukça yaygın bir hal almıştır. Havacılık uygulamalarının çoğunda aviyonik birimler farklı yönlerde yüklerin(çekme, basma, kesme, bükülme vs.) bileşkelerine maruz kalabildikleri için genellikle konik kesitli elastomer titreşim yalıtıcılar kullanılır. Çünkü bu yalıtıcıların tüm yönlerdeki katılıkları birbirine çok yakındır [16]. Ayrıca eksenel yönde çok az yer kaplarlar. Çok dar alanlarda yapılacak uygulamalarda yalıtıcıyı konumlandırmak için bu olumlu bir özelliktir. Konik yalıtıcıların yaygın olarak kullanım sebebi, titreşimi hem eksenel yönde hem de radyal yönde yalıtmaktır. Şekil 2.2'de tipik bir konik yalıtıcı görseli gösterilmiştir [17]. Bu yapısı ile

yalıtcının dinamik katılık ve kayıp faktör değeri aksel ve radyal yönlerde birbirine yakın olabilir.



Şekil 2.2. Konik titreşim yalıtıcı kesit görseli

Elastomer titreşim yalıtıcının dinamik karakterizasyonu için en önemli parametreler depolama(*ing.storage*) modülü ve kayıp(*ing.loss*) modülüdür. Titreşim yalıtıcılar için kullanılan elastomerik malzemeler viskoelastik malzemelerdir. Viskoleastik malzemelerin kompleks modülü sıcaklık, frekans, uygulanan statik ön yükleme ve dinamik genliğe bağlıdır. Dolayısı ile titreşim yalıtıcının katılık ve kayıp faktör değeri viskoelastik malzemenin türü, çalışma sıcaklığı ve frekansı, statik yükleme, dinamik genlik ve titreşim yalıtıcının geometrisine bağlıdır [17]. Elastomer titreşim yalıtıcıların karakterini etkileyen faktörleri gösteren şema Şekil 2.3’de gösterilmiştir [17].



Şekil 2.3. Elastomer titreşim yalıtıcıların karakterini etkileyen faktörler

Elastomer titreşim yalıtıcıların dinamik özellikleri sıcaklık, frekans, statik ön yükleme ve dinamik uygulama genliği ile değişir. Bunların içinde en önemli faktör ise sıcaklıktır. Yalıtıcı için kullanılan malzeme, yalıtıcının geometrisi ve şekli diğer faktörlerin karakterini ve derecesini belirler [1].

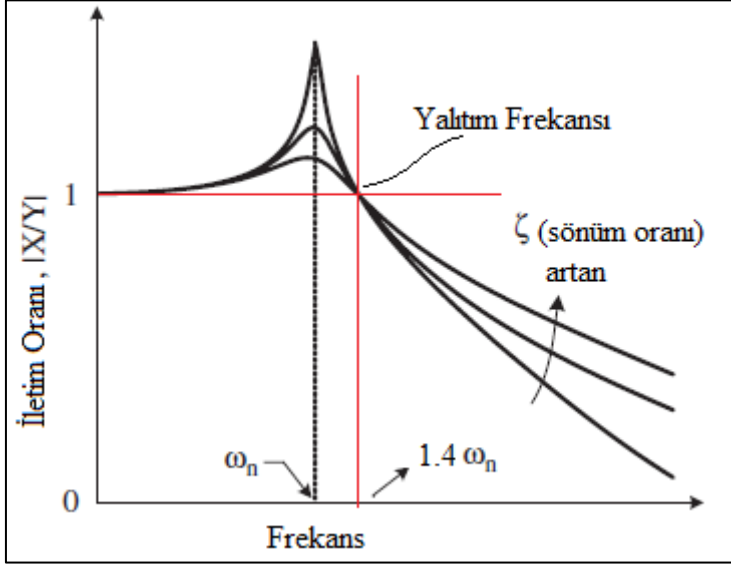
İletim oranı, test kalemi zeminden dinamik olarak tahrik edildiği zaman özellikle faydalı olan frekansa bağlı, birimsiz bir fonksiyondur [18]. Titreşim yalıtımı yapılmış bir sistemin etkinliğini ölçen anahtar bir parametredir [19]. Ortamdan gelen titreşim yükünün sisteme iletilme miktarı olarak tanımlanır [18,19]. Bu yük bir kuvvet, ivme veya yer değiştirme cinsinden; iletilen yükün uygulanan yüke oranı olarak ifade edilebilir [19,21,26,48]. Oran matematiksel olarak hem kuvvet hem de yer değiştirme için aynıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir [19,21,26,50,51].

$$|T| = \frac{|F_{iletilen}|}{|F_{uygulanan}|} = \frac{|X_{iletilen}|}{|X_{uygulanan}|}$$

(2.1)

En yüksek iletim oranı değeri, yalıtılmış sistemin rezonans doğal frekansında hesaplanır [18]. Yalıtımı yapılan sistemin doğal frekansının, titreşim kaynağının doğal frekansından hem çok yüksekte veya çok alçakta bir yerde olması hem de iletim oranının düşük olması gereklidir [20]. İletim oranının düşürmek, kayıp oranı (*ing.loss faktor*) yüksek olan bir

elastomer malzeme kullanmak ile mümkündür [20]. Bunu anlatan görsel Şekil 2.4’de gösterilmiştir [20].



Şekil 2.4. Sönüm artışı ile iletim oranının azalması

Şekilde görüldüğü gibi titreşim yalıtımı sistemin doğal frekans değerinin $\sqrt{2} \cong 1.4$ katında başlar [18,21].

Tezde elastomer malzemelerin dinamik özellikleri dinamik karakterizasyon testleri ile bulunacaktır. Dolgu kauçuklarının dinamik özellikleri farklı dinamik genlikler ile değiştirilebilir. Buna Fletcher-Gent etkisi veya Payne etkisi denir. Negrete, Vinolas ve Kari, bir sonlu elemanlar kodu kullanarak dolgu kauçuk yalıtıcıların dinamik katılığını tahmin etmek için lineer viskoelastik bir malzeme içinde bu etkiyi de içeren bir metodoloji geliştirdi [22]. Beijers ve Boer ise çalışmalarında ABAQUS’ü kullanarak silindirik titreşim yalıtıcı modelledi. İlk olarak destek kısmın farklı ön deformasyonları için lineer olmayan bir analiz yaptılar. Sonra ön deforme edilmiş yalıtıcı üzerinde lineer harmonik analizi yaptılar [23]. Mustafa ve Kenan ise titreşim test datalarını kullanarak titreşim yalıtıcıların karakterizasyonu ile alakalı çalıştılar. Viskoelastik parçaların dinamik özelliklerinin ölçümü için 2 tane yaklaşık metod ortaya koydular. İlk metod sistemin lineerleştirilmesine dayanıyor. ‘Logaritma azalım metodunu kullanarak yalıtıcı özelliklerinin tahmini’ çalışmasının amacı test altında parçalar için genliğe bağlı parametreler ortaya koymaktır [24]. Nkayama ve Morita’nın çalışmasında ise sonlu elemanlar analizi ile doğal kauçuk bilyaların bükülmesi incelendi. Onlar kauçuğun lineer olmayan malzeme özelliklerinin

veya elik plakaların ara katmanının kalınlığının bükölme yükünden nasıl etkilendiğini çalıştılar [25]. Okay çalışmasında elastomerlerin hiperelastik ve viskoelastik davranış biçimlerini modelleyebilmek için özel test yöntemleri belirlemiştir. Elde edilen bu özellikler sonlu elemanlar analizi çalışmalarında kullanılmış ve sonuçları deney sonuçları ile kıyaslanmıştır [26]. Köksal çalışmasında bir elastomer numunenin dinamik karakteristiğini analitik olarak modellemiştir. Analitik alışması sonucu numune geometrisi, yer değiştirme genliği ve numunenin kompleks modölüne bağlı bir kompleks katılık ifadesi elde ederek bu ifadeyi iki parametrelili Maxwell, iki parametrelili Voigt, üç parametrelili Maxwell, üç parametrelili Voigt ve beş parametrelili Voigt modelleri için frekansın fonksiyonu olarak modellemiştir. Modellerin doğrulamasını bir dizi deney prosedürü ile yapmıştır [27]. Ardıç çalışmasında tedariğinde problem yaşanan ticari bir titreşim yalıtıcının parametrik tasarımını yapmış, farklı elastomer malzemelerin dinamik karakterizasyonunu yaparak oluşturduğu tasarım seçeneklerinin sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmiştir. Bu analiz neticesinde ürettirdiği titreşim yalıtıcının modal testlerini yaparak sonuçlarını analiz sonuçları ile kıyaslamıştır [17].

Bu çalışmada; aviyonik bir birimin titreşim yalıtımı için geometrik, dinamik ve mekanik kısıtlar altında özgün bir geometriye sahip bir titreşim yalıtıcının tasarımı, bu tasarımın sayısal olarak modellenmesi, farklı sınır koşullarına sahip test düzenekleri ile testlerinin yapılması ve analiz ile test sonuçlarının kıyaslaması yapılacaktır.

3. VİSKOELATİK MALZEME KAREKTERİZASYONU

3.1. Viskoelastik Malzeme Davranışı

Viskoelastik malzeme davranışı sadece viskoz ve sadece elastik davranışlar arasında bir yerde olan gerilme gerinim ilişkisi gibi kendini açıkça gösterir. Doğrusal viskoelastik malzeme davranışının zaman bölgesinde modellenmesi tanımlanmış sürünme(*ing.creep*) veya gevşeme(*ing.relaxation*) parametreleri bakımından tanımlanabilir. Bu parametreler, gerilme ve gerinmenin yapısal ilişkisinin, gerilme ve gerinmenin yüksek derece türev terimlerini içeren doğrusal bir adi diferansiyel denklem olduğu yerdedir. Frekans alanında, gerilme gerinme ilişkisinin tanımlanması için harmonik yükler düşünülebilir. Bir viskoelastik malzeme numunesinin tek eksenindeki yüklemesi için, gerilme ve gerinmenin harmonik genlikleri arasındaki ilişki kompleks frekans bağımlı modül, $\tilde{E}^*(i\omega)$, cinsinden yazılabilir. Buna göre;

$$\sigma_0 = \tilde{E}^*(i\omega)\varepsilon_0 = (E'(w) + iE''(w))\varepsilon_0 \quad (3.1)$$

Burada w frekans, $E'(w)$ depolama (*ing.storage*) modülü ve $E''(w)$ kayıp (*ing.loss*) modülüdür.

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$$

Kompleks modülü aşağıdaki gibi de yazabiliriz.

$$\tilde{E}^*(i\omega) = E'(w)[1 + i\eta(w)] \quad (3.3)$$

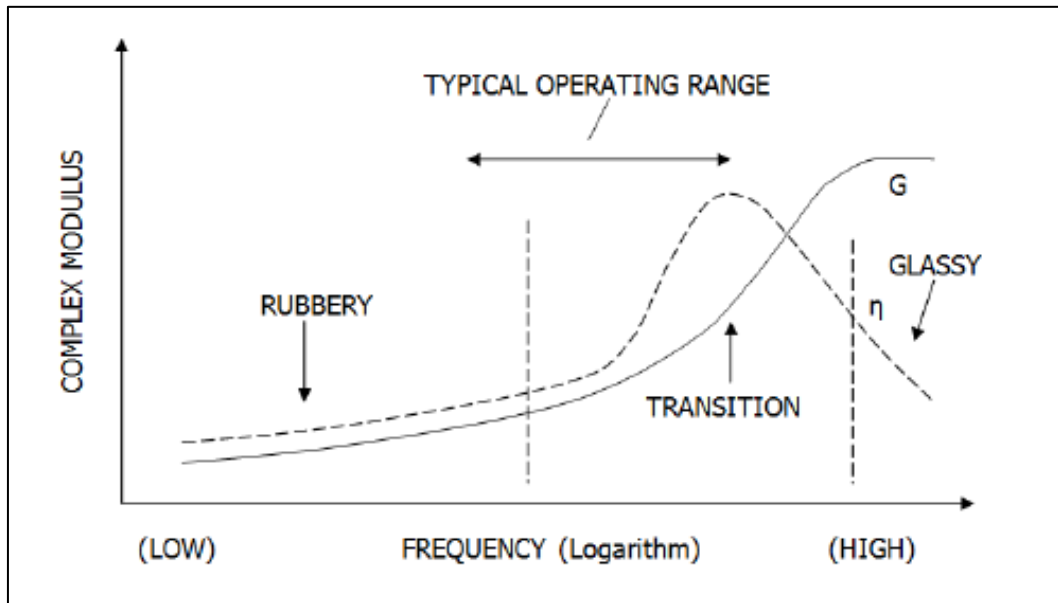
Burada $\eta(w)$ kayıp faktörü olarak tanımlanır. Aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta(w) = \frac{E''(w)}{E'(w)} \quad (3.4)$$

Kayıp faktörü, bir malzemenin sönüm kapasitesinin direkt ölçüsüdür. Metaller için depolama modül, tüm frekans bölgelerinde sabittir. Kayıp modülü, ise metallerde frekansın

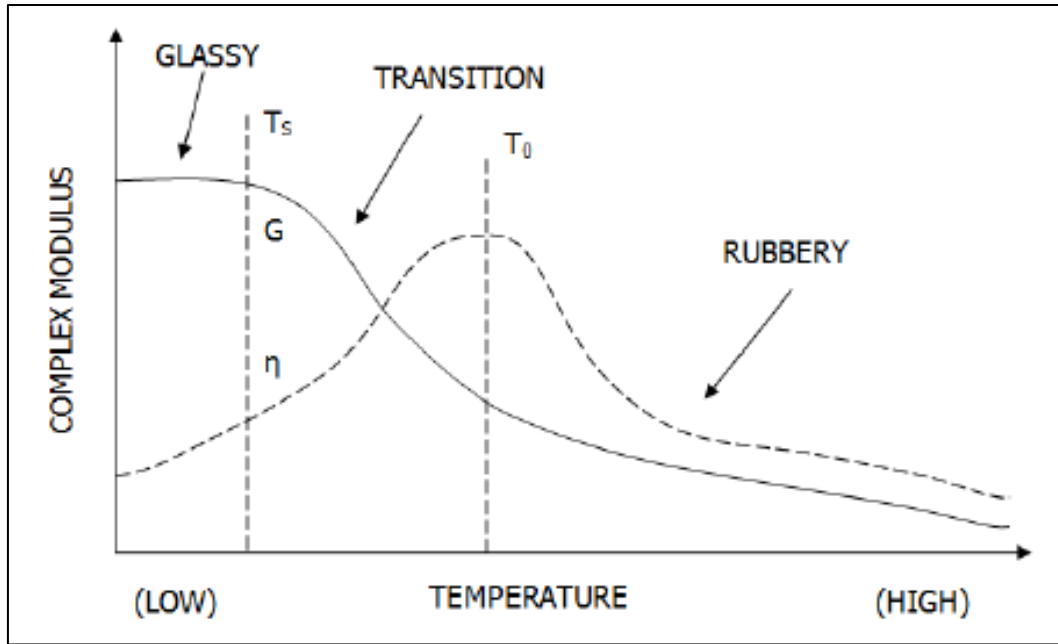
zayıf bir fonksiyonudur. Bu yüzden metallerde kayıp faktörü 0,0001-0,001 arasındadır. Viskoelastik malzemelerde ise her iki modül de frekansın fonksiyonlarıdır ve 0,1-1,5 arasında çok yüksek kayıp faktör değerlerine ulaşabilirler. Ayrıca sıcaklık da viskoelastik malzemeler için, kompleks modülü etkileyen güçlü bir parametredir [17].

Kompleks modülde sanal kısmın yer alması, girdi harmonik olduğu zaman, gerilme ve gerinim arasında bir faz farkının olacağını ifade eder. Harmonik veya periyodik girdi cevap durumu olduğunda, faz farkından dolayı gerilme gerininim eğrisinde bir gecikme döngüsü görülür. Bu döngü alanı üstelik yüklemeli ve yüklemesiz çevrim içinde ısı olarak bir enerji kaybının ölçüsüdür [28,29]. Tipik viskoelastik malzemeler için depolama ve kayıp modülünün frekansa bağımlılığı sabit sıcaklıkta aşağıdaki Şekil 3.1’de verildiği gibi araştırılmıştır. Bu frekans eğrilerinde 3 bölge ortaya çıkar. Viskoelastik malzemelerin çoğunda (elastomerler, kauçuk, plastikler, basınca duyarlı yapıştırıcılar), kauçuksu (*ing.rubbery*) bölgesi içinde, kayıp faktör 0,1-0,3 arasındadır, kompleks modül değeri ise 2-3 MPa civarında iken geçiş (*ing.transition*) bölgesinde ise modül değerleri frekans değişimine çok duyarlıdır ve frekansın artması ile sert bir şekilde artar (Camsı (*ing.Glassy*) bölgesine geçene kadar). Camsı bölgesinde ise kayıp faktör 0.01’in altındadır. Aynı zamanda modül değerleri ise frekans değişimi ile göreceli olarak karardır ve 2000 MPa seviyelerindedir [1].



Şekil 3.1. Elastomer malzemelerin kompleks modülü davranışı üzerinde frekansın etkisi

Kompleks modül ayrıca sıcaklığa da güçlü şekilde bağlıdır. Sıcaklığa bağlı eğriler depolama modül ve kayıp faktörün frekansa bağlı eğrilerinin (Şekil 3.1) düşey eksen takımına göre aynasıdır [1]. Frekansın artması sıcaklığın düşmesi ile aynı etkiye gösterirken, frekansın azalması da sıcaklığın artması ile aynı etkiyi gösterir [1]. Buna ait grafik Şekil 3.2’te gösterilmiştir [1].



Şekil 3.2. Elastomer malzemelerin kompleks modülü davranışı üzerinde sıcaklığın etkisi

Sıcaklık-Frekans eşdeğerliği ‘shift faktör’ ile modellenir. Buda kompleks modülün hem sıcaklık hem de frekansın fonksiyonu gibi modellenmesine olanak sağlar [1].

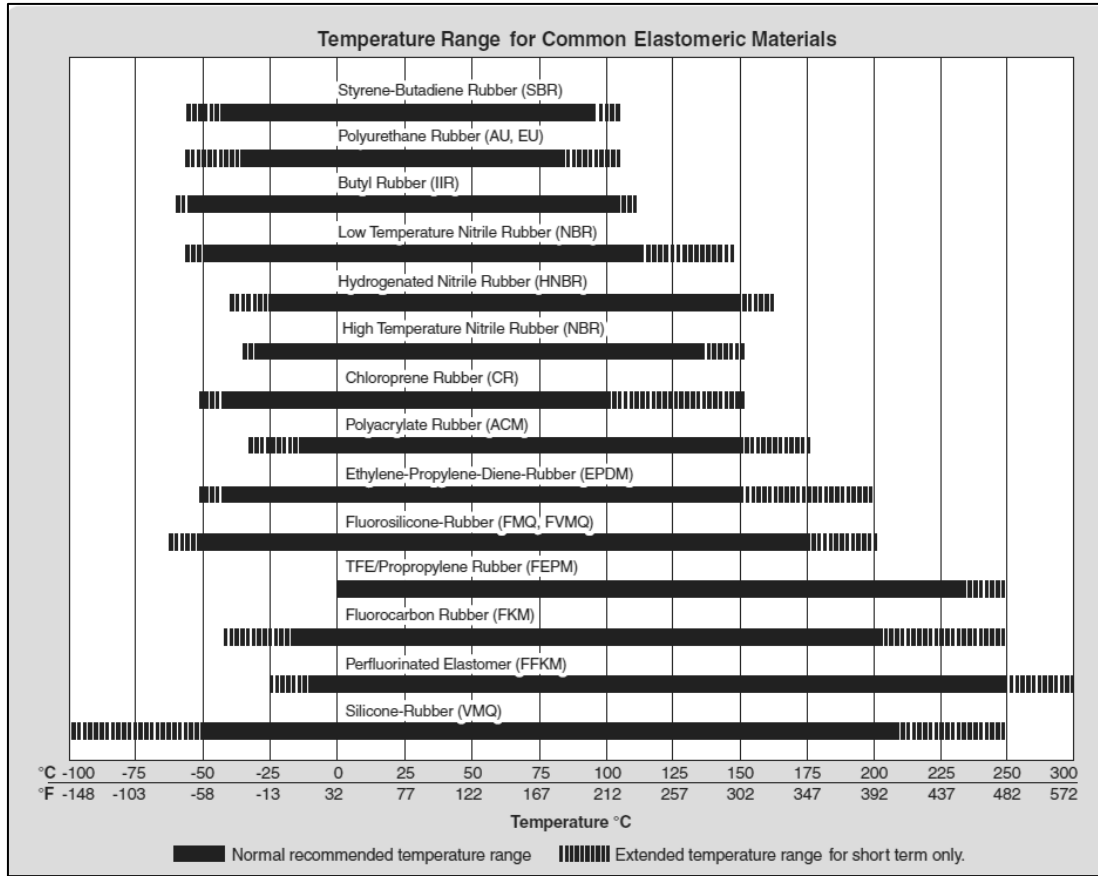
Elastomer malzemelerin izolasyon uygulamalarında kullanmak için geniş bir sıcaklık ve frekans aralığı için elastomer malzemelerin kompleks modül davranışı bilinmelidir. Viskoelastik malzeme davranışı için yaygın olarak bilinen matematiksel modeller; Maxwell model, Kelvin-Voigt model ve Standart Linear Solid modeldir. Tüm bu modeller içinde, genel viskoelastik davranış basit elastik ve viskoz parçaların (yaylar ve amörtisör) farklı kombinasyonları kullanılarak modellenir [27].

Silikon elastomerler; bazı önemli özellikleri ile diğer elastomer çeşitlerinden farklı bir yere sahiptir. Bu özelliklerden bazıları biyolojik uyumluluk, oksitlenme(yanma) direnci, ısı kararlılık ve düşük yüzey gerilimine sahip olmasıdır [30-32]. Bu üstün özellikleri sayesinde sızdırmazlık, ısı koruma, titreşim yalıtıcılar, baskı keçeleri, iklimsel koruma

kaplamaları gibi kullanımlarıyla otomotivden, elektroniğe, plastikten, medikale ve savunma sanayiine kadar birçok geniş alanda kullanılmaktadır [6,32-34]. Ayrıca içeriğine yapılan katkılar sayesinde silikonların mevcut mekanik özellikleri geliştirilebildiği gibi farklı özellikleri de ortaya çıkabilmektedir [32]. Silikon malzemelerin etkin katkı malzemeleri, içeriğine katılan silika ve silandır. Bu katkıların miktarı ve tanecik büyüklüğünün doğru ayarlanması silikonun mevcut özelliklerinin daha iyi hale getirilebilmesi ile doğrudan bağlantılıdır [35]. Bölüm 2’de anlatıldığı gibi diğer elastomer çeşitlerinde olduğu gibi uygulanan vulkanizasyon reçetesi de silikonun mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

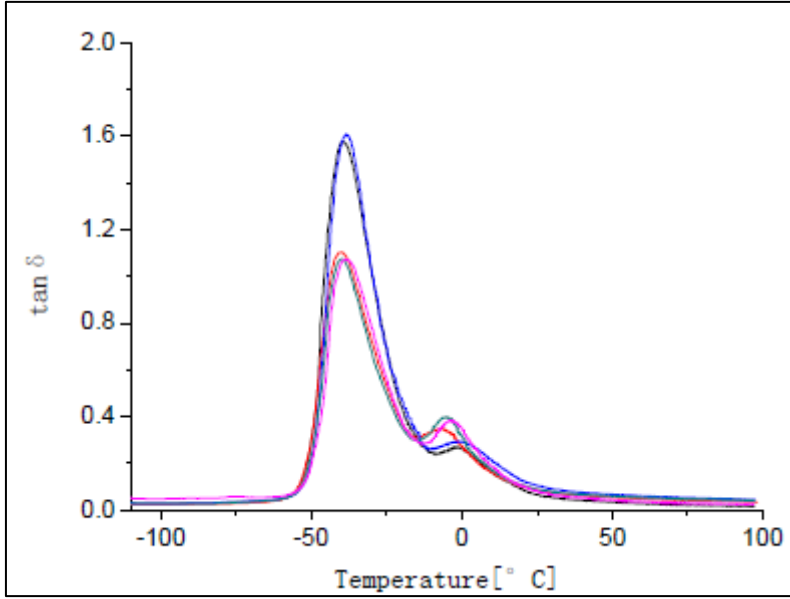
Askeri ekipmanların birçok zorlayıcı çevre koşullarında görevini hiçbir performans düşüklüğü olmadan yerine getirmesi beklenir. Bu şartlardan en zorlayıcı olanlardan birisi ise kuşkusuz sıcaklıktır. Buna göre çalışmada titreşim yalıtıcı malzemesi olarak silikon malzemenin kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu kararın alınmasındaki etkin sebep ise silikon malzemelerin çok düşük sıcaklıklardan çok yüksek sıcaklıklara kadar uzanan geniş bir sıcaklık zarfında etkin özelliklerinde çok az bir değişiklik yaşayarak kullanılabilmesidir. Yani silikon malzemelerin ısıl direnci diğer elastomerlerden yüksektir.

Şekil 3.3 farklı tür elastomerlerin çalışabildiği sıcaklık aralığını göstermektedir [36].



Şekil 3.3. Elastomerlerin çalışabildiği aktif sıcaklık aralıkları

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi silikon elastomerler -100 ile +250 °C sıcaklıkları arasında çalışabilmektedir. Genel itibariyle elastomer malzemelerin sönüm karakterleri sıcaklık değişimine göre farklılık gösterir [32,37]. Wang'ın yaptığı çalışmada [37] elastomer malzemelerin sıcaklığa göre sönüm özelliklerinin değişimi Şekil 3.4'de gösterilmiştir [32, 37].



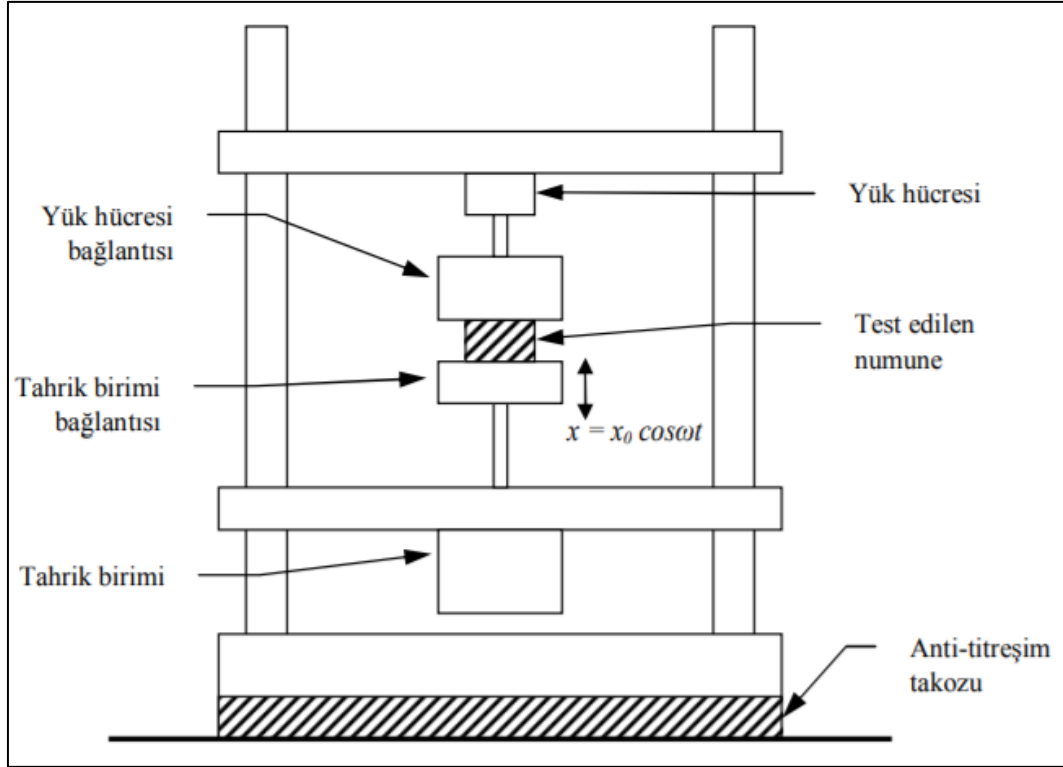
Şekil 3.4. Elastomer malzemelerin sıcaklığa göre kayıp faktörünün değişimi

Çalışma da 5 farklı elastomer malzemenin sıcaklığa göre değişimi incelenmiştir. Tüm malzemelerin düşük sıcaklıklarda belli bir aralıkta sönüm karakterinin arttığı gözlemlenmiştir. Diğer elastomerler gibi silikon da benzer bir davranış gösterecektir. Fakat silikonların ısıl kararlılığı diğerlerinden daha yüksek olduğu için değişiklik daha az olacaktır.

3.2. Dinamik Mekanik Analiz (DMA)

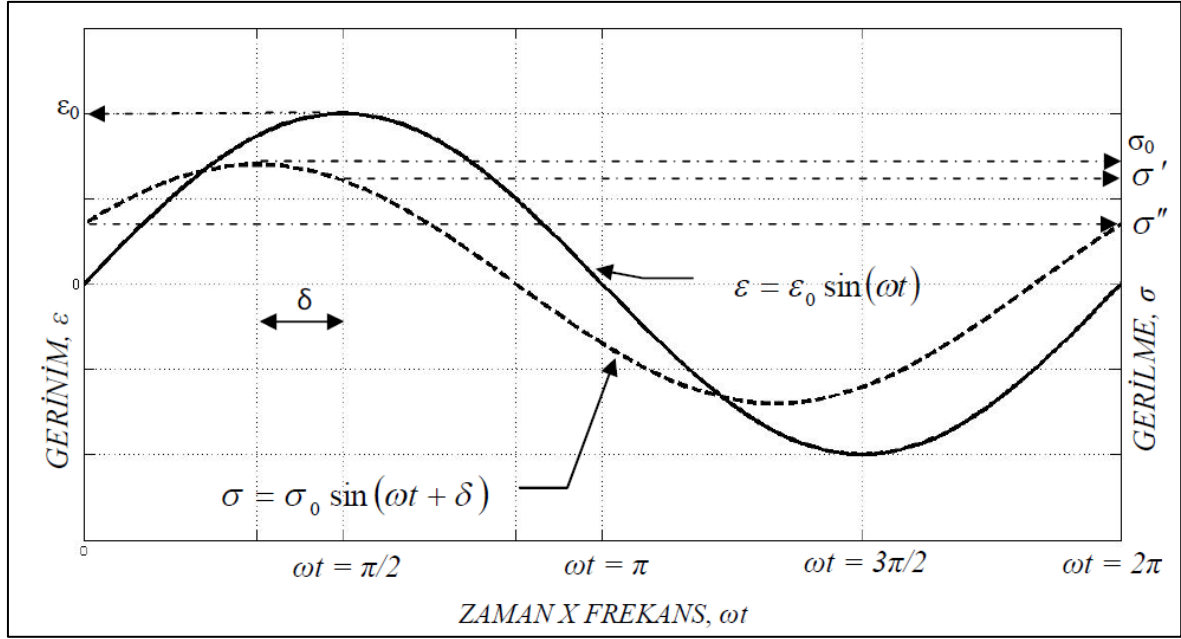
Dinamik mekanik analizler, çevrimli yükler altında elastomer malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak dinamik özelliklerinin belirlendiği analizlerdir. Bu analizler elastomerlerin viskoelastik özelliklerini ölçerler [26]. Kullanım alanına göre dinamik mekanik ısı analiz, dinamik termomekanik analiz veya dinamik reoloji olarak isimlendirilir [38].

DMA cihazının şematik gösterimi Şekil 3.5’de gösterilmiştir [39].



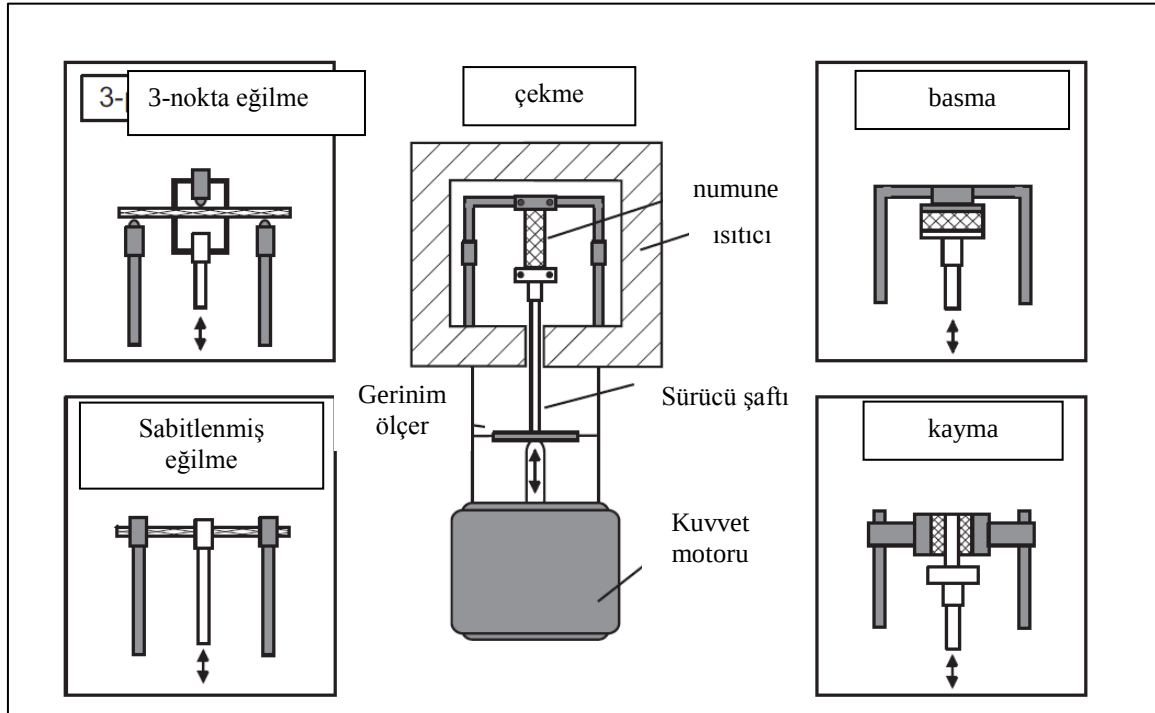
Şekil 3.5. DMA cihazının şematik gösterimi

DMA testlerinde tahrik birimi tarafından verilen harmonik girdi numune üzerinde harmonik bir gerilmeye bu da sonucunda harmonik bir gerinme eğrisin oluşmasına sebep olur [40]. DMA sırasında oluşan gerilme gerinim çevrimi Şekil 3.6'de gösterilmiştir [1,41,42].



Şekil 3.6. DMA’da elde edilen gerilim-gerinim eğrisi

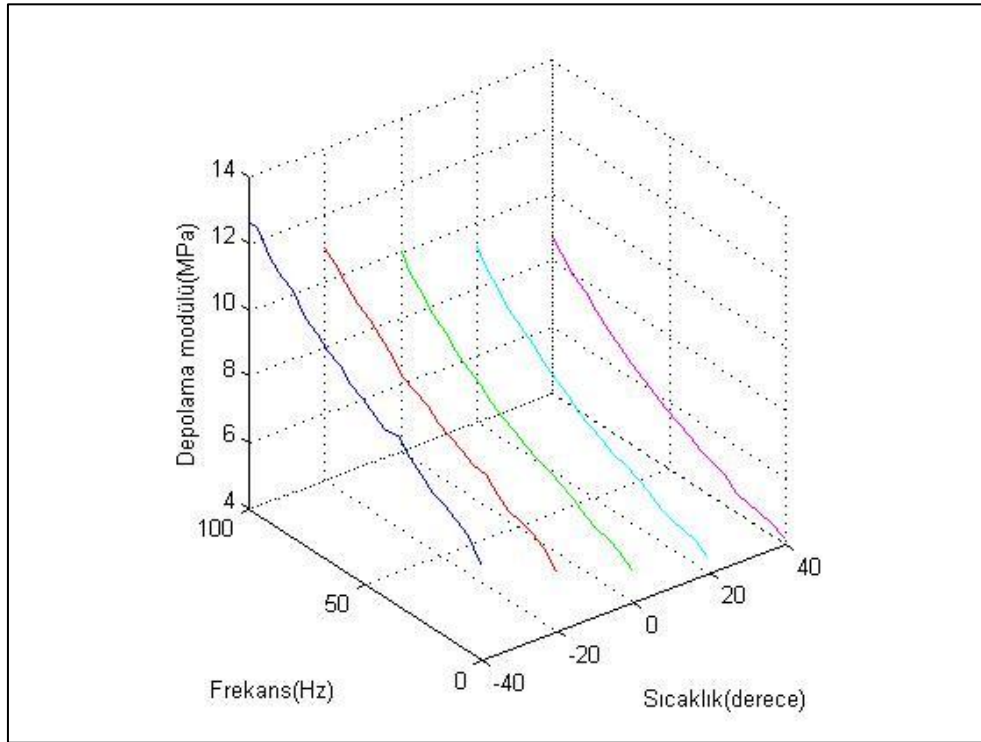
Dinamik mekanik analizlerin, elastomerin maruz kaldığı etkin yüklemenin davranışını daha doğru karakterize etmesi için farklı yükleme türleri ile testlerinin yapılması mümkündür. Bu yükleme şekilleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir [14].



Şekil 3.7. DMA yükleme şekilleri

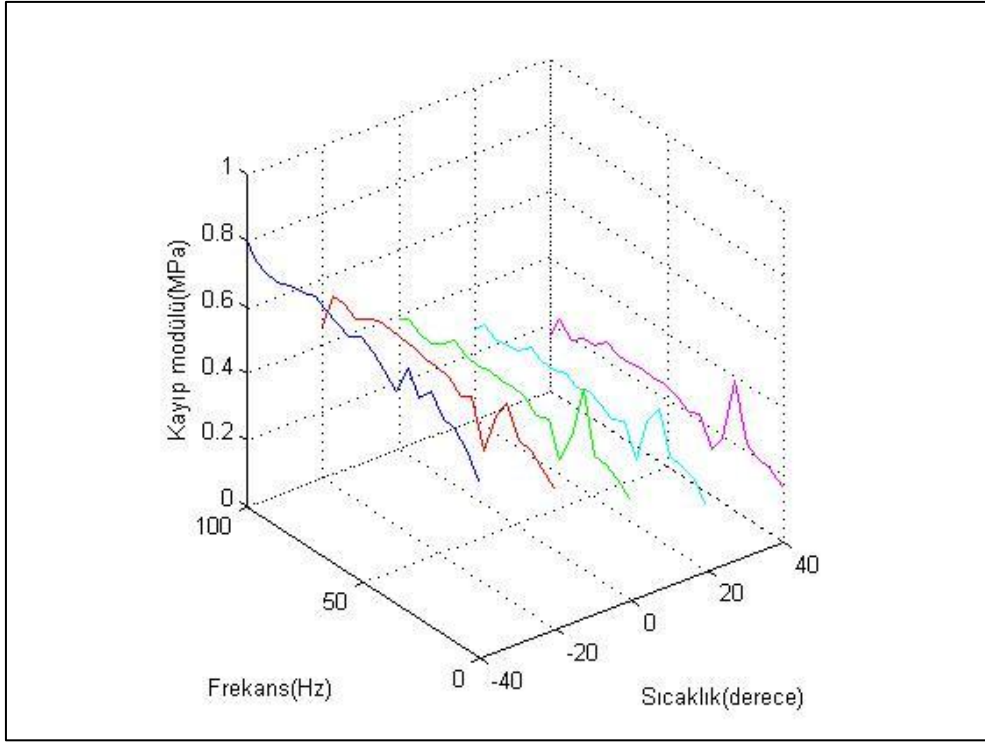
Çalışmada, silikon 50 Sh A, Silikon 60 Sh A ve Silikon 70 Sh A sertlikteki malzemelerin dinamik davranışı incelenmiştir. DMA testleri için Tübitak SAGE polimer alt yapısındaki Metrovib firmasının DMA 450+ isimli cihazı ile yapılmıştır. Her bir DMA testi için 3 farklı numune kullanılmıştır. Analizler frekans taraması şeklinde gerçekleştirilmiştir. -40°C, 20°C ve 40°C’de analizler tekrar edilmiştir. 20°C oda sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Analiz çekme yönünde ve 1-100 Hz aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde malzemelerin farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı depolama ve kayıp modül değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerler daha sonra sonlu elemanlar analizinde girdi olarak kullanılmıştır.

Silikon 50 Sh A için -40°C, -20°C, 0°C, 20°C ve 40°C’de yapılan dinamik mekanik analiz sonuçları, depolama modülü ve kayıp modülü Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Silikon 50 Sh A’nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı depolama modülü grafiği

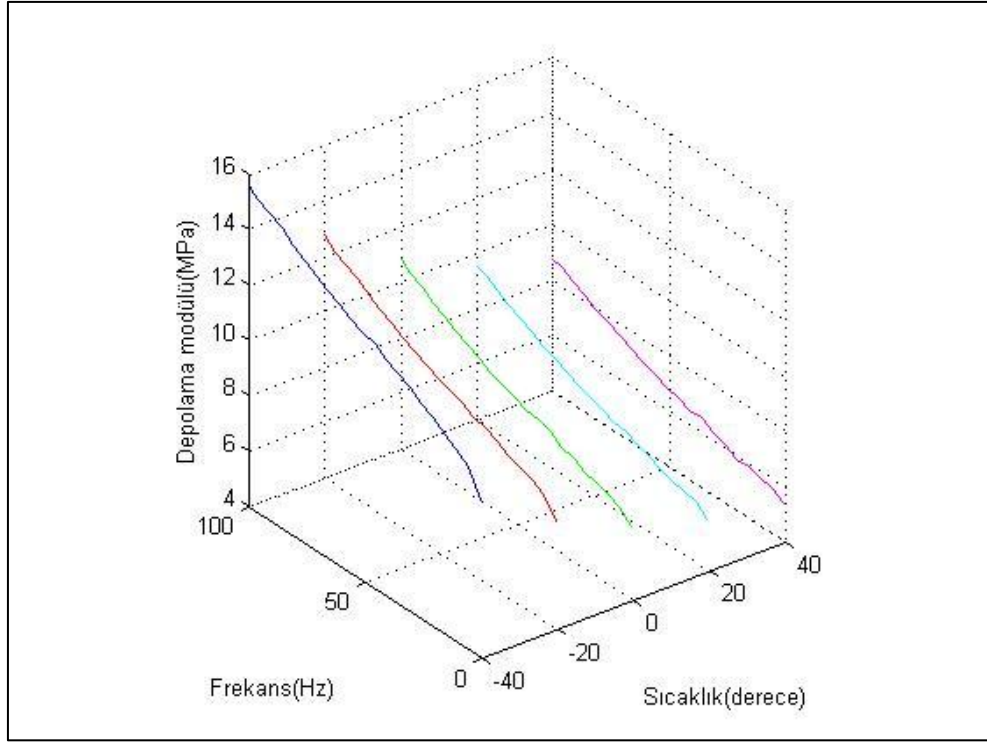
Şekil 3.8’de görüldüğü gibi silikon 50 Sh A malzemenin 5 farklı sıcaklıkta depolama modülü değerleri tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre sıcaklık ile depolama modülü arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Sıcaklık arttıkça malzemenin sertliği azaldığı için depolama modülü azalmaktadır. Yükleme frekansının artması ise silikonun depolama modülü değerlerini artırmaktadır.



Şekil 3.9. Silikon 50 Sh A'nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı kayıp modülü grafiği

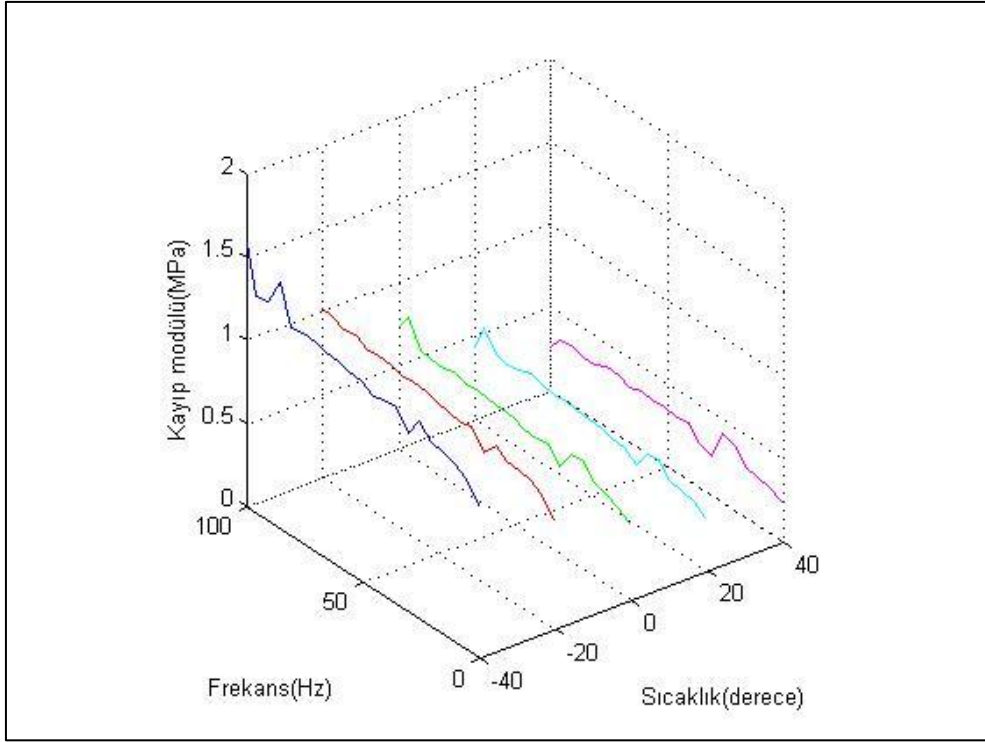
Şekil 3.9'de görüldüğü gibi depolama modülüne benzer bir şekilde kayıp modülü de sıcaklığın artması ile azalmaktadır. Yine benzer şekilde yükleme frekansının artması silikonun kayıp modülünü de artırmaktadır. Yani silikonun üzerine etki eden yüklemenin sıklığı arttıkça sönümlleme karakteri daha çok ortaya çıkmaktadır. Analiz şeklinde kayıp modülünün ani iniş çıkışlarının sebebi DMA cihazına yerleştirilen silikon numunenin aparata tutunma zorluğudur.

Silikon 60 Sh A için -40°C , -20°C , 0°C , 20°C ve 40°C 'de yapılan dinamik mekanik analiz sonuçları, depolama modülü ve kayıp modülü Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Silikon 60 Sh A'nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı depolama modülü grafiği

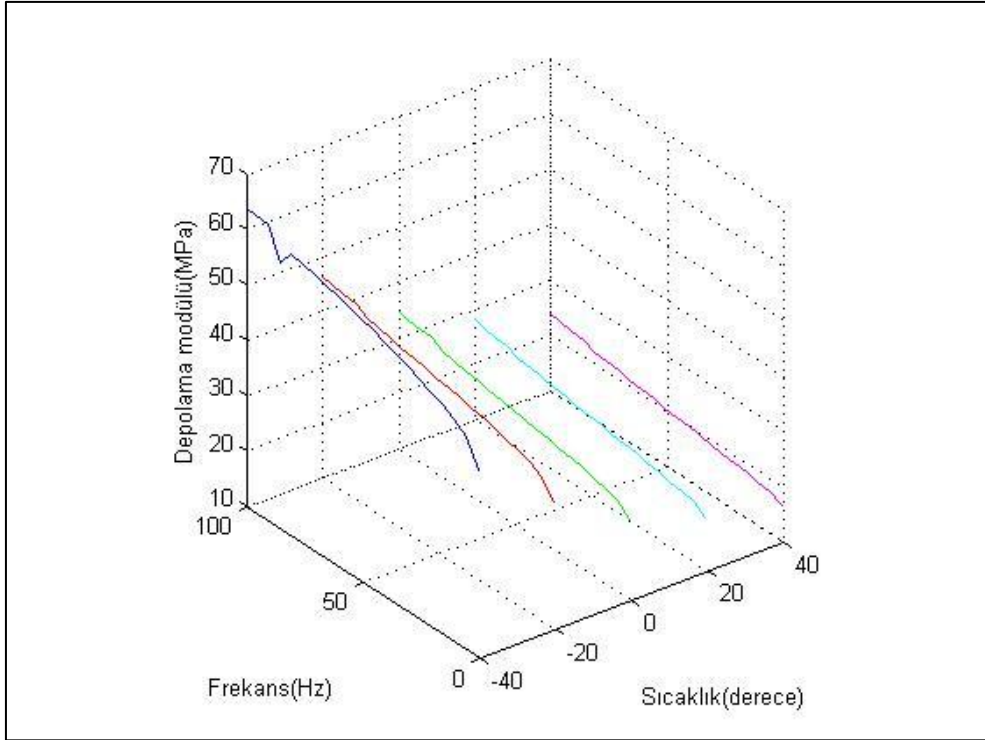
Şekil 3.10'de görüldüğü gibi silikon 60 Sh A malzemenin 5 farklı sıcaklıkta depolama modülü değerleri tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre sıcaklık ile depolama modülü arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Sıcaklık arttıkça malzemenin sertliği azaldığı için depolama modülü azalmaktadır. Yükleme frekansının artması ise silikonun depolama modülü değerlerini artırmaktadır. Silikon 60 Sh A'nın sertliği, silikon 50 Sh A'ya göre daha yüksek olduğu için depolama modülü değerleri de daha yüksek ölçülmüştür.



Şekil 3.11. Silikon 60 Sh A'nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı kayıp modülü grafiği

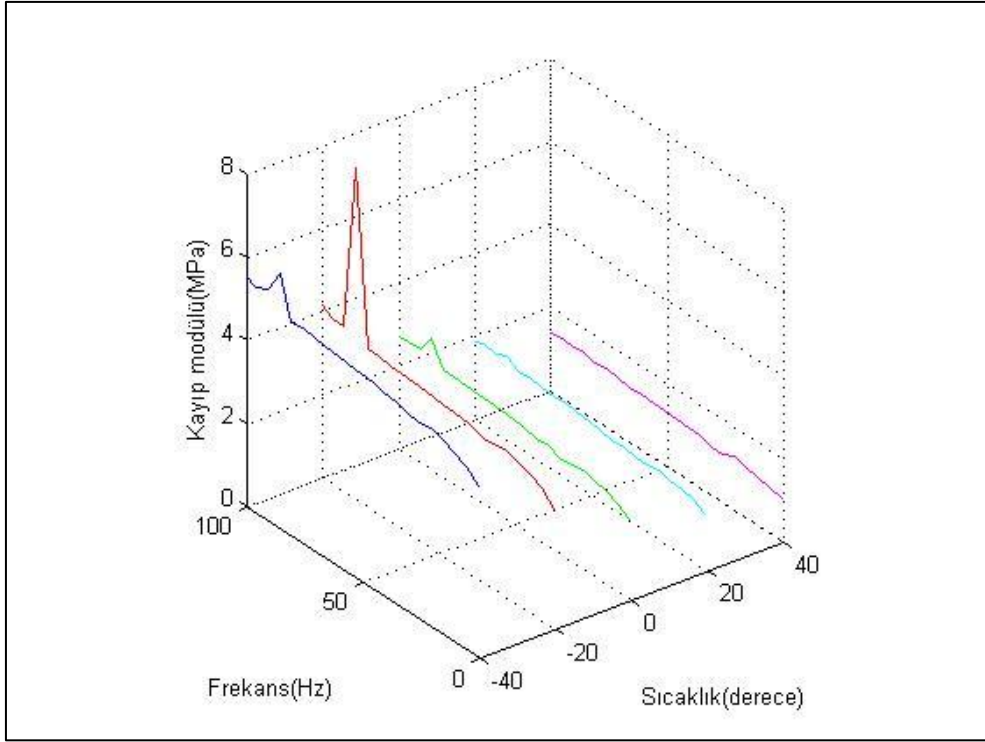
Şekil 3.11'da görüldüğü gibi depolama modülüne benzer bir şekilde kayıp modülü de sıcaklığın artması ile azalmaktadır. Yine benzer şekilde yükleme frekansının artması silikonun kayıp modülünü de artırmaktadır. Yani silikonun üzerine etki eden yüklemenin sıklığı arttıkça sönümleme karakteri daha çok ortaya çıkmaktadır. Silikon 60 Sh A'nın sertliği, silikon 50 Sh A'ya göre daha yüksek olduğu için kayıp modülü değerleri de daha yüksek ölçülmüştür.

Silikon 70 Sh A için -40°C , -20°C , 0°C , 20°C ve 40°C 'de yapılan dinamik mekanik analiz sonuçları, depolama modülü ve kayıp modülü Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Silikon 70 Sh A'nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı depolama modülü grafiği

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi silikon 70 Sh A malzemenin 5 farklı sıcaklıkta depolama modülü değerleri tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre sıcaklık ile depolama modülü arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Sıcaklık arttıkça malzemenin sertliği azaldığı için depolama modülü azalmaktadır. Yükleme frekansının artması ise silikonun depolama modülü değerlerini artırmaktadır. Silikon 70 Sh A'nın sertliği, silikon 50 Sh A ve silikon 60 Sh A'ya göre daha yüksek olduğu için depolama modülü değerleri de daha yüksek ölçülmüştür.



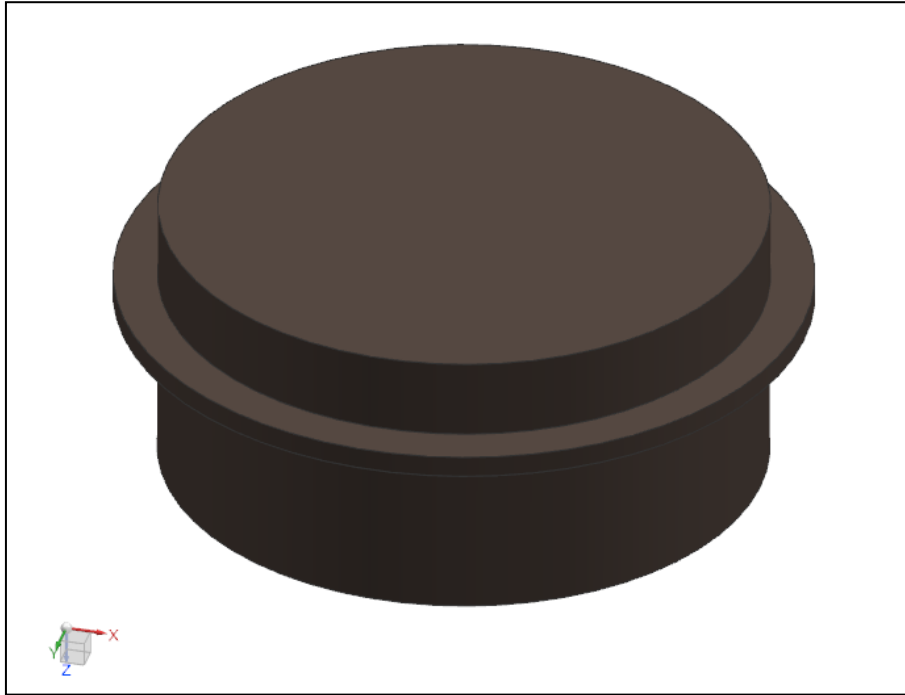
Şekil 3.13. Silikon 70 Sh A'nın farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı kayıp modülü grafiği

Şekil 3.13'de görüldüğü gibi depolama modülüne benzer bir şekilde kayıp modülü de sıcaklığın artması ile azalmaktadır. Yine benzer şekilde yükleme frekansının artması silikonun kayıp modülünü de artırmaktadır. Yani silikonun üzerine etki eden yüklemenin sıklığı arttıkça sönümleme karakteri daha çok ortaya çıkmaktadır. Silikon 70 Sh A'nın sertliği, silikon 50 Sh A ve silikon 60 Sh A'ya göre daha yüksek olduğu için kayıp modülü değerleri de daha yüksek ölçülmüştür. -20°C'de yüksek frekansta ani tepe noktasının oluşmasının sebebi silikonun aparat tarafından yüksek kuvvet sebebi ile tam kavranamamasından kaynaklanmıştır.

4. MEKANİK TASARIM

4.1. Mekanik Tasarım Kriterleri ve Kısıtları

Aviyonik birim ve bu aviyonik birime uygun, çevresel şartları sağlayan titreşim yalıtıcı tasarımı yapılacak aviyonik birimin 3 boyutlu(3B) yaklaşık geometrisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Atalatsel ölçüm biriminin 3B geometrisi

Şekil 4.1’deki görülen silindirik geometriye sahip olan aviyonik birimin mekanik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Aviyonik birimin mekanik özellikleri

Kütle(kg)	Kütle Atalet Momenti (kg. mm ²)	En Dış Çap(mm)	İç Çap(mm)	Yükseklik(mm)
1,4	Ix-1771.92	126	110	50,9
	Iy-1771.92			
	Iz-2544.62			

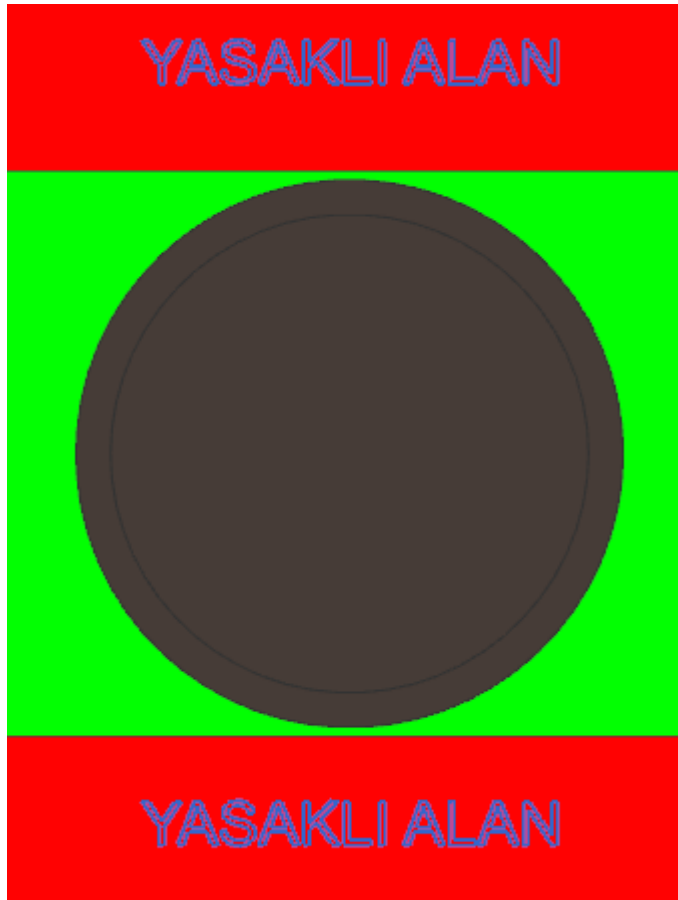
Birimin X ve Y yönündeki kütle merkezi aynı zamanda geometrik merkezidir. Ayrıca birimin maruz kalacağı çevresel şartlara titreşim yalıtıcı da maruz kalacağından yalıtıcının da bu şartlar altında istenilen performansı karşılaması beklenmektedir.

Tasarımı tamamlanmış aviyonik birime yapılan analiz sonucunda hesaplanmış, yalıtıcı tasarımında da göz önüne alınması gereken, ilk 5 doğal frekansı Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Aviyonik birimin ilk 5 doğal frekansı

Frekans Modu	Doğal Frekans (Hz)
1	513,4
2	515
3	515,6
4	534,5
5	547,9

Titreşim yalıtıcı tasarımı için aviyonik birimin kullanılması planlanan yerdeki yerleşimi sebebi ile bazı geometrik kısıtlar oluşmuştur. Bu kısıtlar sırası ile Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Ralyal yöndeki geometrik kısıtlar



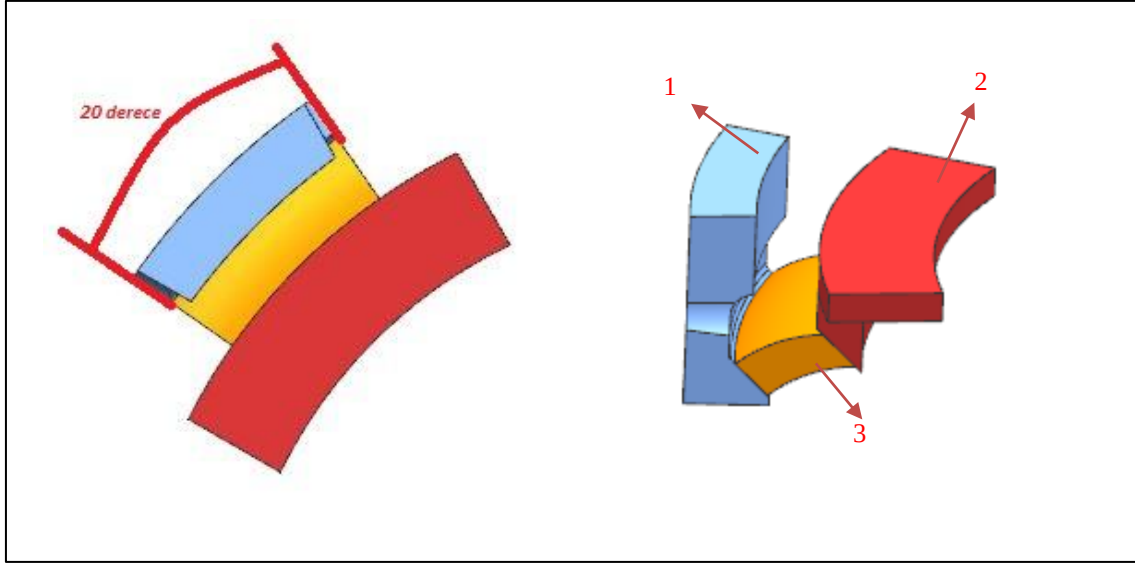
Şekil 4.3. Eksenel yöndeki geometrik kısıtlar

Titreşim yalıtıcı tasarımı yapılırken bu geometrik kısıtlar göz önüne alınacaktır. Buna göre yasaklı alan olarak tanımlanan alanlara hiçbir şekilde bir parça ilavesi veya yerleşimi yapılamamaktadır.

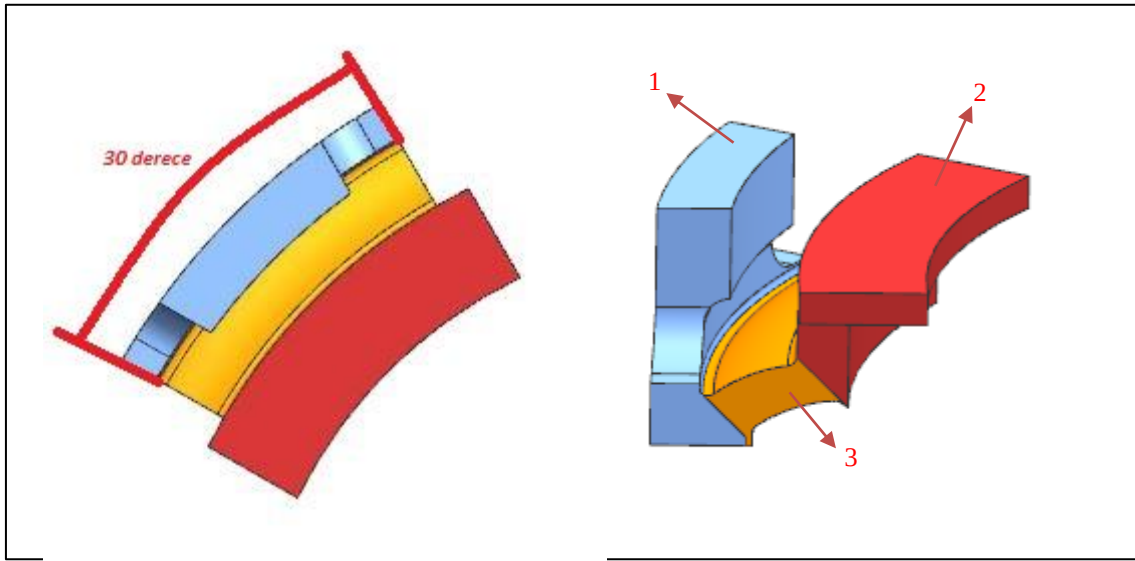
Kullanılan aviyonik birimin ve yerleşimin yapılabileceği hacim göstermiştir ki bu kısıtlar altında standart geometriye sahip bir titreşim yalıtıcının kullanılması mümkün değildir. Tüm bunlar, birim ve yerleşimde kullanılabilecek özgür hacim göz önüne alınarak geometriye özel farklı bir titreşim yalıtıcı tasarımı yapılmasını zorunlu kılmıştır.

4.2. Titreşim Yalıtıcı Mekanik Tasarımı

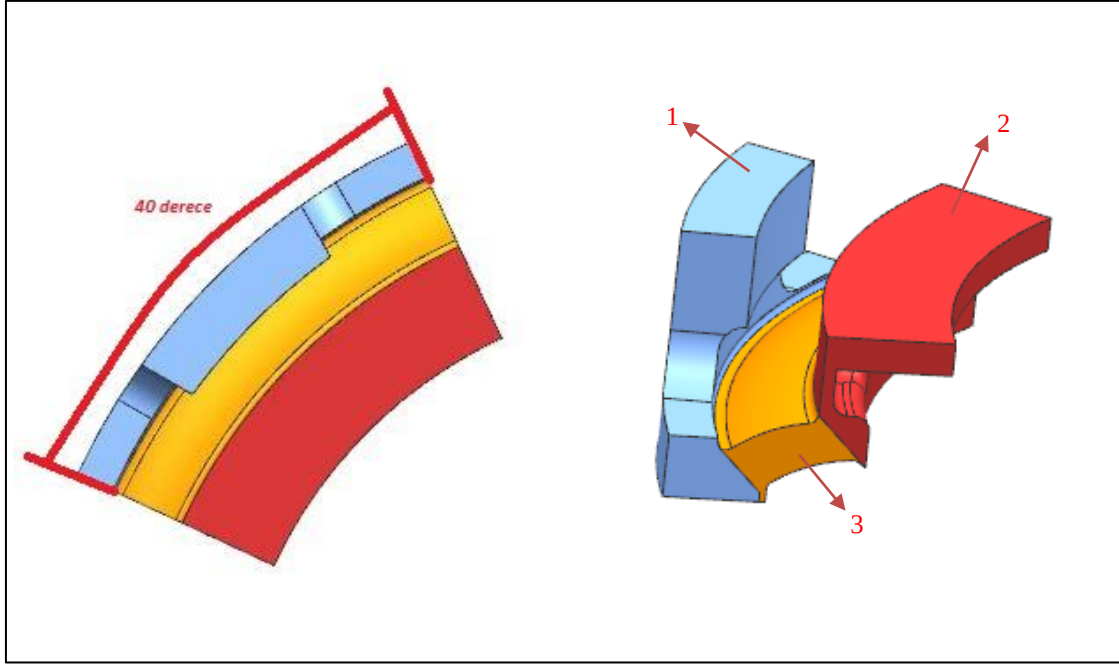
Aviyonik birimin kullanılacağı yer ve yerleşimi göz önüne alınarak 3 adet konsept tasarım gerçekleştirilmiştir. Aviyonik birim kısıtlı bir hacme yerleştiğinden titreşim yalıtıcıyı da yine bu kısıtlı hacim sınırlandırmaktadır. Buna göre yapılan tasarım çalışmaları Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Aviyonik birimin merkezinden geçen eksene göre 20° mekanik ara yüze sahip tasarım

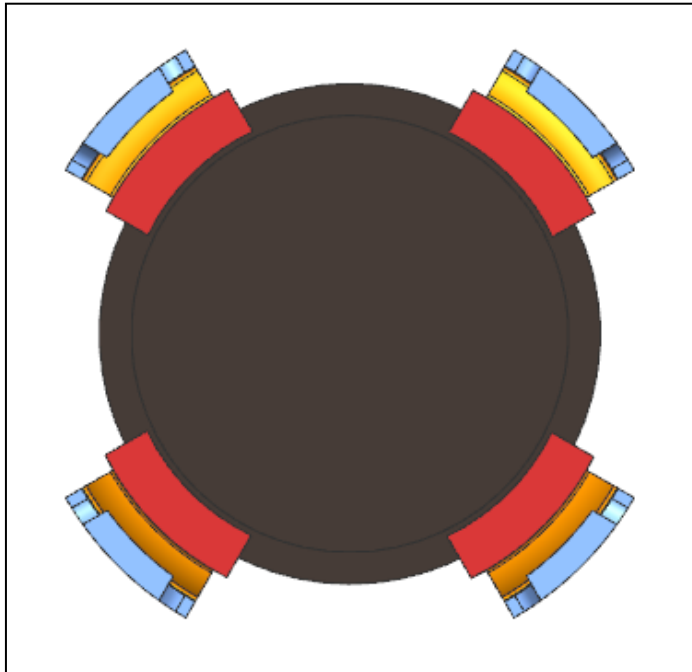


Şekil 4.5. Aviyonik birimin merkezinden geçen eksene göre 30° mekanik ara yüze sahip tasarım



Şekil 4.6. Aviyonik birimin merkezinden geçen eksene göre 40° mekanik ara yüze sahip tasarım

Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da görüldüğü gibi bağlantı ara yüzleri değişmeyecek şekilde 3 adet farklı konsept tasarım yapılmıştır. Bu yalıtıcıların her biri aviyonik birim etrafına birbirleri ile 90 derecelik açılar yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Titreşim yalıtıcıların aviyonik birim üzerindeki yerleşimi Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



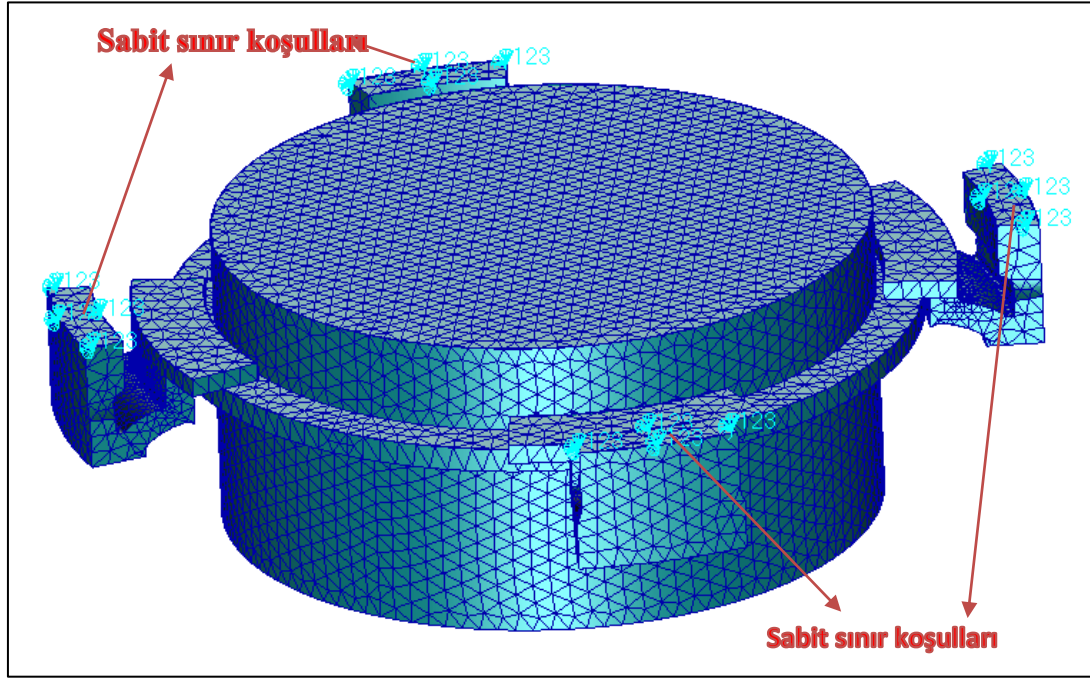
Şekil 4.7. Titreşim yalıtıcıların aviyonik birim üzerindeki yerleşimi

Yukarıdaki şekillerde görülen titreşim yalıtıcılara ait 1 ve 2 numaralı kısımlar hafifliği ve yeterli mukavemet sağlayabilmesinden dolayı havacılık imalatlarında da sıklıkla kullanılan Al6061 olarak planlanmış mekanik kısımlardır. Yalıtıcı mekaniklerinin her üçünün de bağlantı ara yüzleri entegrasyon kolaylığı için aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Mekanik kısımların arasındaki 3 numaralı kısım ise titreşim yalıtımını sağlayan elastomer kısımdır.

Çevresel çalışma şartları ve geometrik kısıtlar göz önüne alınarak 3 farklı sertlikte silikon malzeme ile 3 farklı geometriye sahip titreşim yalıtıcı konsept tasarımı tamamlanmıştır. Yapılan bu tasarımların performanslarının incelenmesi için sayısal modellemelerinin yapılması ve bu modelleme çalışmalarının doğrulanabilmesi için de testlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

5. SAYISAL MODELLEME

Tamamlanmış konsept tasarımın analizleri için kurum bünyesinde bulunan Msc. Patran ve Msc. Marc yazılımları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile aviyonik birim ve buna bağlı olan titreşim yalıtıcıların analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Patran’da modelin çözüm ağı, sınır koşulları, yükleme koşulları ve metal kısımların alüminyum malzeme tanımlaması yapılmıştır. Oluşturulan çözüm ağı Şekil 5.1’te gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Msc. Patran yazılımı kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar ağı

Sayısal çözüm ağında aviyonik birim ve titreşim yalıtıcılar 3B olarak modellenmiştir. Yalıtıcı mekanikleri alüminyum malzemenin mekanik özellikleri ile tanımlanmıştır. Çözüm kolaylığı açısından da aviyonik birim gerçek durumdaki kütle ve kütle merkezi değerleri göz önüne alınarak alüminyum malzeme mekanik özellikleri ile tanımlanmıştır. Titreşim yalıtıcıya kıyasla aviyonik birim üzerinde oluşacak deformasyon çok küçük olacağı için, titreşim hareketi açısından, analiz sonuçlarında karşılaştırılacak ağ örgü noktalarındaki davranış rijit cisim hareketi olarak kabul edilebilir. Tanımlanan alüminyum malzeme özellikleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Analizde kullanılan alüminyum malzeme mekanik özellikleri

Elastik modül (MPa)	Poisson oranı	Yoğunluk (kg/mm^3)
70000	0,33	$2,7 \times 10^{-9}$

Parçalar arasında herhangi bir temas mekaniği ilişkisi oluşturulmamıştır. Sonlu eleman ağında parçaların birbiri ile temas ettikleri alanlar tek bir yüzey gibi tanımlanmış ve böylece parçaların birbiri ile yapışık olduğu programa anlatılmıştır. Yalıtıcının üst sisteme bağlandığı noktalarda sınır koşulları her üç ekseninde de hareketsiz yani sabit olarak tanımlanmıştır (Bknz. Şekil 5.1).

Sonlu eleman ağı oluşturmak için 3B düzgün dörtyüzlü (*ing. tet10*) elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanların eleman boyutları 5 mm olarak tanımlanmıştır.

Patrandı sınır koşulları, çözüm ağı ve mekanik özellikler tanımlandıktan sonra doğrusal olmayan harmonik analizleri yapmak için uygun formatta oluşturularak Marc programında girdi olarak kullanılmıştır.

Marc yazılımının elastomer malzeme tanımlaması için barındırdığı malzeme kartları Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Msc.Marc viskoelastik malzeme kartları

Elastic-Plastic isotropik
Elastic-Plastic orthotropic
Elastic-Plastic anisotropik
Rigid-Plastic
Hyperelastic
Mooney
Hyperelastic anisotropik
Ogden
Foam
Arrude-Boyce
Gent
Marlow
Shape Memory

Çizelge 5.2’de verildiği gibi viskoelastik malzeme davranışı gösteren 13 malzeme kartı kullanılabilmektedir.

Test imkanlarının elverişliliği göz önüne alınarak DMA analizlerinden elde edilen kayıp ve depolama modüllerinin girdi olarak kullanılabildiği ‘Elastic-Plastic Isotropic’ malzeme kartı ile elastomer malzeme tanımlamaları yapılmıştır. Doğrusal olmayan malzeme tanımında kullanılan elastik özellikler Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Doğrusal olmayan malzeme tanımında kullanılan elastik özellikler

Elastik modül (MPa)	Poisson oranı	Yoğunluk (kg/mm^3)
DMA analizinden elde edilen en yüksek elastik modül değeri	0,5	$1,2 \times 10^{-9}$

Çizelgede görüldüğü gibi elastik modül değeri ilgili elastomer malzemenin ilgili sıcaklık ve yükleme şartı altında tabi tutulan DMA analizleri sonucunda elde edilen en yüksek değeridir. Poisson oranı ve yoğunluk değerleri her ne kadar silikon içerisindeki katkı miktarı ve çeşidi ile değişse de verilen tablo değerleri literatürden alınan standart silikon malzemelere ait malzeme özellikleridir [43-46].

‘Elastic-Plastic Isotropic’ malzeme tanımlaması için üçüncü bölümde bahsedilmiş olan, DMA analizinden elde edilen frekansa bağlı storage modül ve frekansa bağlı loss modül değerleri yazılımın içine girilmiştir. Burada DMA testleri 100 Hz’e kadar yapılabildiği için 100-300 Hz arasında malzeme özellikleri doğru uydurma yapılarak tabloya eklenmiştir.

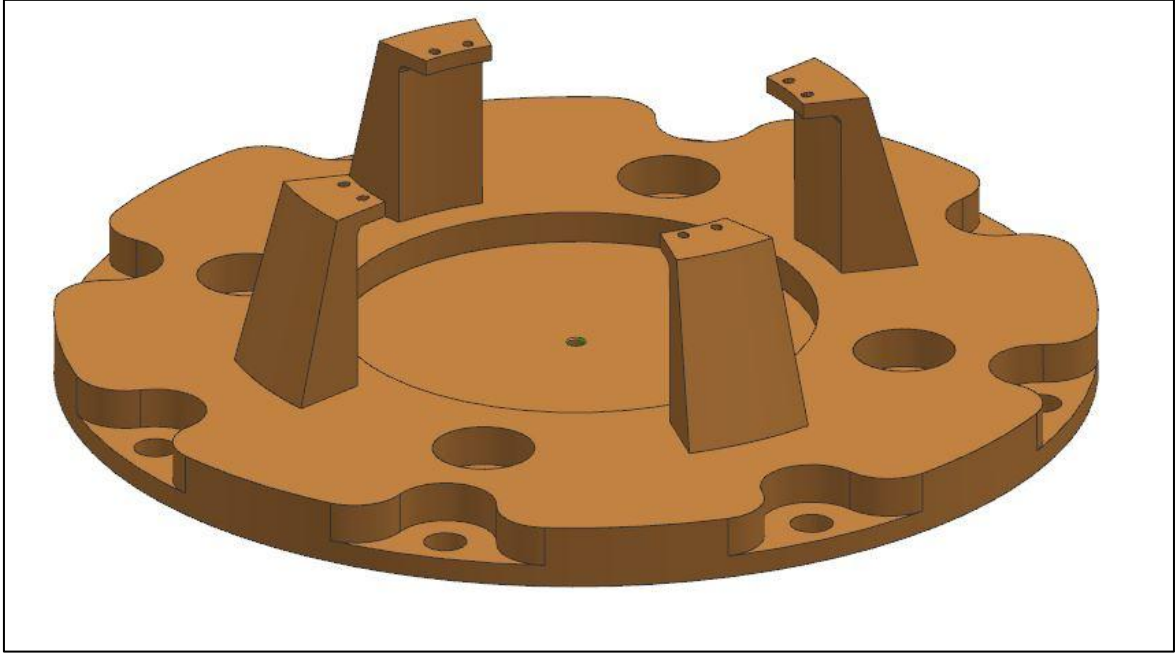
Marc da yapılan analiz bir harmonik cevap analizi olup yalıtıcının dinamik karakteristiğini hesaplamak için sınır koşullarından yalıtıcıya askeri standartlarda yer alan çevresel titreşim maruziyeti profilleri göz önüne alınarak 1 g (9810 mm/s^2) ivme yükü harmonik olarak uygulanmıştır. Analiz 0-300 Hz arasında ve 1’er Hz frekans aralıklarında koşturulmuştur. Çünkü titreşim yalıtıcının aviyonik birim ile birlikte kullanıldığı üst bütünde sahip olması istenen doğal frekans değeri 100-300 Hz arasındadır. Bu yüzden daha yüksek frekanslarda bir inceleme yapmaya gerek görülmemiştir.

Analizler tamamlanmış konsept tasarımda belirtilen ve bölüm 4.2’de verilen 3 farklı titreşim yalıtıcı geometrisi, çevresel şartlar sebebi bölüm 3’te açıklanmış ve bölüm 3.2’de DMA analizi gerçekleştirilmiş 3 farklı sertlikte silikon malzeme özellikleri ve çevresel koşullar göz önüne alınarak -40, 20 ve 40°C sıcaklık değerlerinde yapılmıştır.

Harmonik cevap analiz sonuçları frekansa bağılı yer değıştirme değerlerinden oluşmaktadır. Sonuçların titreşim yalıtımı performansını yansıtmaları için hesaplanan yer değıştirme değerinden ivme değerine geçilmiştir. Analiz sonucu frekansa bağılı ivme değerleri olarak grafikleştirilmiştir.

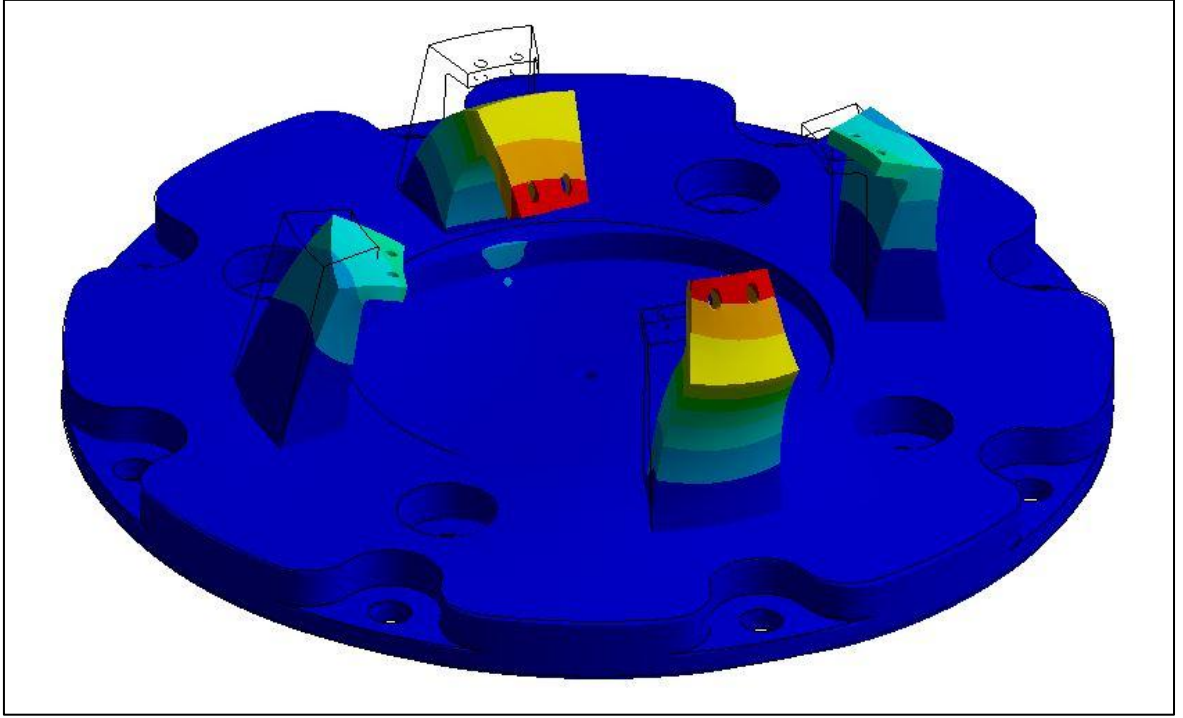
6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu testler TÜBİTAK SAGE Çevre Şartları Altyapısında gerçekleştirilmiştir. Analizleri doğrulamak ve titreşim yalıtıcının aviyonik birim üzerindeki yalıtım performansını gözlemlemek için iki farklı sınır koşulu ile sinüs tarama testleri yapılmıştır. Her iki testte de kullanılmak üzere bir fiktür tasarımı yapılmıştır. Kullanılan modal sarsıcı, titreşim tezgahı kapasitesi ve test edilecek birimin ağırlık, kütle merkezi ve atalet değerleri göz önüne alınarak tasarım çalışması gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan fiktür Şekil 6.1’de gösterilmiştir.

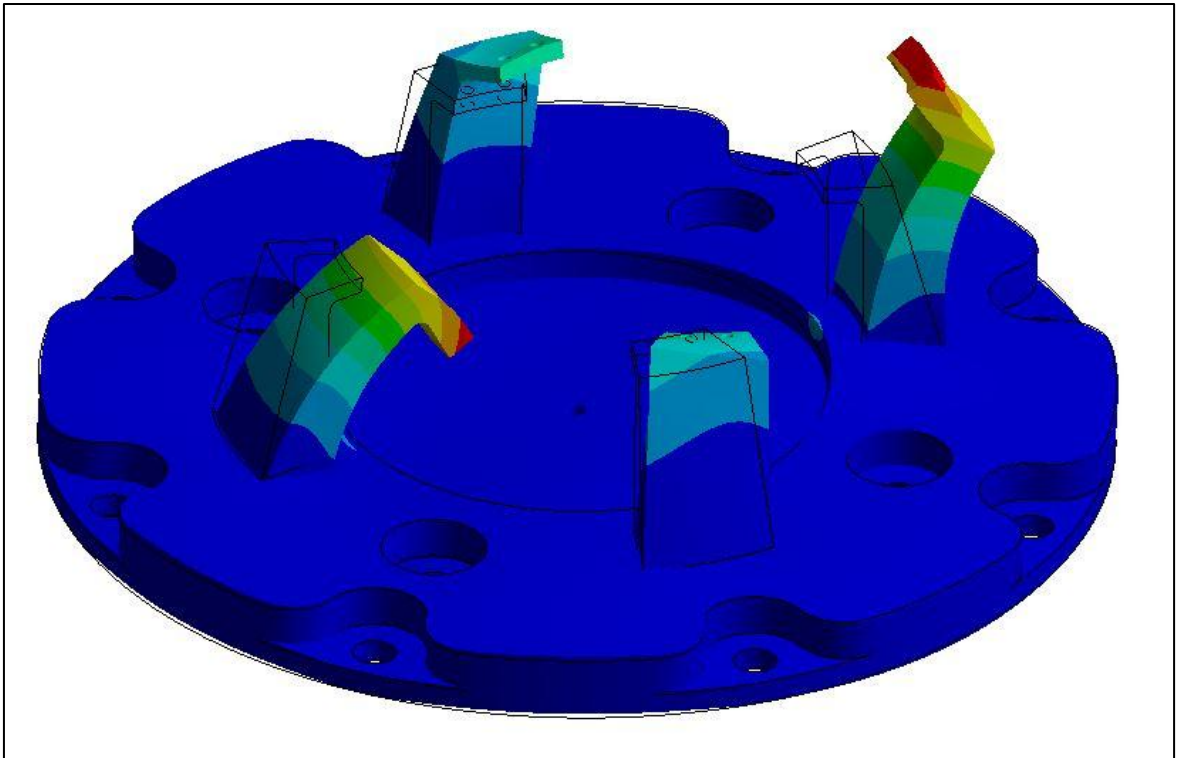


Şekil 6.1. Testlerde kullanılan fiktür

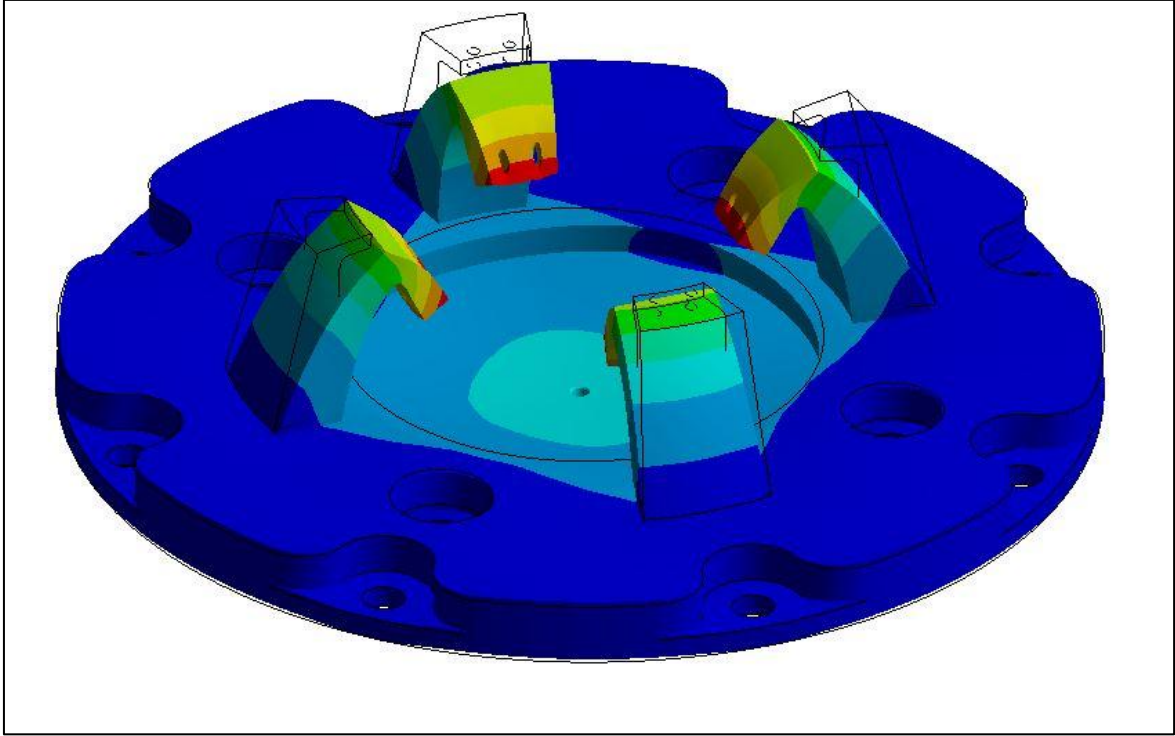
Fiktür tasarımında test edilecek aviyonik birimin kütle ve atalet değerleri de hesaba katılmıştır. Birim rijit kütle olarak kabul edilip sonlu elemanlar analizinde noktasal kütle olarak bağlantı arayüzleri üzerinde tanımlanmıştır. Sınır koşulları ise fiktürün titreşim tezgahına bağlanacağı ara yüzden 6 serbestlik derecesi de kısıtlanarak (*ing.fixed support*) oluşturulmuştur. Hesaplar sonucunda, tasarlanan fiktürün ilk 3 mod şekli Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Fikstürün birinci mod şekli



Şekil 6.3. Fikstürün ikinci mod şekli



Şekil 6.4. Fikstürün üçüncü mod şekli

Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda fikstürün sahip olduğu ilk 6 doğal frekans Çizelge 6.1’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 6.1. Tasarlanan fikstürün ilk altı doğal frekansı

Mod Numarası	Doğal Frekans(Hz)
1	857,02
2	857,35
3	1177,4
4	2165
5	2541,5
6	2547

Test kalemi 6.5 kg’dır. Bu ağırlıkta bir test kalemi için 0-2000 Hz frekans aralığında yapılacak testlerde fikstürün 800 Hz altında doğal frekansa sahip olmaması beklenir. 800-1500 Hz frekansları arasında en fazla 4 doğal frekansa ve 1500-2000 Hz arasında ise en fazla 3 doğal frekansa sahip olması beklenir [47]. Dolayısıyla yapılacak olan titreşim testleri için bu fikstür geometrik ve teorik olarak uygundur.

6.1. Serbest-Serbest Sınır Koşulu ile Sinüs Tarama Testleri

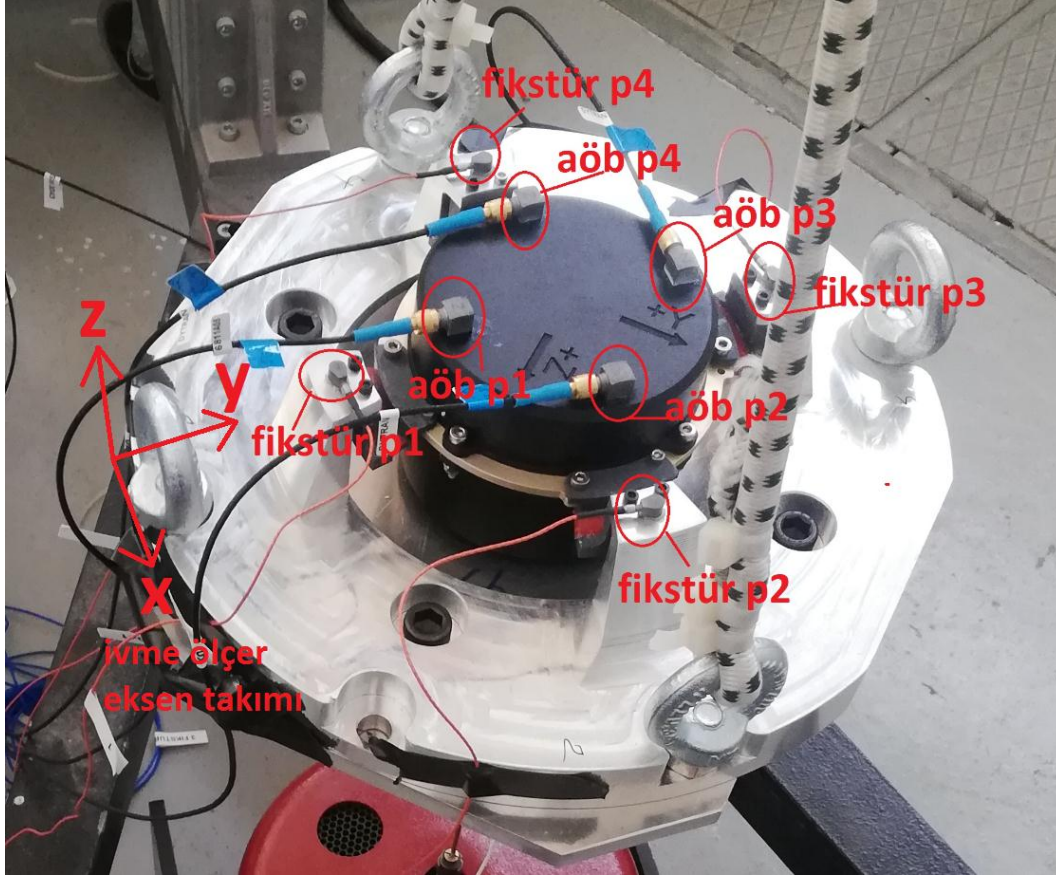
Serbest-serbest sınır koşulu ile sinüs tarama testleri, aviyonik birimin kullanılacağı fonksiyonel sistemde belirlenen titreşim profillerine göre maruz kalacağı ve test edileceği koşullardan önce hızlı bir geri besleme ve öngörü oluşturması için kuvvet kontrollü olarak yapılmış testlerdir. Hem kalıp maliyetinin önüne geçmek hem de süreyi etkili kullanmak için burada yapılan ilk çalışmalarda elastomer kısım metal mekaniğe Sil-poxy isimli yapıştırıcı ile yapıştırılarak bir araya getirilmiştir. Yapılan kuvvet kontrollü sinüs tarama testleri ve analiz sonuçları neticesinde karar verilen geometriler ile gerçek titreşim profilleri kullanılarak testler tekrar edilmiştir.

Oluşturulan test düzeneği Resim 6.1’de gösterilmiştir.



Resim 6.1. Serbest-Serbest sınır koşulu ile sinüs tarama testi düzeneği

Testlerde harmonik yüklemeleri uygulamak için MB Dynamics firmasının Modal110 isimli modal sarsıcısı kullanılmıştır. Bu sarsıcı 500 N genlikte kuvvet ile yükleme oluşturabilme kapasitesine sahiptir. Çalışma zarfı 38 mm'dir. Test sırasında ölçüm için Dytran firmasının 4 adet Dytran 3273A2 model üç eksenli ivme ölçer, Dytran firmasının 4 adet Dytran 3225M23 tipi tek eksenli ivme ölçer, 1 adet dizüstü bilgisayar, 1 adet amfi ve 1 adet Siemens Scadas veri toplama cihazı kullanılmıştır. Siemens'in LMS yazılımı ise yükleme kontrolü için kullanılmıştır. Testler kontrol kolaylığı açısından kuvvet kontrollü olarak yapılmıştır. Serbest-serbest sınır koşulları altında 20 Hz ile 300 Hz arasında; 1 N'dan başlayarak 100 N'a kadar farklı kuvvetlerde sinüs taraması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Resim 6.2'de test fikstürü ve aviyonik birim üzerindeki sensör yerleşimi görülmektedir. Sensör yerleşimi yapılırken yine şekil üzerinde tanımlanmış olan eksen takımları dikkate alınarak modal sarsıcı ile dikey yöndeki zorlamanın kontrolü amacıyla fiktür üzerine 4 adet tek eksenli ivme ölçer yerleştirilmiştir. Aviyonik birim üzerine yerleştirilen ivme ölçerlerde de eksen takımının yanı sıra benzetim sonuçlarının doğrulanabilmesi için benzetimlerde kullanılan ağ örgüsü ile aynı noktalara denk gelecek şekilde sensör yerleşimi yapılmıştır.



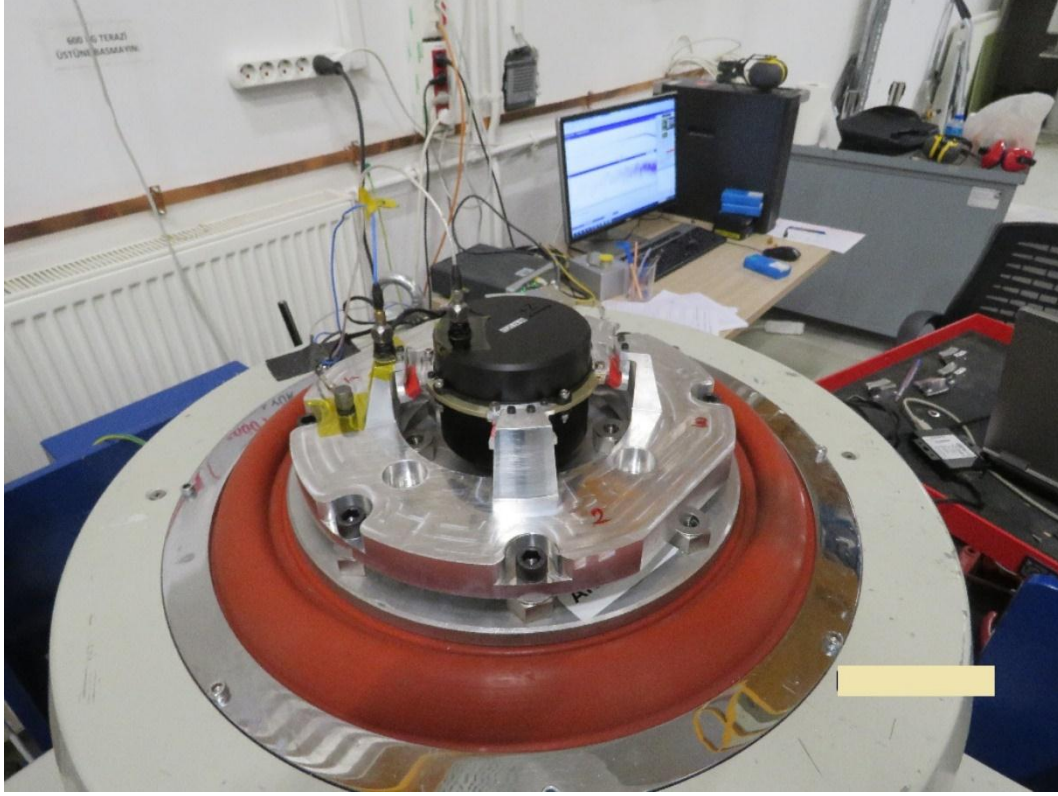
Resim 6.2. Serbest-Serbest sınır koşulu ile yapılan testlerde referans alınan eksen takımı ve ilgili tanımlamalar

Resim 6.2’de görüldüğü gibi aviyonik birimin eksenel yöndeki eksenini Z, radyal yöndeki tanımlamaları X ve Y eksenlerini ifade etmektedir. Burada sadece Z yönünde dinamik yükleme verilerek bu yöndeki davranış incelenmiştir.

6.2. Sabit-Serbest Sınır Koşulu ile Sinüs Tarama Testleri

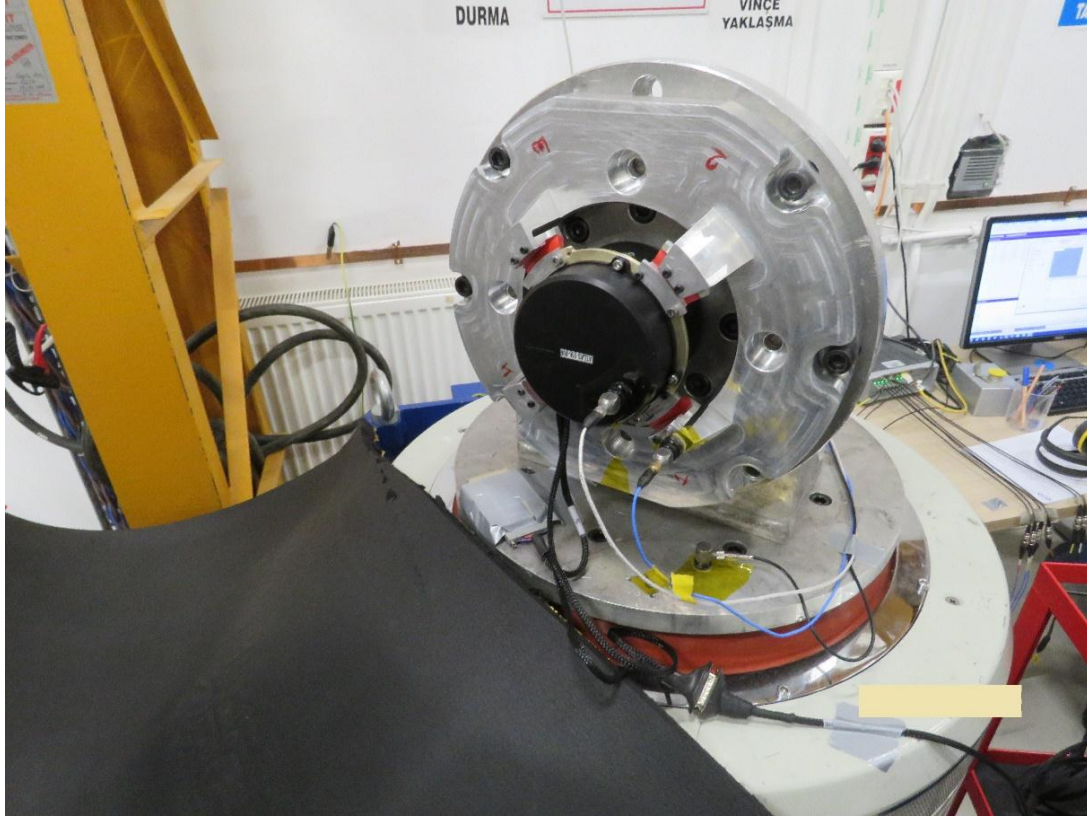
Sabit serbest sınır koşullu testlerde tek yönlü Dongling Tech firmasının 20 kN yük kapasiteli ES-20LS3-340 model numaralı cihazı kullanılmıştır. Serbest-serbest sınır koşulu testlerinde kullanılan aynı fiksör bu testlerde sarsıcı ara yüzlerinden bağlanılarak test gerçekleştirilmiştir. Testte ölçümler için iki adet KISTLER marka 8763B050BT model numaralı üç eksenli ivmölçeri, 1 adet Bruel&Kjaer marka 4533B4 model numaralı üç eksenli ivmölçeri, bir adet Siemens Scadas veri toplama cihazı ve 1 adet bilgisayar kullanılmıştır. Siemens LMS yazılımı giriş ve çıkış bilgilerinin toplanması için kullanılmıştır. Verilen yükün kontrolü fiksörün üzerinde titreşim yalıtıcıya bağlı en yakın

yerdeki ivmeölçerden yapılırken ölçüm ise aviyonik birimin üzerinden alınmıştır. Z eksenini yönünde yapılmış olan testler için kullanılmış olan test bütünü Resim 6.3’de gösterilmiştir.



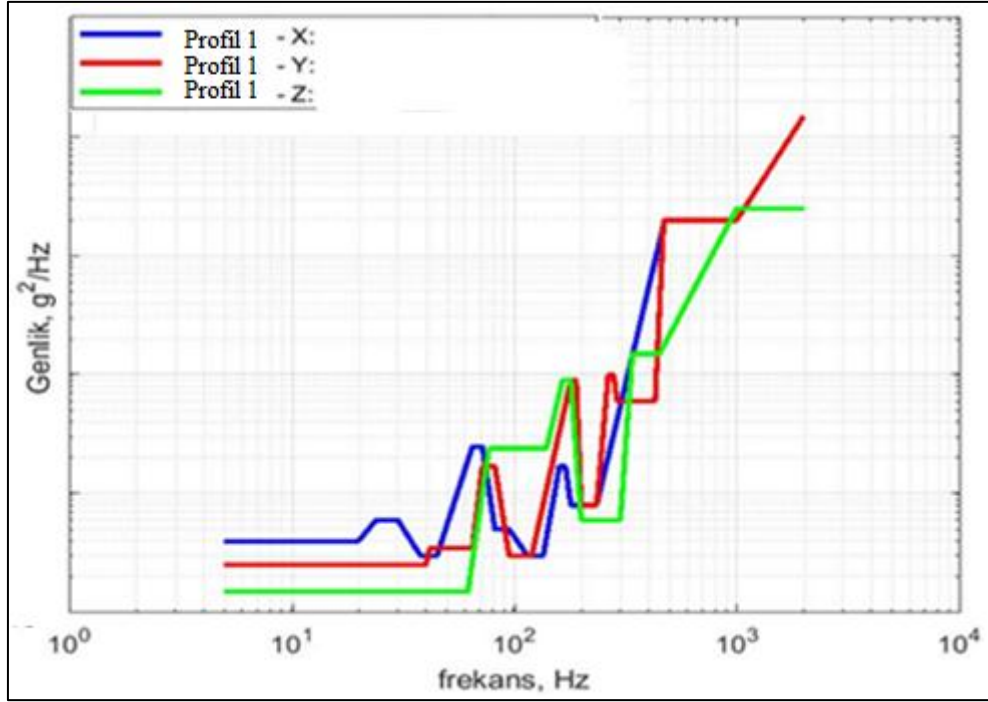
Resim 6.3. Z eksenini yönünde sabit serbest sınır koşulu ile gerçekleştirilen test bütünü

Aynı testler X ve Y eksenini yönündeki testler için de gerçekleştirilmiştir. Z eksenini yönündeki bütünden farklı olarak yüklemenin istenen yönde verilebilmesi için, L şeklinde bir fikstürden faydalanılmıştır. X ve Y yönü testi için kullanılmış olan test bütünü Resim 6.4’de gösterilmiştir.



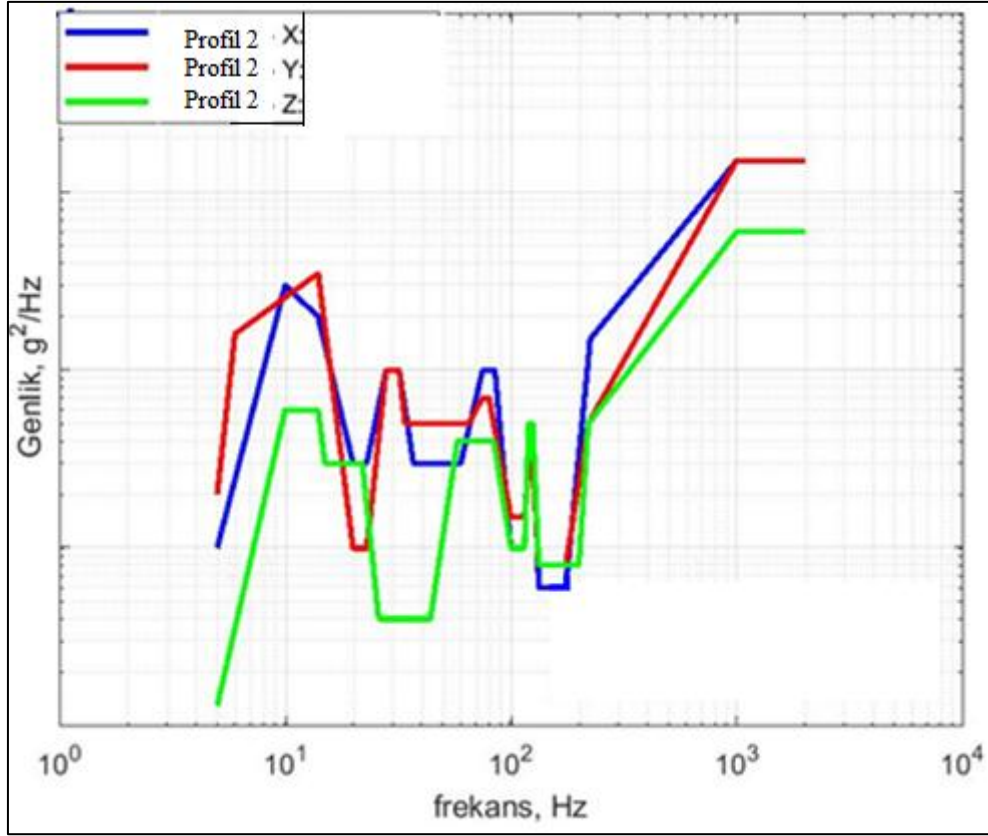
Resim 6.4. X ve Y eksenlerinde sabit serbest sınır koşulu ile gerçekleştirilen test bütünü

Testlerde aviyonik sistemler için kullanılan “Profil 1” ve “Profil” 2 titreşim profilleri eksenel ve radyal yönlerde kullanılmış, kullanılan bu profiller sırasıyla Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’de gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Testlerde kullanılan X, Y ve Z yönü Profil 1 titreşim yükleri

Şekil 6.5’de görüldüğü gibi Profil 1 yükleri için aviyonik birim eksenel yön olan Z ekseninde 1,75 grms seviyesinde bir titreşim yüküne maruz kalmaktadır. Radyal yönde asal koordinat sistemine göre X ve Y yönlerinde ise sırasıyla 2,88 grms ve 2,87 grms seviyelerindeki titreşim yüklerine maruz kalmaktadır.



Şekil 6.6. Testlerde kullanılan X, Y ve Z yönü Profil 2 titreşim yükleri

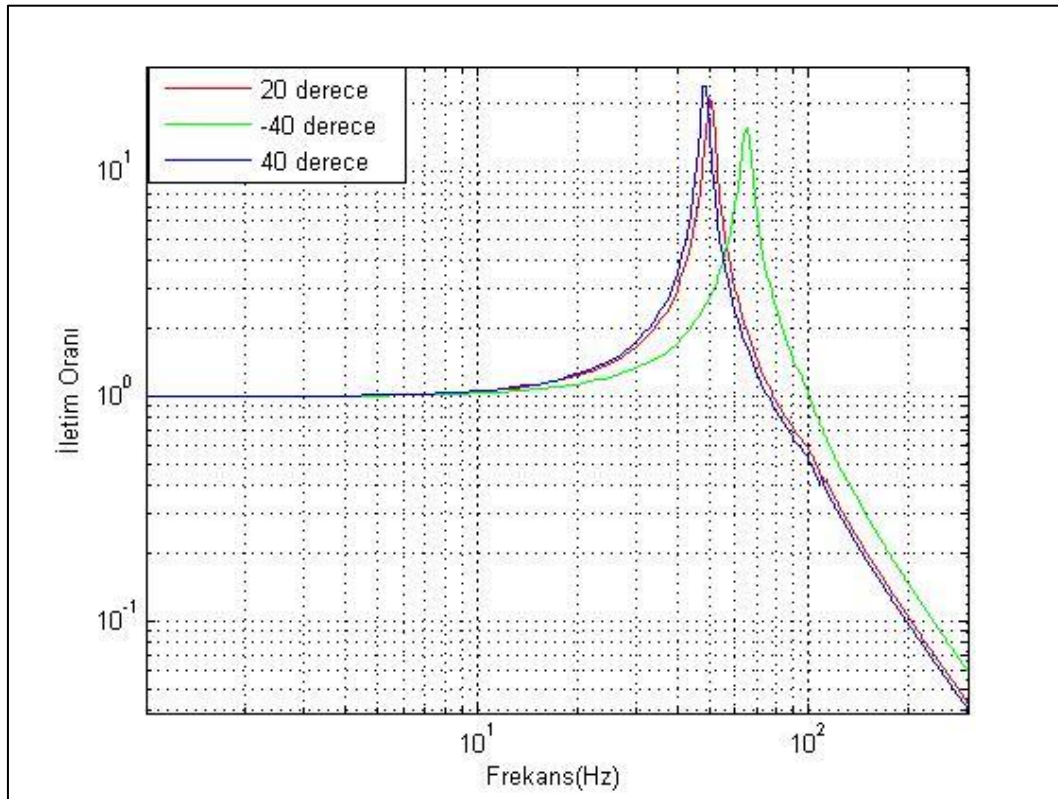
Şekil 6.6'de görüldüğü gibi Profil 2 yükleri için aviyonik birim, eksenel yön olan Z ekseninde 0,91 grms seviyesinde bir titreşim yüküne maruz kalmaktadır. Radyal yönde asal koordinat sistemine göre X ve Y yönlerinde ise sırasıyla 1,44 grms ve 1,40 grms seviyelerindeki titreşim yüklerine maruz kalmaktadır.

7. BULGULAR, YORUMLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan tüm analizlerin ve testlerin sonuçları verilmiştir. Sonuçlar kendi içinde incelenerek en sonunda analiz ve test sonuçları birbirleri ile kıyaslanmıştır.

7.1. Analiz Bulguları

20° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının -40°C, 20°C ve 40°C için yapılmış olan analiz sonuçları tek bir grafikte Şekil 7.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. 20° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

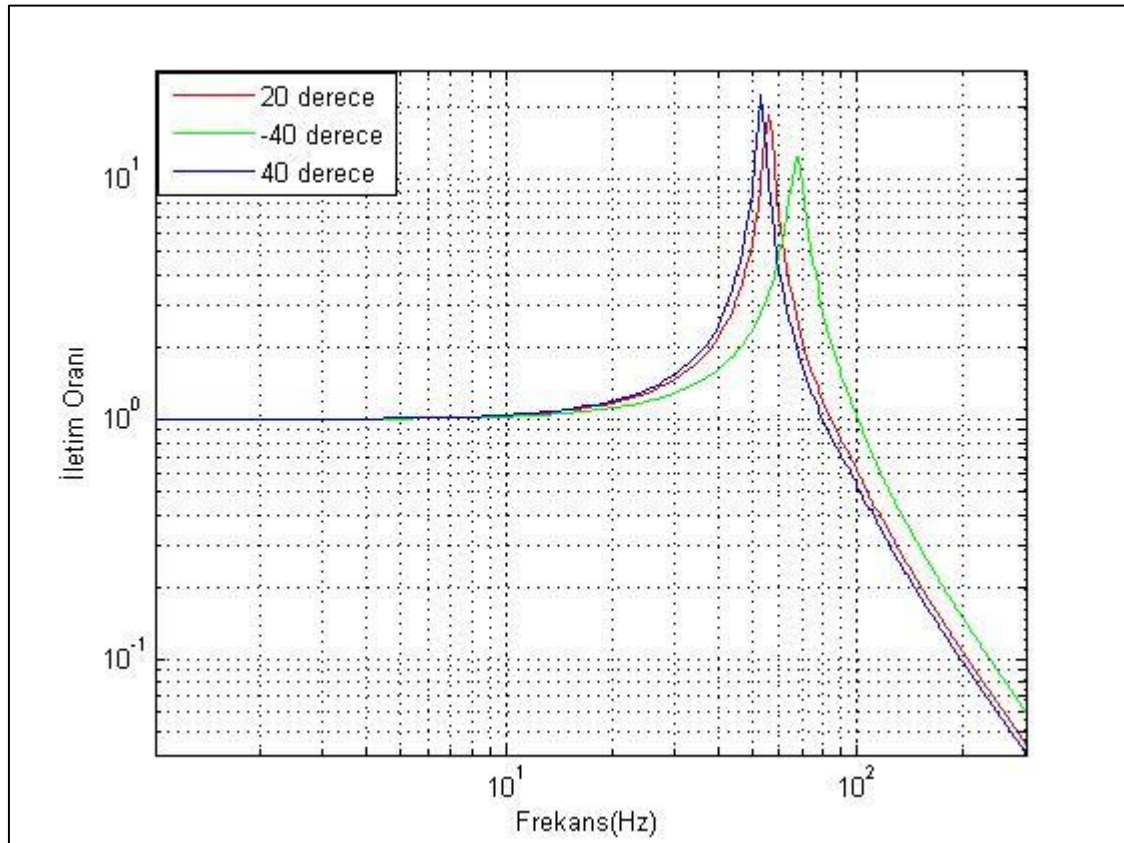
Şekil 7.1’de gösterildiği gibi 20° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının analiz sonuçlarına göre, sıcaklık azaldıkça silikonun katılığı arttığı için titreşim yalıtıcının aviyonik birime bağlı olduğu durum için, sahip olduğu doğal frekanslar artarken buna bağlı olarak iletim oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları özet olarak Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. 20° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A malzeme kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	-40°C		20°C		40°C	
20°	Silikon 50 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		65 Hz	15,7	50 Hz	20,82	49 Hz	24

Tasarım kriteri olarak, kullanılması gereken titreşim yalıtıcının doğal frekansının 100 Hz'in üzeri bir değere sahip olması beklendiği için bu geometri ve silikon malzemesi titreşim yalıtımı için uygun değildir.

20° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının -40°C, 20°C ve 40°C için yapılmış olan analiz sonuçları tek bir grafikte Şekil 7.2' de gösterilmiştir.



Şekil 7.2. 20° mekanik ara yüz ve silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Şekil 7.2'de gösterildiği gibi 20° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının analiz sonuçlarına göre, sıcaklık azaldıkça

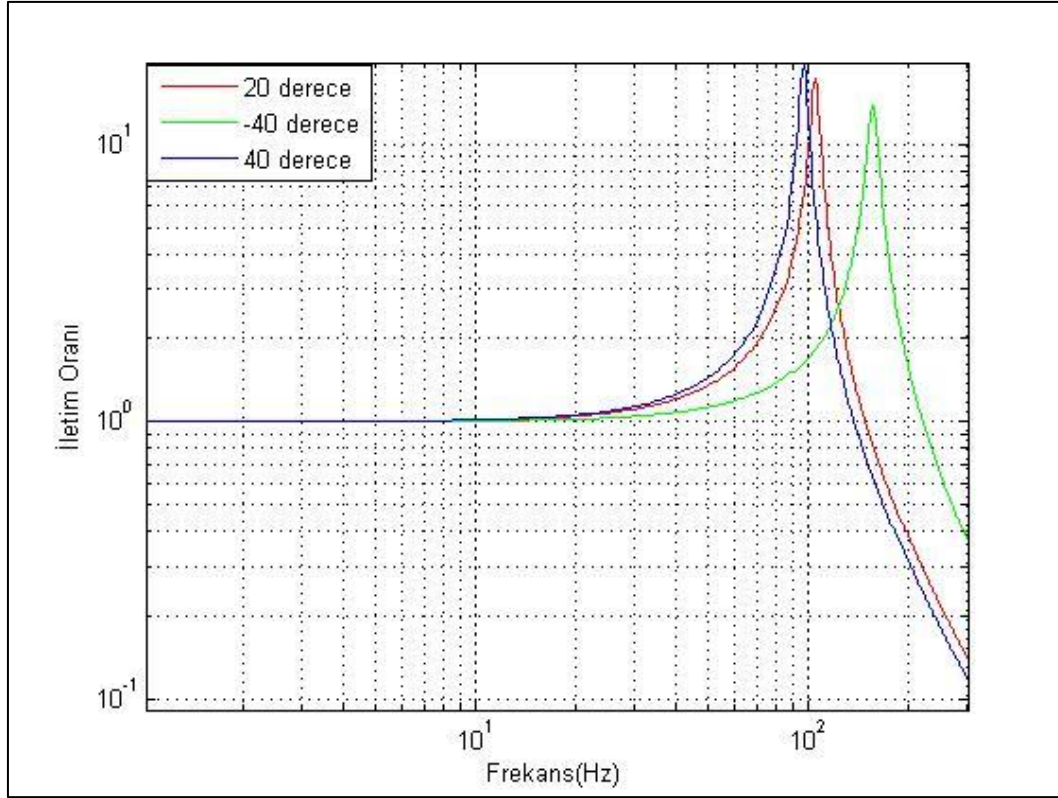
silikonun katılığı arttığı için titreşim yalıtıcının aviyonik birime bağlı olduğu durum için sahip olduğu doğal frekanslar artarken buna bağlı olarak iletim oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları özet olarak Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. 20° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	-40°C		20°C		40°C	
20°	Silikon 60 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		67 Hz	12,43	56 Hz	18,49	53 Hz	22,46

Çizelge 7.2’de görüldüğü gibi Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış olan titreşim yalıtıcıların doğal frekans değerleri Silikon 50 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıya göre aynı şartlar altında daha yüksek hesaplanmıştır. Buna zıt olarak iletim oranı ise bu yalıtıcıda daha düşük çıkmıştır. Yine de kullanılması gereken titreşim yalıtıcının doğal frekansının 100 Hz’in üzeri bir değere sahip olması beklendiği için bu geometri ve silikon malzemesi titreşim yalıtımı için uygun değildir.

20° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının -40°C, 20°C ve 40°C için yapılmış olan analiz sonuçları tek bir grafikte Şekil 7.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.3. 20° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Şekil 7.3'de gösterildiği gibi 20° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının analiz sonuçlarına göre sıcaklık azaldıkça silikonun katılığı arttığı için titreşim yalıtıcının aviyonik birime bağlı olduğu durum için sahip olduğu doğal frekanslar artarken buna bağlı olarak iletim oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları özet olarak Çizelge 7.3'de verilmiştir.

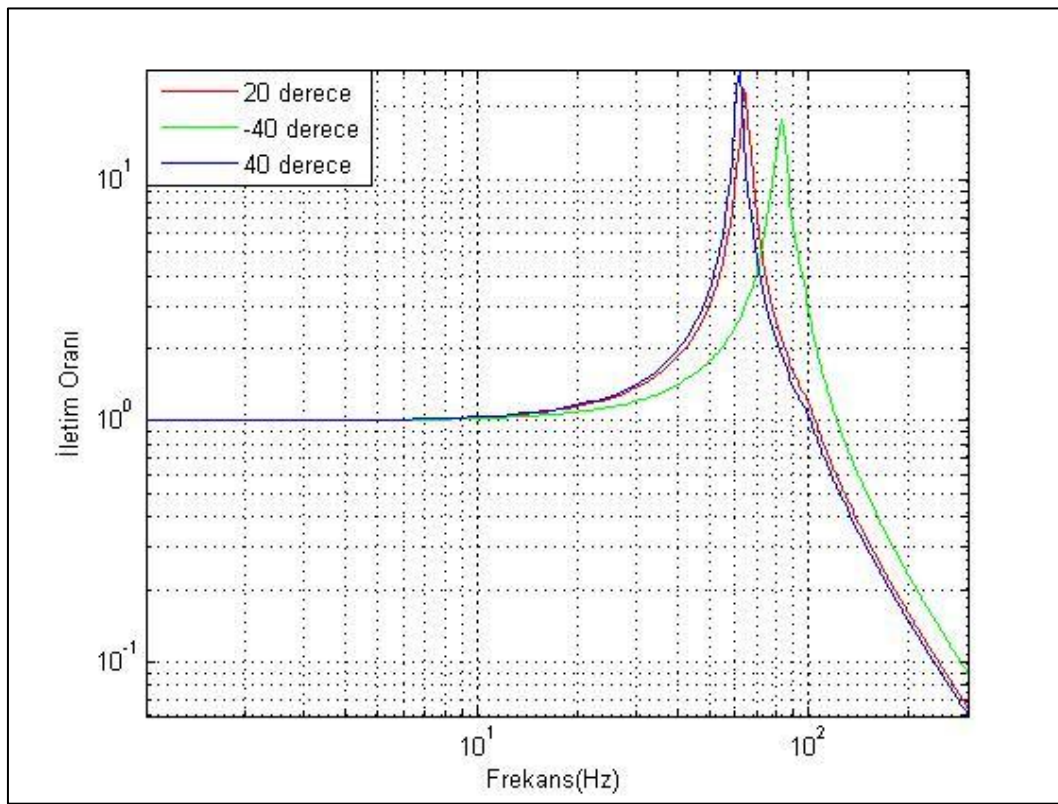
Çizelge 7.3. 20° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	-40°C		20°C		40°C	
20°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		156 Hz	13,90	105 Hz	17,22	97 Hz	19,17

Çizelge 7.3'de görüldüğü gibi Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış olan titreşim yalıtıcıların doğal frekans değerleri Silikon 50 Sh A ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıya göre aynı şartlar altında daha yüksek hesaplanmıştır. Buna zıt olarak iletim oranı ise bu yalıtıcılarda daha düşük çıkmıştır. Titreşim yalıtıcıların 20°C ve -40°C sıcaklıklarda

doğal frekans değerleri 100 Hz'den daha yüksek iken 20°C'de yalıtıcının doğal frekansı 100 Hz'in altındadır. Titreşim yalıtıcının bütün çevre şartlarında 100 Hz üzerinde doğal frekansa sahip olması beklendiği için bu geometri ve silikon malzemesi titreşim yalıtımı için uygun değildir.

30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının -40°C, 20°C ve 40°C için yapılmış olan analiz sonuçları tek bir grafikte Şekil 7.4' de gösterilmiştir.



Şekil 7.4. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Şekil 7.4'de gösterildiği gibi, 20° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A, Silikon 60 Sh A ve Silikon 70 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcıların analiz sonuçlarında olduğu gibi 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcılarında sıcaklık azaldıkça silikonun katılığı arttığı için titreşim yalıtıcının aviyonik birime bağlı olduğu durum için sahip olduğu doğal frekansları artarken buna bağlı olarak iletim oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları özet olarak Çizelge 7.4'de verilmiştir.

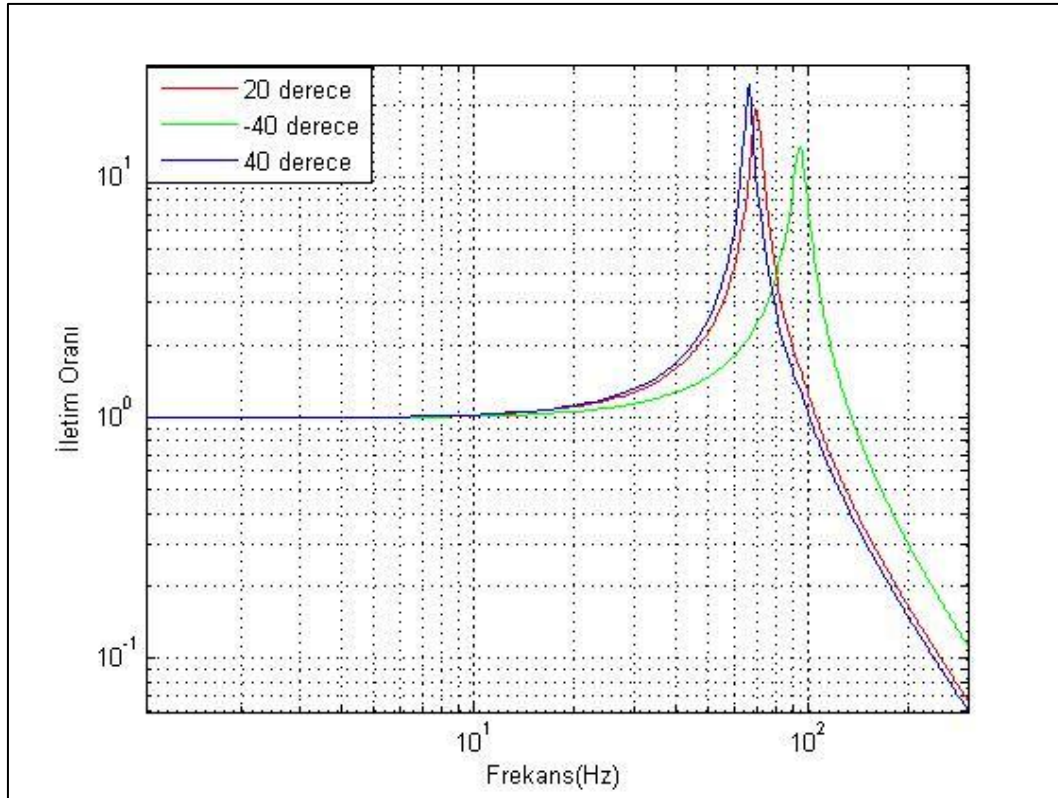
Çizelge 7.4. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	-40°C		20°C		40°C	
30°	Silikon 50 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		82,7 Hz	17,58	63,8 Hz	23,22	61,8 Hz	27,67

Çizelge 7.4’de görüldüğü gibi 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının doğal frekans değerleri sıcaklık arttıkça azalmaktadır. İletim oranları ise sıcaklık arttıkça artış göstermektedir.

Çizelge 7.1’de gösterilen 20° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının analiz sonucuna göre 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının doğal frekans değerleri ve iletim oranları aynı koşullar altında daha yüksek hesaplanmıştır. Sonuç olarak doğal frekans değerleri her 3 sıcaklıkta da 100 Hz’in altında hesaplandığı için bu geometri ve silikon malzemesi titreşim yalıtımı için uygun değildir.

30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının -40°C, 20°C ve 40°C için yapılmış olan analiz sonuçları tek bir grafikte Şekil 7.5’de gösterilmiştir.



Şekil 7.5. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Şekil 7.5'te gösterildiği gibi, 30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının analiz sonuçlarında sıcaklık azaldıkça silikonun katılığı arttığı için titreşim yalıtıcının aviyonik birime bağlı olduğu durum için sahip olduğu doğal frekansları artarken buna bağlı olarak iletim oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları özet olarak Çizelge 7.5'de verilmiştir.

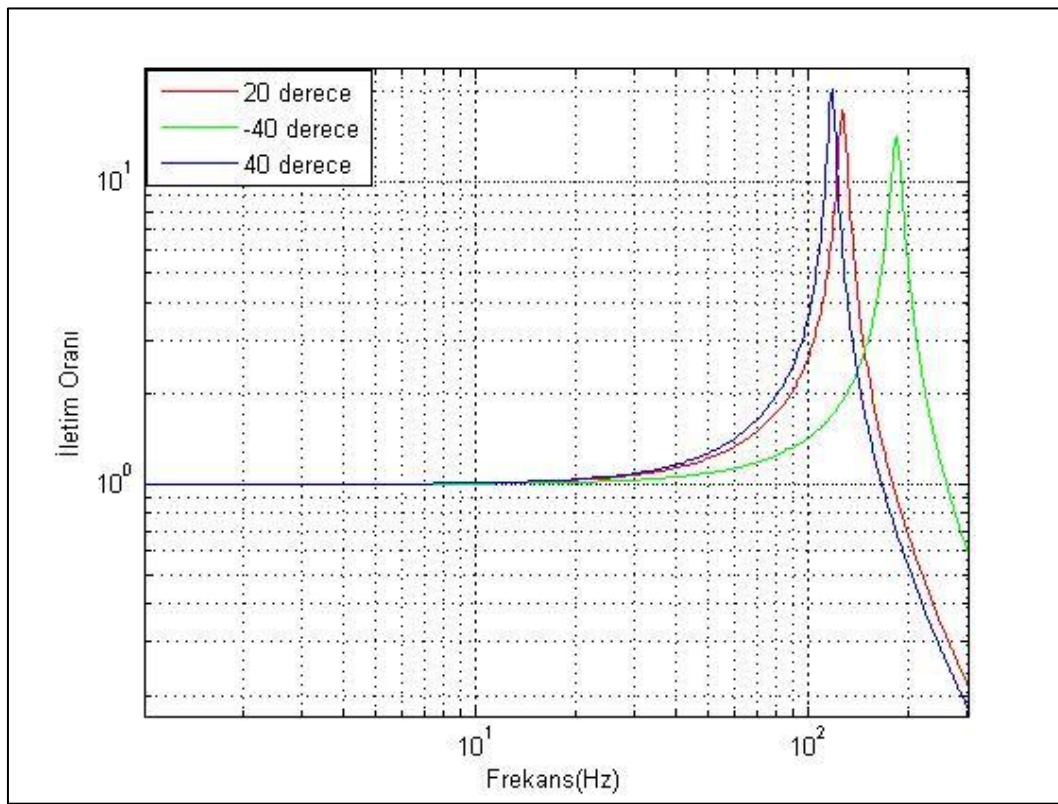
Çizelge 7.5. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	-40°C		20°C		40°C	
30°	Silikon 60 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		94,7 Hz	13,39	69,8 Hz	19,33	66,8 Hz	24,21

Çizelge 7.5'de görüldüğü gibi 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıya kıyasla 30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının doğal frekans değerleri aynı şartlar altında daha yüksek iletim oranları ise daha düşüktür. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının 20°

mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıya kıyas ile doğal frekans değeri ve iletim oranları daha yüksek hesaplanmıştır. Sonuç olarak doğal frekans değerleri her 3 sıcaklıkta da 100 Hz'in altında hesaplandığı için bu geometri ve silikon malzemesi titreşim yalıtımı için uygun değildir.

30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının -40°C, 20°C ve 40°C için yapılmış olan analiz sonuçları tek bir grafikte Şekil 7.6'de gösterilmiştir.



Şekil 7.6. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

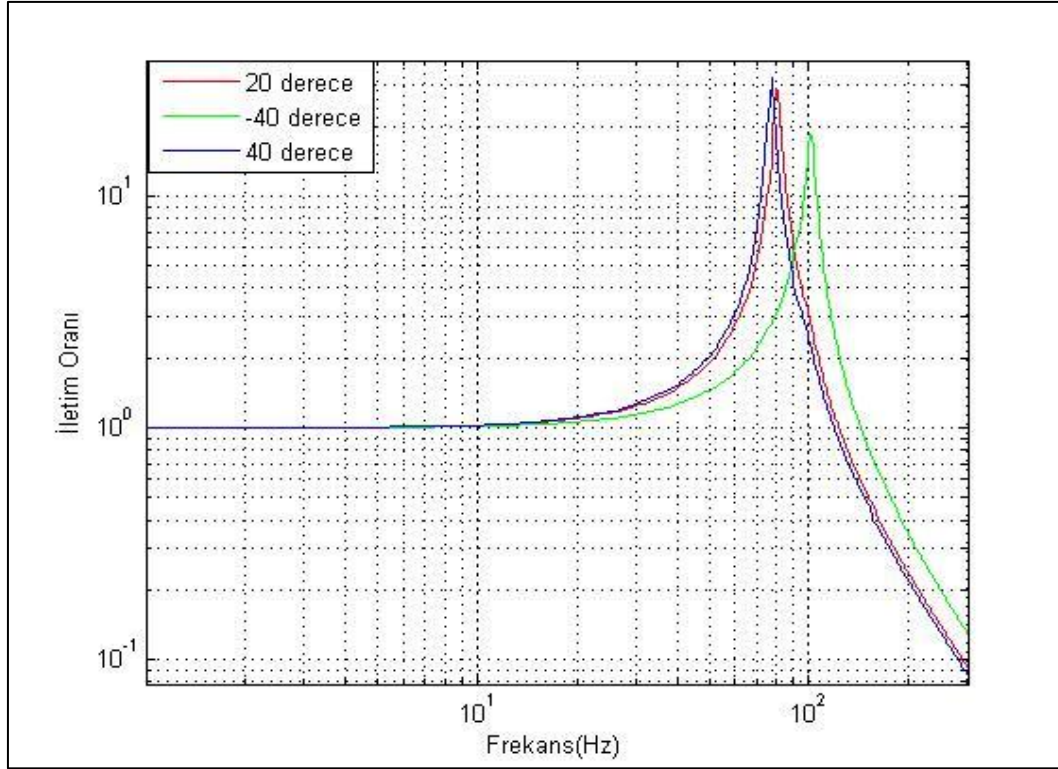
Şekil 7.6'te gösterildiği gibi, 30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının analiz sonuçlarında sıcaklık azaldıkça silikonun katılığı arttığı için titreşim yalıtıcının aviyonik birime bağlı olduğu durum için sahip olduğu doğal frekansları artarken buna bağlı olarak iletim oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları özet olarak Çizelge 7.6'de verilmiştir.

Çizelge 7.6. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	-40°C		20°C		40°C	
30°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		183,4 Hz	14,19	126,6 Hz	17,38	117,6 Hz	20,38

Çizelge 7.6’da görüldüğü gibi 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ve 30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıya kıyasla 30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının doğal frekans değerleri aynı şartlar altında daha yüksek iletim oranları ise daha düşüktür. 30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının 20° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıya kıyas ile doğal frekans değeri ve iletim oranları daha yüksek hesaplanmıştır. Sonuç olarak doğal frekans değerleri her 3 sıcaklıkta da 100 Hz’in üzerinde hesaplandığı için bu geometri ve silikon malzemesi titreşim yalıtımı için uygundur.

40° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının -40°C, 20°C ve 40°C için yapılmış olan analiz sonuçları tek bir grafikte Şekil 7.7’de gösterilmiştir.



Şekil 7.7. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Şekil 7.7’de gösterildiği gibi, 20° ve 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A, Silikon 60 Sh A ve Silikon 70 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcıların analiz sonuçlarında olduğu gibi 40° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcılarında sıcaklık azaldıkça silikonun katılığı arttığı için titreşim yalıtıcının aviyonik birime bağlı olduğu durum için sahip olduğu doğal frekansları artarken buna bağlı olarak iletim oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları özet olarak Çizelge 7.7’de verilmiştir.

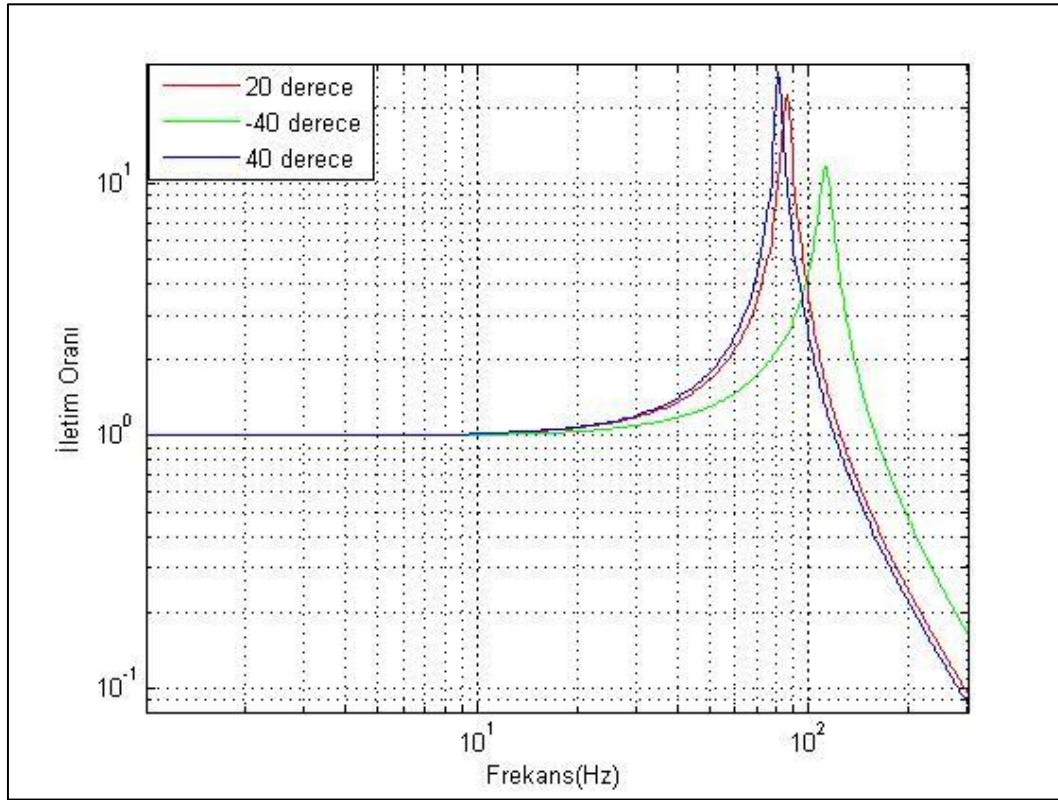
Çizelge 7.7. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	-40°C		20°C		40°C	
40°	Silikon 50 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		101 Hz	18,52	80 Hz	29,08	77 Hz	32,13

Çizelge 7.7’de görüldüğü gibi 40° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının doğal frekans değerleri sıcaklık arttıkça azalmaktadır. İletim oranları ise sıcaklık arttıkça artış göstermektedir.

Çizelge 7.1’de gösterilen 20° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcı ve Çizelge 7.4’de gösterilen 30° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıların analiz sonucuna göre 40° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının doğal frekans değerleri ve iletim oranları aynı koşullar altında daha yüksek hesaplanmıştır. Sonuç olarak doğal frekans değeri her ne kadar -40°C’de 100 Hz’in üzerinde olsa da tasarım kriteri diğer iki sıcaklıkta 100 Hz’in altında hesaplandığı için bu geometri ve silikon malzemesi titreşim yalıtımı için uygun değildir.

40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının -40°C, 20°C ve 40°C için yapılmış olan analiz sonuçları tek bir grafikte Şekil 7.8.’de gösterilmiştir.



Şekil 7.8. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Şekil 7.8’te gösterildiği gibi, 40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının analiz sonuçlarında sıcaklık azaldıkça silikonun katılığı arttığı için titreşim yalıtıcının aviyonik birime bağlı olduğu durum için sahip

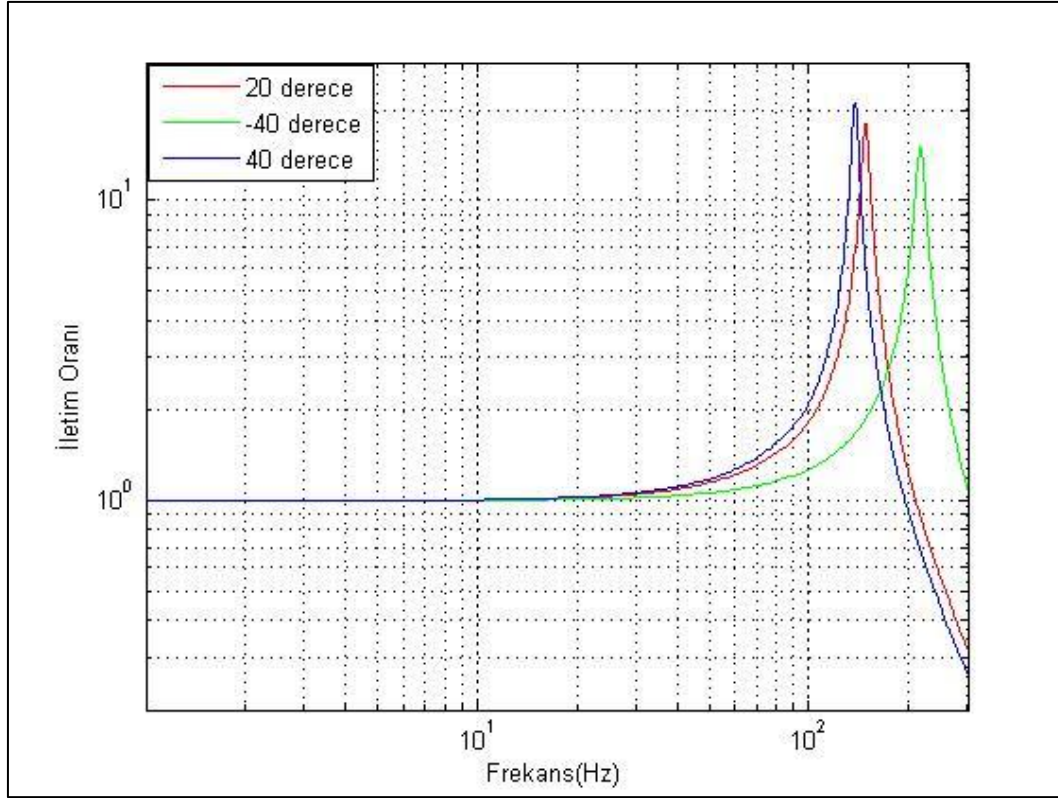
olduğu doğal frekansları artarken buna bağlı olarak iletim oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları özet olarak Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Çizelge 7.8. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	-40°C		20°C		40°C	
40°	Silikon 60 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		112 Hz	11,71	86 Hz	22,40	81 Hz	27,63

Çizelge 7.8’de görüldüğü gibi 40° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıya kıyasla 40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının doğal frekans değerleri aynı şartlar altında daha yüksek iletim oranları ise daha düşüktür. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının 20° ve 30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcılara kıyas ile doğal frekans değeri daha yüksek hesaplanmıştır. İletim oranları ise 40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcı için 20°C ve 40°C sıcaklıklarda daha yüksek hesaplanmışken -40°C’de 20° ve 30° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının iletim oranı daha yüksek hesaplanmıştır. Sonuç olarak doğal frekans değeri -40°C’de 100 Hz’in üzerinde olsa da tasarım kriteri diğer iki sıcaklıkta 100 Hz’in altında hesaplandığı için bu geometri ve silikon malzemesi titreşim yalıtımı için uygun değildir.

40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının -40°C, 20°C ve 40°C için yapılmış olan analiz sonuçları tek bir grafikte Şekil 7.9’de gösterilmiştir.



Şekil 7.9. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Şekil 7.9'da gösterildiği gibi, 40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A malzeme kullanılarak tasarlanmış titreşim yalıtıcının analiz sonuçlarında sıcaklık azaldıkça silikonun katılığı arttığı için titreşim yalıtıcının aviyonik birime bağlı olduğu durum için sahip olduğu doğal frekansları artarken buna bağlı olarak iletim oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Analiz sonuçları özet olarak Çizelge 7.9'da verilmiştir.

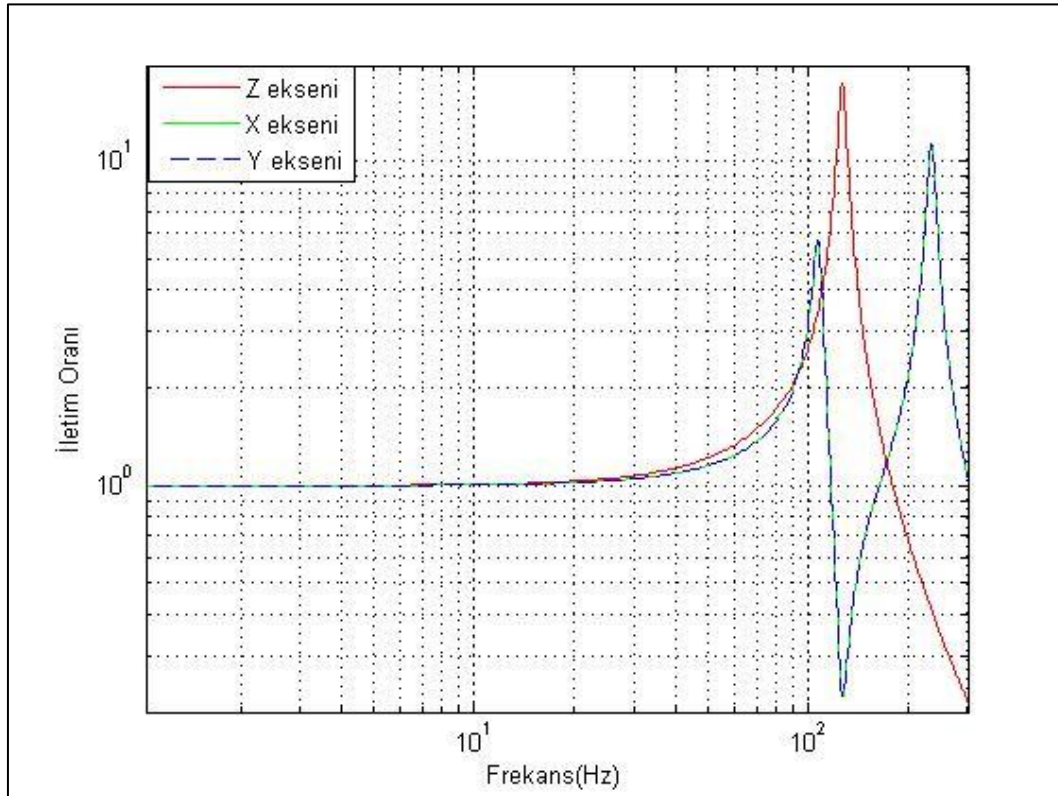
Çizelge 7.9. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A kullanılarak farklı sıcaklıklarda yapılan analiz sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	-40°C		20°C		40°C	
40°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		216 Hz	15,14	148 Hz	18,11	138 Hz	21,17

Çizelge 7.9'da görüldüğü gibi 40° mekanik ara yüz ve Silikon 50 Sh A ve 40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıya kıyasla 40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının doğal frekans değerleri aynı şartlar altında daha yüksektir. İletim oranları ise 20°C ve 40°C'de, 40° mekanik ara yüz ve

Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcılara kıyasla 40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcı için daha düşüktür iken -40°C sıcaklıkta daha yüksek hesaplanmıştır. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 60 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının iletim oranları ise bütün sıcaklıklarda 40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıdan daha yüksek hesaplanmıştır. 40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcının 20° ve 30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcılara kıyas ile doğal frekans değerleri ve iletim oranları daha yüksek hesaplanmıştır. Sonuç olarak doğal frekans değerleri her 3 sıcaklıkta da 100 Hz'in üzerinde hesaplandığı için bu geometri ve silikon malzemesi titreşim yalıtımı için uygundur.

Sonlu elamanlar analizi sonuçlarına göre titreşim yalıtıcı tasarım kriterini 30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcı ve 40° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcıların sağladığı görülmüştür. Buna göre 30° mekanik ara yüz ve Silikon 70 Sh A ile tasarlanmış titreşim yalıtıcı için 20°C'de X ve Y yönünde de analiz yapılmış olup her üç ekseninde yapılmış olan analizlerin sonuçları Şekil 7.10'da gösterilmiştir.



Şekil 7.10. Z, X ve Y yönleri için yapılmış olan analiz sonuçları

Şekil 7.10’da gösterildiği gibi her üç ekseninde de doğal frekans değerleri tasarım kriteri olan 100 Hz’in üzerindedir. Z yönünde yapılmış olan analizde elde edilen iletim oranı X ve Y yönünde yapılmış olan analizlerde hesaplanmış olan iletim oranından daha yüksek hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde aviyonik birimin kütle merkezi, X ve Y eksenini boyunca olması gerektiği gibi hem aviyonik birimin hemde dört tane titreşim yalıtıcının geometrik merkezi ile üst üste gelmektedir ve tam ortadadır. Bu sebeple X ve Y eksenindeki harmonik yükleme için yapılan hesaplamalarda hem doğal frekans hem de iletim oranları birbiri ile aynıdır. Fakat Z yönünde aviyonik birimin kullanıldığı sistemden kaynaklanan geometrik kısıtlardan dolayı aviyonik birimin kütle merkezi ile dört tane titreşim yalıtıcının geometrik merkezi arasında 6 mm’lik bir kaçıklık vardır. Bu kaçıklık X ve Y eksenleri yönünde yapılmış olan harmonik yüklemelerde ilave moment kolu oluşturur. Bu nedenle X ve Y yönündeki dinamik davranış Z yönünde oluşan doğal frekanstan da eklenerek 2 adet doğal frekans değerinin görülmesine sebep olmaktadır. Aviyonik birimde radyal yönde herhangi bir kaçıklık olmadığı için tek bir doğal frekans değeri hesaplanmaktadır.

Yapılan analiz sonuçları Çizelge 7.10’da verilmiştir.

Çizelge 7.10. 20°C’de Z, X ve Y yönleri için yapılmış olan analiz sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	Z yönü		X ve Y yönü			
30°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	1.Doğal Frekans	İletim Oranı	2.Doğal Frekans	İletim Oranı
		126,6 Hz	17,38	106,6 Hz	5,66	233,2 Hz	11,28

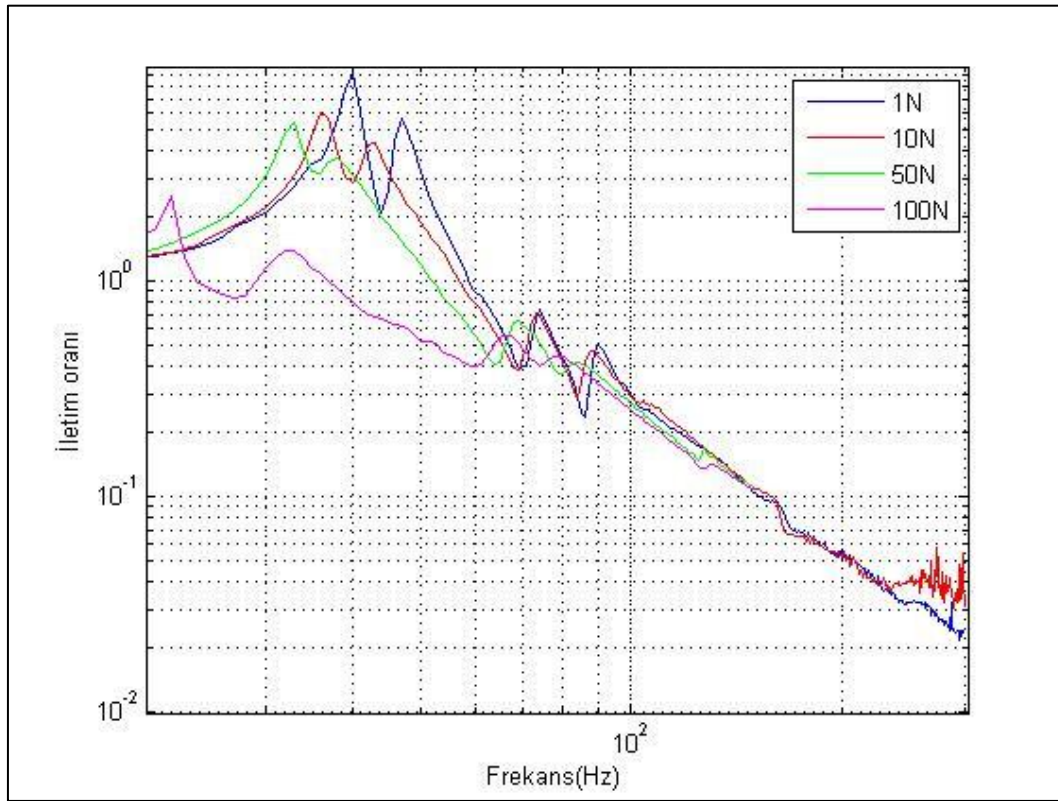
7.2. Test Bulguları

Testler iki farklı sınır koşulu altında gerçekleştirilmiştir. Serbest serbest testler titreşim yalıtıcının ilk prototipi üretilmeden önce yapılan analiz çalışmalarına paralel olarak hızlı bir öngörü elde etmek için kuvvet kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Sabit serbest sınır koşulu ile yapılan testler ise ilk prototipi üretilmiş olan titreşim yalıtıcının çevresel koşullar altında maruz kalacağı titreşim profilleri altında gerçekleştirilmiştir.

7.2.1. Serbest-serbest sınır koşulu ile yapılmış olan test bulguları

İlk testlerde gerek üretim maliyeti düşürmek, gerekse hızlı sonuç almak için mekanik kısımlar ABS 30 malzemeden basılarak silikon kısım bu mekaniklere Sil-poxy ile yapıştırılmıştır. Test sırasında ölçümler, sonlu elemanlar analizinde hesaplamalar için hangi noktalar referans alındı ise o bölgelere ivme ölçerler yerleştirilerek yapılmıştır.

Aviyonik birimin, ABS 30 ile üretilen mekanikler, 30 derece mekanik açısı ile Silikon 50 Sh A kullanılarak 1 N, 10 N, 50 N ve 100 N sinüs kuvvetler ile test edilmesi ile elde edilen sonuçlar Şekil 7.11’de gösterilmiştir.



Şekil 7.11. Silikon 50 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler

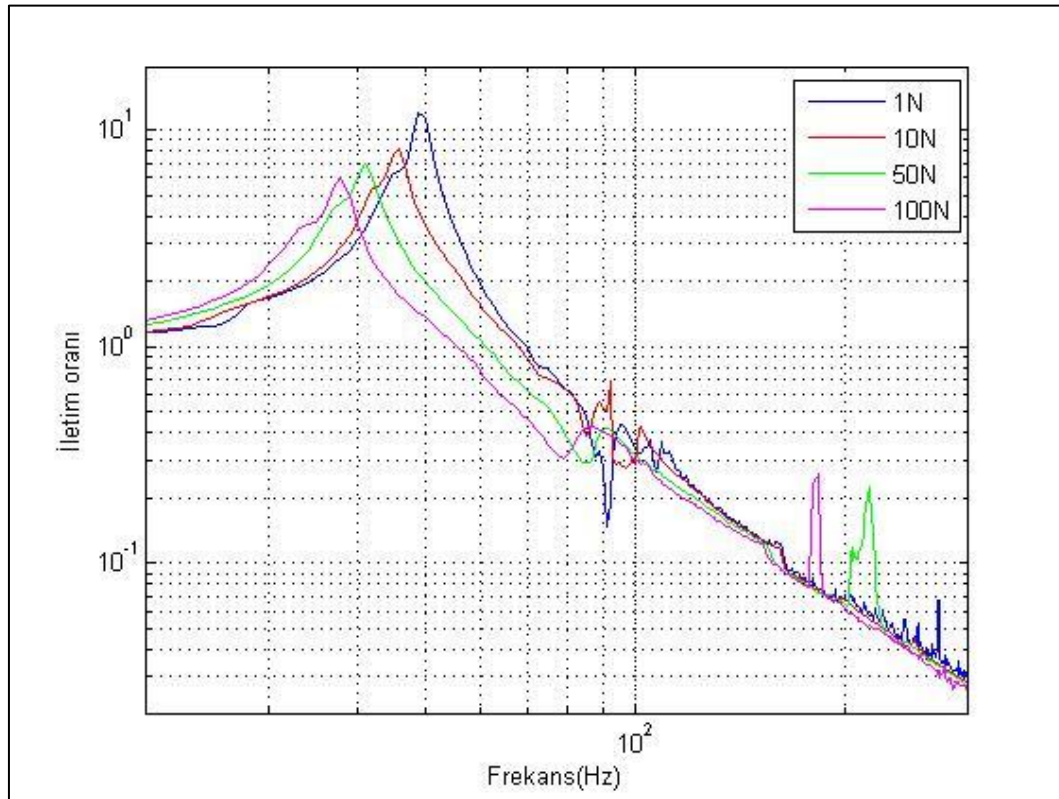
Şekil 7.11’de görüldüğü gibi yüklemenin genliği arttıkça silikon 50 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcının bağlı olduğu aviyonik birimin doğal frekans değerleri ve iletim oranları azalmıştır. Testte aviyonik birimin 2 adet doğal frekansı gözlemlenmiştir. Farklı genlikler için testte yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 7.11’de verilmiştir.

Çizelge 7.11. 50 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcının test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	1 N		10 N		50 N		100 N	
30°	Silikon 50 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		40 Hz	9,16	36 Hz	6,06	33 Hz	5,42	22 Hz	2,49

Çizelge 7.11’da baskın doğal frekans değerleri yer almaktadır. Bu değerler 100 Hz’in çok altında ölçülmüştür. Yükleme genliği arttıkça doğal frekansın ve iletim oranının azaldığı saptanmıştır.

Aviyonik birimin, ABS 30 ile üretilen mekanikler, 30 derece mekanik açısı ile Silikon 60 Sh A kullanılarak 1 N, 10 N, 50 N ve 100 N sin kuvvetler ile test edilmesi ile elde edilen sonuçlar ile Şekil 7.12’de gösterilmiştir.



Şekil 7.12. Silikon 60 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler

Şekil 7.12’de görüldüğü gibi yüklemenin genliği arttıkça silikon 60 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcının bağlı olduğu aviyonik birimin

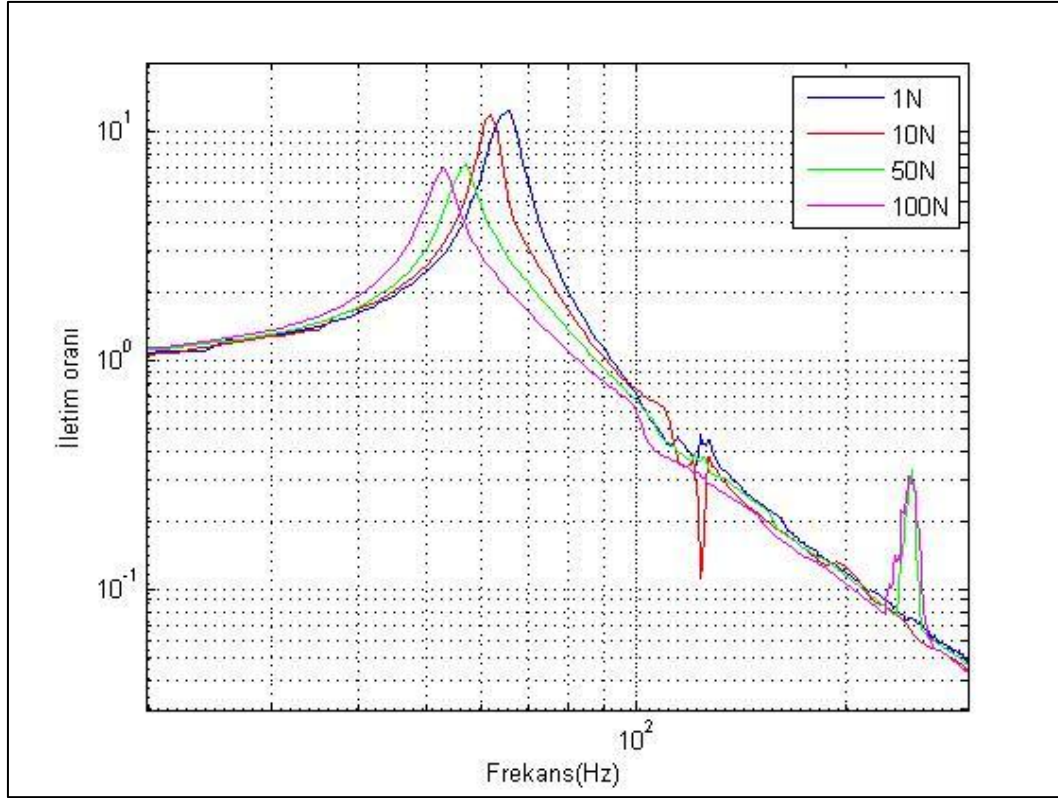
doğal frekans değerleri ve iletim oranları azalmıştır. Farklı genlikler için testte yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 7.12’de verilmiştir.

Çizelge 7.12. 60 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcının test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	1 N		10 N		50 N		100 N	
30°	Silikon 60 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		49 Hz	11,89	46 Hz	8,11	41 Hz	6,97	38 Hz	6,09

Çizelge 7.12’de görüldüğü gibi doğal frekans değerler 100 Hz’in çok altında ölçülmüştür. Yükleme genliği arttıkça doğal frekansın ve iletim oranının azaldığı saptanmıştır. Aynı şartlar altındaki testlerde 50 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcıya kıyas ile 60 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcının doğal frekans ve iletim oranı değerleri daha yüksek ölçülmüştür.

Aviyonik birimin, ABS 30 ile üretilen mekanikler, 30 derece mekanik açısı ile Silikon 70 Sh A kullanılarak 1 N, 10 N, 50 N ve 100 N sin kuvvetler ile test edilmesi ile elde edilen sonuçlar Şekil 7.13’de gösterilmiştir.



Şekil 7.13. Silikon 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler

Şekil 7.13’de görüldüğü gibi yüklemenin genliği arttıkça silikon 60 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcının bağlı olduğu aviyonik birimin doğal frekans değerleri ve iletim oranları azalmıştır. Farklı genlikler için testte yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 7.13’de verilmiştir.

Çizelge 7.13. 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcının test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	1 N		10 N		50 N		100 N	
30°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		66 Hz	12,4	62 Hz	11,86	57 Hz	7,30	53 Hz	6,94

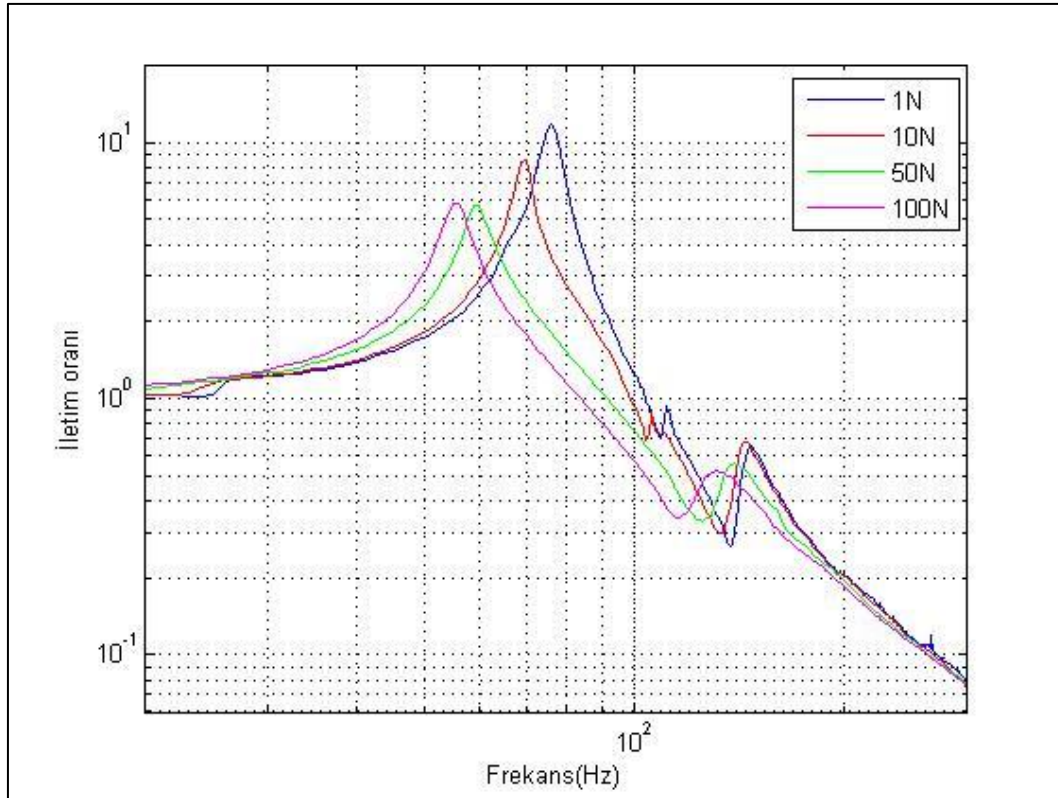
Çizelge 7.13’de görüldüğü gibi doğal frekans değerler 100 Hz’in çok altında ölçülmüştür. Yükleme genliği arttıkça doğal frekansın ve iletim oranının azaldığı saptanmıştır. Aynı şartlar altındaki testlerde 50 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 ve 60 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcılara kıyas ile 70

Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip ABS 30 malzemeden yapılmış yalıtıcının doğal frekans ve iletim oranı değerleri daha yüksek ölçülmüştür.

Çizelge 7.11, Çizelge 7.12 ve Çizelge 7.13'deki test sonuçlarına göre farklı elastomer sertlikleri kullanılarak aynı geometriye sahip titreşim yalıtıcılar kullanıldığında sertlik değeri arttıkça kullanıldığı aviyonik birimin doğal frekans değerleri ve iletim oranı değerleri de artmaktadır. Ayrıca aynı testler sisteme uygulanan harmonik kuvvetin genliği arttıkça sistemin hem doğal frekans hem de iletim oranı değerleri azalmaktadır.

Bundan sonra yapılmış olan 3 test konfigürasyonu, aynı sertlikte silikon malzeme ile farklı mekanik geometriler kullanılarak yapılmıştır. Bu testlerin amacı titreşim yalıtıcı geometrisinin titreşim yalıtım performansına etkisi görmektir. Bu testlerde yalıtıcı mekaniği için Al6061 malzemesi ve Silikon 70 Sh A elastomer malzemesi kullanılmıştır. Yalıtıcı elemanları birbirlerine Silpoxy isimli elastomerin metale yapışmasını sağlayan kimyasal kullanılarak birleştirilmiştir.

Aviyonik birimin, Al6061 ile üretilen mekanikler, 20 derece mekanik açısı ile Silikon 70 Sh A kullanılarak 1 N, 10 N, 50 N ve 100 N sin kuvvetler ile test edilmesi ile elde edilen sonuçlar Şekil 7.14'de gösterilmiştir.



Şekil 7.14. Silikon 70 Sh A elastomer ve 20° geometriye sahip Al6061 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler

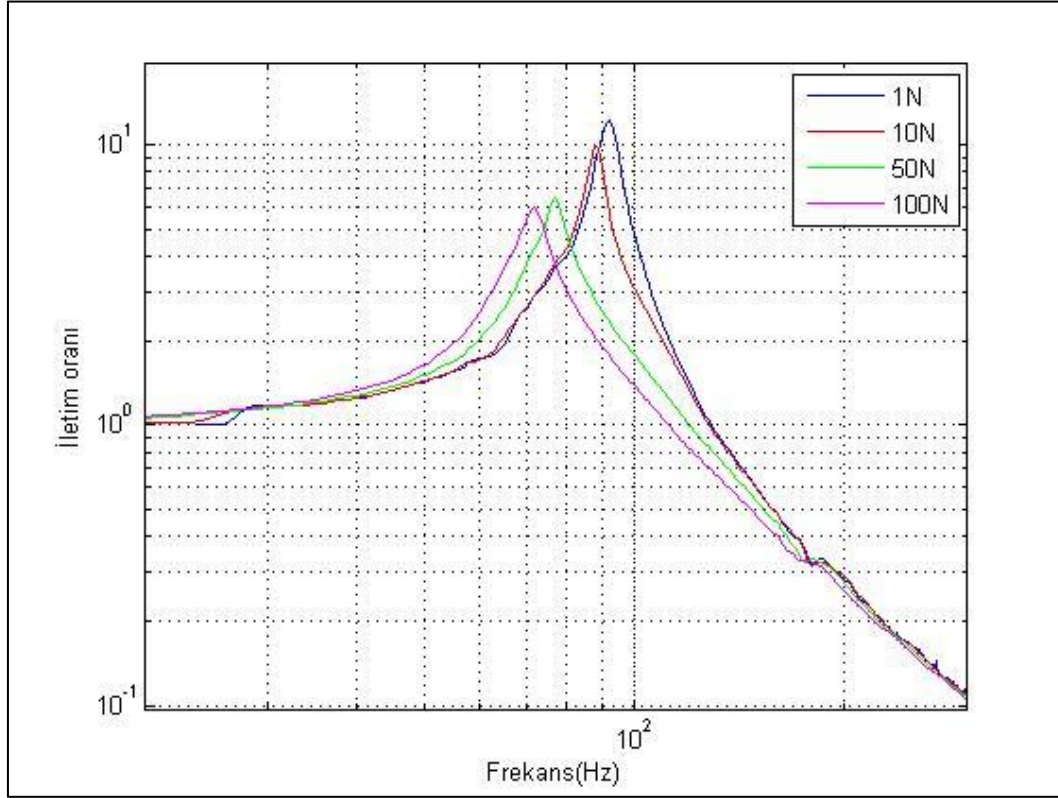
Şekil 7.14’de görüldüğü gibi yüklemenin genliği arttıkça silikon 70 Sh A elastomer ve 20° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının bağlı olduğu aviyonik birimin doğal frekans değerleri ve iletim oranları azalmıştır. Farklı genlikler için testte yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 7.14’de verilmiştir.

Çizelge 7.14. 70 Sh A elastomer ve 20° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	1 N		10 N		50 N		100 N	
20°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		76 Hz	11,72	70 Hz	8,54	59 Hz	5,67	56 Hz	5,77

Çizelge 7.14’de doğal frekans değerleri ve iletim oranları yer almaktadır. Bu değerler 100 Hz’in çok altında ölçülmüştür. Yükleme genliği arttıkça doğal frekansın ve iletim oranının azaldığı saptanmıştır.

Aviyonik birimin, Al6061 ile üretilen mekanikler, 30 derece mekanik açısı ile Silikon 70 Sh A kullanılarak 1 N, 10 N, 50 N ve 100 N sin kuvvetler ile test edilmesi ile elde edilen sonuçlar Şekil 7.15’de gösterilmiştir.



Şekil 7.15. Silikon 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip Al6061 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler

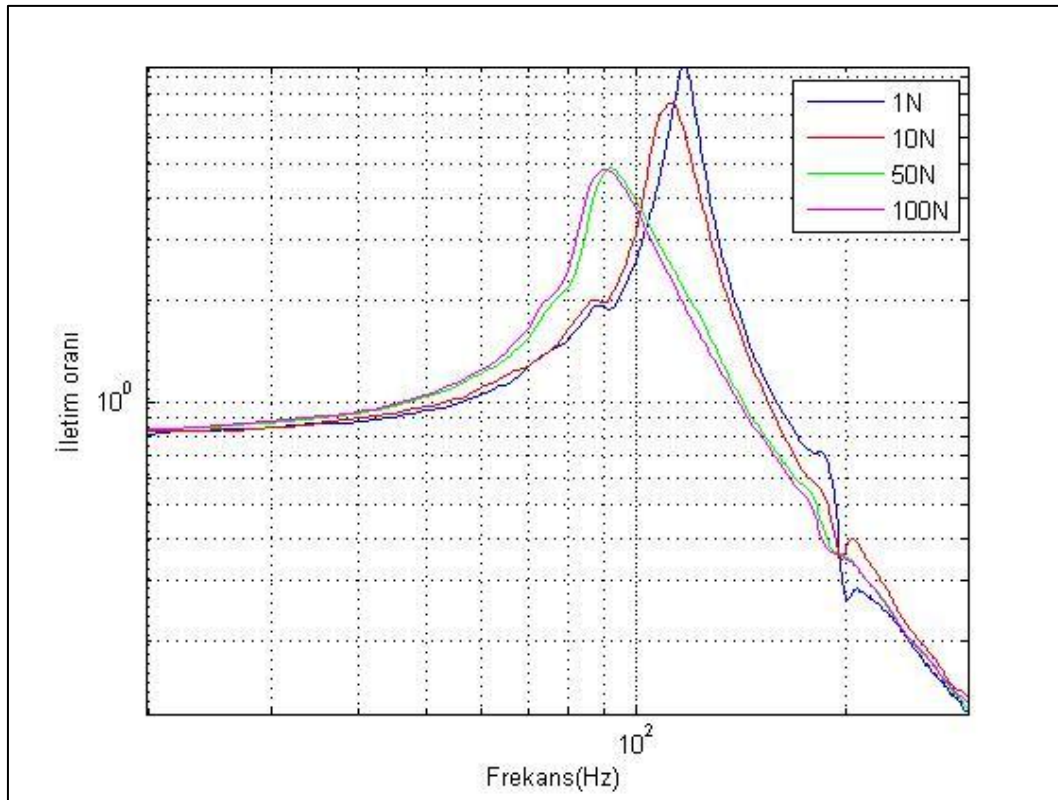
Şekil 7.15’de görüldüğü gibi yüklemenin genliği arttıkça silikon 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının bağlı olduğu aviyonik birimin doğal frekans değerleri ve iletim oranları azalmıştır. Farklı genlikler için testte yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 7.15’de verilmiştir.

Çizelge 7.15. 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	1 N		10 N		50 N		100 N	
30°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		92 Hz	12,31	88 Hz	10,05	77 Hz	6,47	72 Hz	6,00

Çizelge 7.15’de görüldüğü gibi doğal frekans değerler 100 Hz’in altında ölçülmüştür. Yükleme genliği arttıkça doğal frekansın ve iletim oranının azaldığı saptanmıştır. Aynı şartlar altındaki testlerde 70 Sh A elastomer ve 20° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcıya kıyas ile 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının doğal frekans ve iletim oranı değerleri daha yüksek ölçülmüştür.

Aviyonik birimin, Al6061 ile üretilen mekanikler, 40 derece mekanik açısı ile Silikon 70 Sh A kullanılarak 1 N, 10 N, 50 N ve 100 N sin kuvvetler ile test edilmesi ile elde edilen sonuçlar Şekil 7.16’de gösterilmiştir.



Şekil 7.16. Silikon 70 Sh A elastomer ve 40° geometriye sahip Al6061 malzemeler ile farklı yüklerde yapılan testler

Şekil 7.16’da görüldüğü gibi yüklemenin genliği arttıkça silikon 70 Sh A elastomer ve 40° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının bağlı olduğu aviyonik birimin doğal frekans değerleri ve iletim oranları azalmıştır. Farklı genlikler için testte yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 7.16’da verilmiştir.

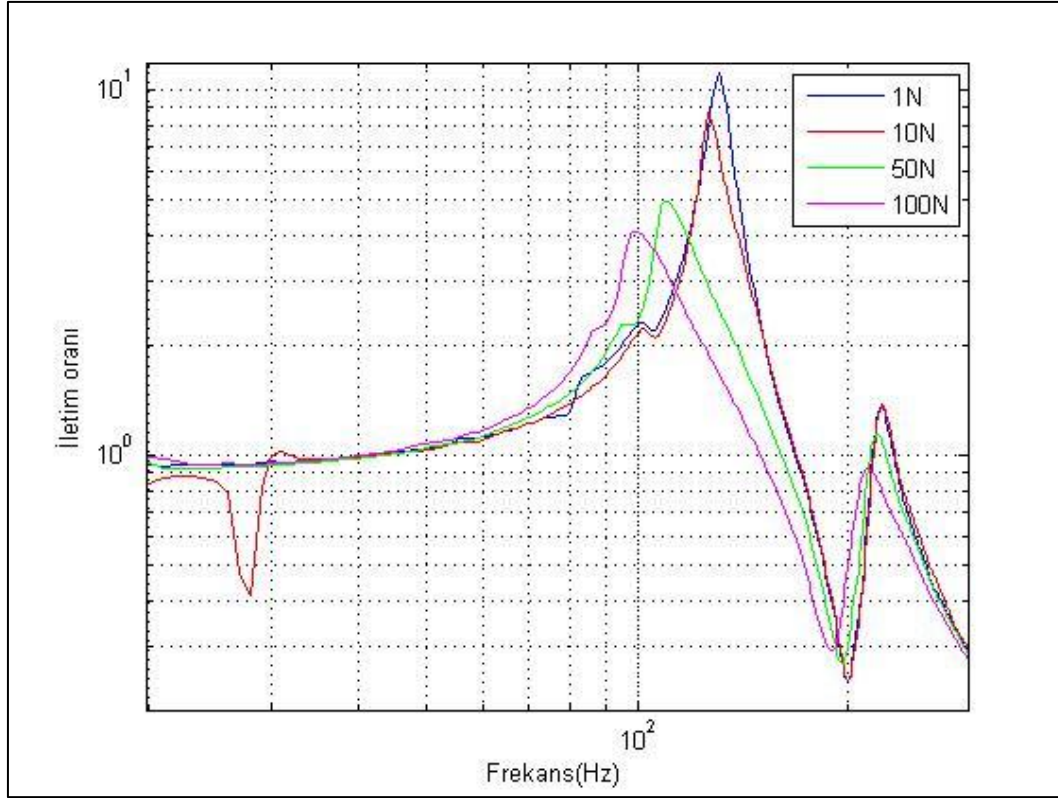
Çizelge 7.16. 70 Sh A elastomer ve 40° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	1 N		10 N		50 N		100 N	
40°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		117 Hz	9,75	113 Hz	7,58	92 Hz	4,86	90 Hz	4,82

Çizelge 7.16’de görüldüğü gibi doğal frekans değerler 1 N ve 10 N’luk harmonik kuvvetlerde 100 Hz’in üzerinde, 50 N ve 100 N’luk harmonik kuvvetlerde 100 Hz’in altında ölçülmüştür. Yükleme genliği arttıkça doğal frekansın ve iletim oranının azaldığı saptanmıştır. Aynı şartlar altındaki testlerde 70 Sh A elastomer ve 20° geometriye sahip Al6061 metal ile 70 Sh A elastomer ve 30° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcılara kıyasla 70 Sh A elastomer ve 40° geometriye sahip Al6061 malzemeden yapılmış yalıtıcının doğal frekans değerleri daha yüksek iken iletim oranları aynı koşullar altında daha düşük ölçülmüştür.

Çizelge 7.14, Çizelge 7.15 ve Çizelge 7.16’da verildiği gibi aynı elastomer malzeme ile farklı mekanik geometrilere sahip yalıtıcılar için titreşim yalıtıcı mekaniğinin sahip olduğu açı arttıkça aynı koşullar altında doğal frekans değerleri artmaktadır. İletim oranları ise 20° geometriden 30° geometriye doğru artış gösterirken 30° geometriden 40° geometriye doğru ise azalma göstermektedir.

Serbest-serbest sınır koşulları için yapılmış olan testlerin sonuncusu aviyonik birimin, karar verilen 30° mekanik ve Silikon 70 Sh A ile, vulkanizasyon prosesi kullanılarak ayrılmaz şekilde üretilmiş olan titreşim yalıtıcılar ile yapılmıştır. Bu testin amacı; aviyonik birimin titreşim yalıtıcılar ile fonksiyonel titreşim testlerine girmeden önce yapılmış olan sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırıp doğrulamaktır. Bu yalıtıcılar ile 1 N, 10 N, 50 N ve 100 N sin kuvvetler altında yapılmış olan test sonuçları Şekil 7.17’de gösterilmiştir.



Şekil 7.17. Farklı genlikte yüklemeler için Silikon 70 Sh A malzeme ve Al6061 malzemenin vulkanizasyonu ile üretilen 30 derece yalıtıcılarla test

Şekil 7.17’de görüldüğü gibi nihai titreşim yalıtıcının da harmonik yükleme genliği arttıkça doğal frekans ve iletim oranı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Yapılan test sonuçları Çizelge 7.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.17. Nihai titreşim yalıtıcının test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	1 N		10 N		50 N		100 N	
30°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		131 Hz	11,1	126 Hz	8,7	110 Hz	4,96	100 Hz	4,08

Çizelge 7.17’de verildiği gibi harmonik yükleme genliği arttıkça doğal frekans değerleri ve iletim oranı değerleri azalmaktadır. Farklı genliklerdeki tüm doğal frekans değerleri tasarım kriteri olan 100 Hz’in üzerinde ölçülmüştür.

Serbest-serbest sınır koşulu ile yapılmış olan tüm testler harmonik yükleme genliğinin artışının hem doğal frekans hem de iletim oranı özelliklerini artırdığını göstermiştir. Aynı mekanik geometri kullanılarak farklı sertlikte silikonlar ile oluşturulan yalıtıcılarda aynı

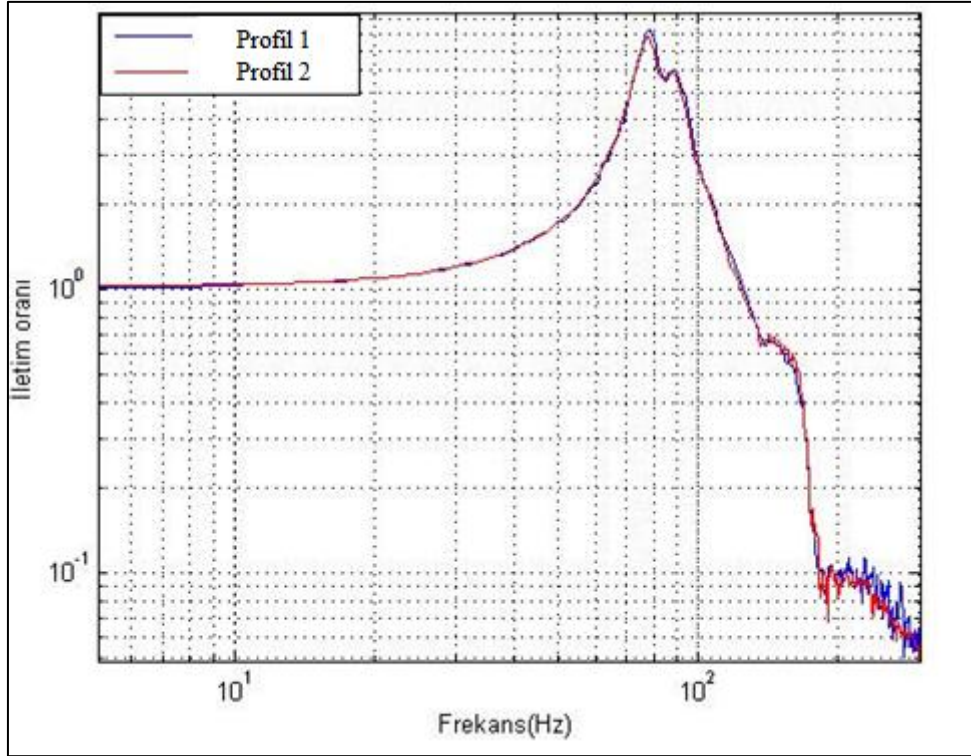
koşullar altında sertlik arttıkça doğal frekans ve iletim oranının artış gösterdiği görülmüştür. Aynı sertlikte silikon malzeme kullanılarak farklı açısal geometrideki mekanikler ile oluşturulan yalıtıcılarda da aynı koşullar altında sertlik arttıkça doğal frekans ve iletim oranının artış gösterdiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre titreşim yalıtıcı tasarımında silikon malzemedeki sertlik artışı ve mekanik geometrideki açısal artış birbirine paralel davranışlar meydana getirmiştir.

7.2.2. Sabit-serbest sınır koşulu ile yapılmış olan test bulguları

Serbest-serbest sınır koşullarında yapılan testler tamamlandıktan sonra yalıtıcıların gerçek yükler altında testlerinin yapılması için Tübitak SAGE Çevre Şartları Alt yapısında testler gerçekleştirilmiştir.

İlk testler mekanik parçaların elastomer kısma Sil-poxy ile yapıştırılarak elde edilmiş yalıtıcılar ile gerçekleştirilmiştir. Yalıtıcı mekaniği 30°, malzemesi Al6061 T6 ve elastomer malzeme silikon 70 Sh A'dır ve testler 20-25°C olan oda sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir.

Profil 1 ve Profil 2 titreşim yükleri ile Z eksen yönünde yapılan testlerin sonuçları Şekil 7.18'de gösterilmiştir.



Şekil 7.18. Profil 1 ve Profil 2 yükleri ile Z yönünde yapılan test sonuçları

Her 3 testte de aviyonik birim birbirinin hemen hemen aynısı bir davranış göstermiştir. Test sonuçları Çizelge 7.18’de verilmiştir.

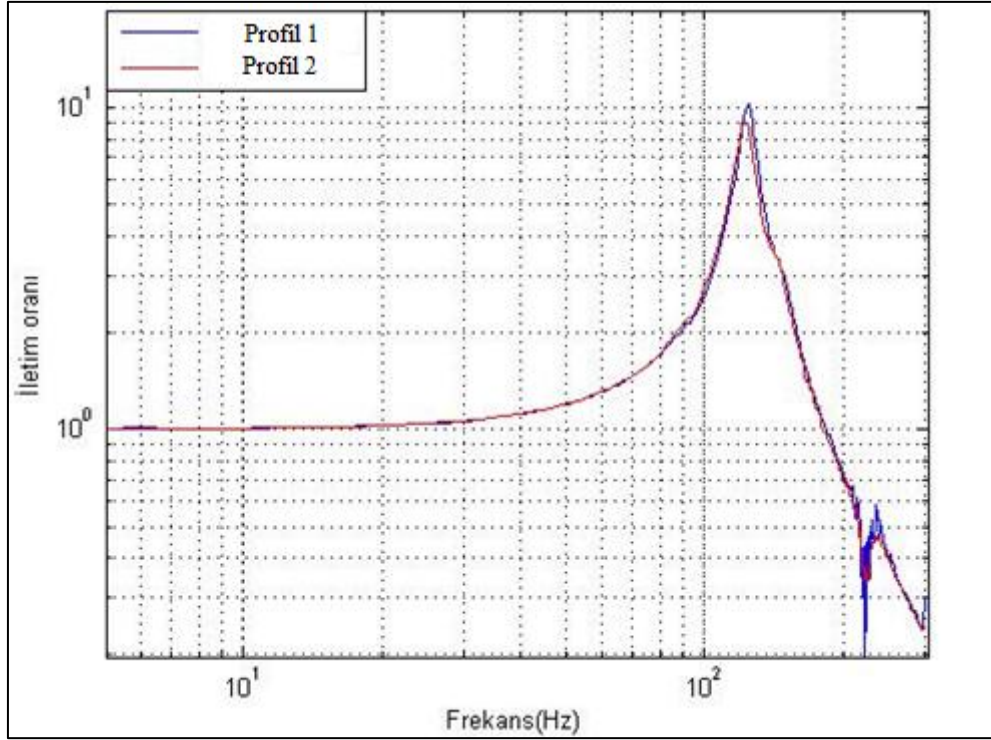
Çizelge 7.18. Profil 1 ve Profil 2 titreşim profilleri ile yapılmış olan test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	Profil 1		Profil 2	
		Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
30°	Silikon 70 Sh A	78 Hz	8,26	78 Hz	7,87

Çizelge 7.18’de görüldüğü gibi doğal frekans değerleri her üç profil için de hemen hemen aynıdır. Yine iletim oranları ise birbirine çok yakın olarak ölçülmüştür.

İkinci testler mekanik parçaların elastomer kısma yüksek sıcaklık altında vulkanizasyon ile birleştirilerek elde edilmiş yalıtıcılar ile gerçekleştirilmiştir. Silikon 70 Sh A elastomer ve yalıtıcı mekaniği 30° malzemesi Al6061 T6 olan ilk prototip ile yapılan bu testler 20-25°C olan oda sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir.

Profil 1 ve Profil 2 titreşim yükleri ile Z, X ve Y eksenleri yönünde yapılan testlerin sonuçları sırasıyla Şekil 7.19, Şekil 7.20 ve Şekil 7.21’de gösterilmiştir.



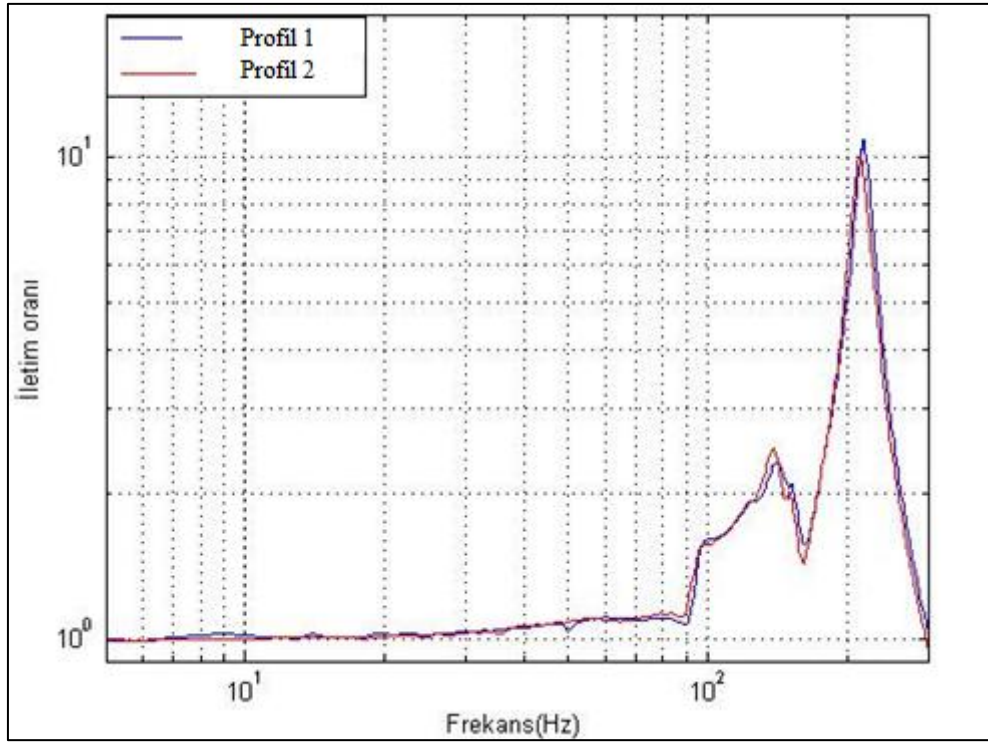
Şekil 7.19. Profil 1 ve Profil 2 yükleri ile Z yönünde yapılan test sonuçları

Şekil 7.19’de görüldüğü gibi her iki titreşim davranışında da aviyonik birim birbirine çok yakın dinamik davranış göstermiştir. İki testte de doğal frekans değerleri tasarım kriteri olan 100 Hz’in üzerindedir. Test sonuçları Çizelge 7.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 7.19. Nihai yalıtıcı ile Profil 1 ve Profil 2 titreşim profilleri ile Z yönü için yapılmış olan test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	Profil 1		Profil 2	
30°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	İletim Oranı
		125 Hz	10,3	122 Hz	8,99

Görüldüğü gibi test sonuçları birbirine çok yakın çıkmıştır. Doğal frekans değerleri arasında Profil 2 titreşim yüklerine göre %2,4 ve iletim oranı değerleri arasında Profil 2 titreşim yüklerine göre %12,7 fark vardır.



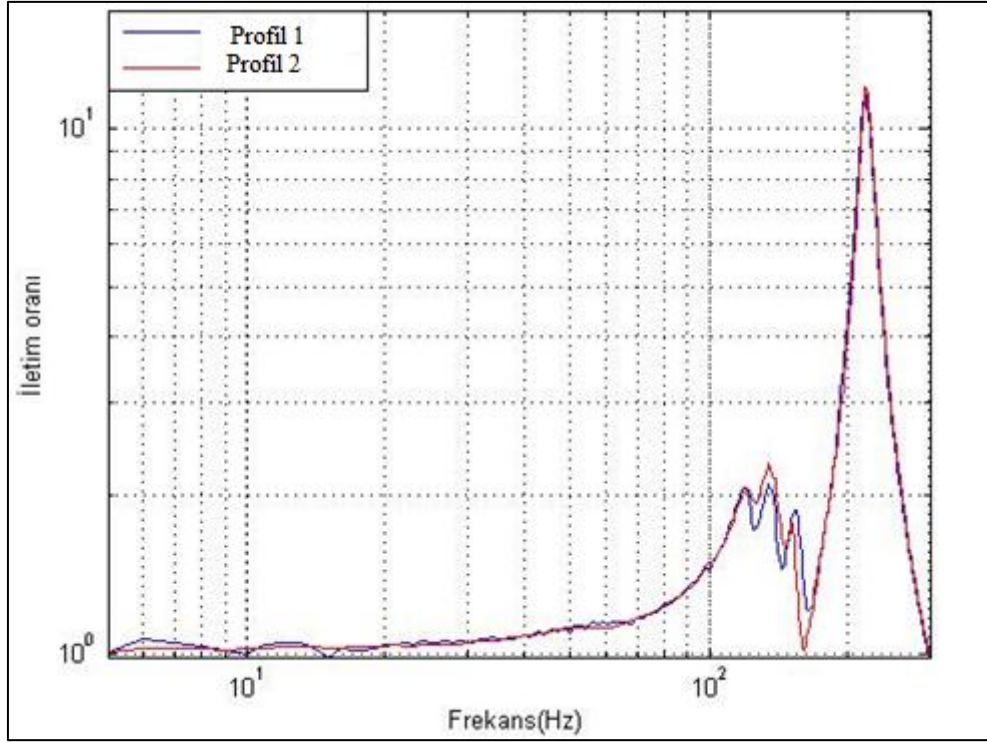
Şekil 7.20. Profil 1 ve Profil 2 yükleri ile X yönünde yapılan test sonuçları

Şekil 7.20’de görüldüğü gibi her iki titreşim davranışında da aviyonik birim birbirine çok yakın dinamik davranış göstermiştir. İki testte de doğal frekans değerleri tasarım kriteri olan 100 Hz’in üzerindedir. Testlerde iki adet titreşim modu gözlemlenmiştir. Bunlardan ilkinin Z ekseninde etkin olan doğal frekans değerinin X eksenindeki harekete etki ediyor olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Test sonuçları Çizelge 7.20’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.20. Nihai yalıtıcı ile Profil 1 ve Profil 2 titreşim profilleri ile X yönü için yapılmış olan test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	Profil 1				Profil 2			
30°	Silikon 70 Sh A	1.Doğal Frekans	İletim Oranı	2.Doğal Frekans	İletim Oranı	1.Doğal Frekans	İletim Oranı	1.Doğal Frekans	İletim Oranı
		141 Hz	2,34	216 Hz	10,81	139	2,50	213 Hz	9,97

Çizelge 7.20’de görüldüğü gibi her iki titreşim profili için yapılan testlerde elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Doğal frekans değerleri arasında Profil 2 titreşim yüklerine göre %1,4 ve iletim oranı değerleri arasında Profil 2 titreşim yüklerine göre %7,7 fark vardır.



Şekil 7.21. Profil 1 ve Profil 2 yükleri ile Y yönünde yapılan test sonuçları

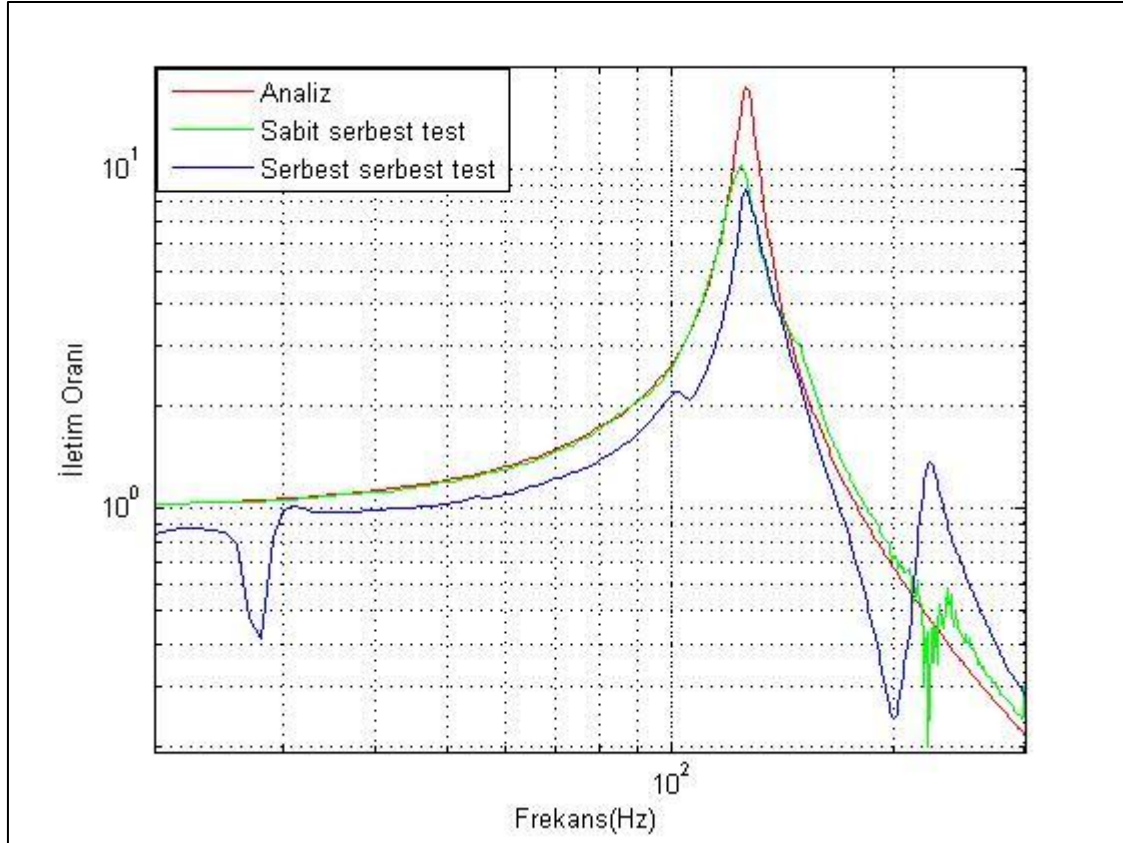
Şekil 7.21’de görüldüğü gibi her iki titreşim testinde de aviyonik birim birbirine çok yakın dinamik davranış göstermiştir. İki testte de doğal frekans değerleri tasarım kriteri olan 100 Hz’in üzerindedir. Bu testler için de X yönü testlerinde gözlemlendiği gibi iki adet titreşim modu gözlemlenmiştir. Bunlardan ilki Z ekseninde etkin olan doğal frekans değerinin Y eksenindeki harekete etki ediyor olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Test sonuçları Çizelge 7.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.21. Nihai yalıtıcı ile Profil 1 ve Profil 2 titreşim profilleri ile X yönü için yapılmış olan test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	Profil 1				Profil 2			
		1.Doğal Frekans	İletim Oranı	2.Doğal Frekans	İletim Oranı	1.Doğal Frekans	İletim Oranı	1.Doğal Frekans	İletim Oranı
30°	Silikon 70 Sh A	135 Hz	2,11	218	11,95	135 Hz	2,3	218	11,87

Çizelge 7.21’de görüldüğü gibi her iki titreşim profili için yapılan testlerde elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Doğal frekans değerlerinin iki durum içinde aynı olduğu gözlemlenmiştir. İletim oranı değerleri arasında Profil 2 titreşim yüklerine göre %0,67 fark vardır.

Tasarım kriterini sağlayan, silikon 70 Sh A elastomer kısım ile Al6061 malzeme ve 30° yalıtıcı mekaniğine sahip, ısıtıl işlem ile vulkanize edilerek ilk prototip üretimi yapılan titreşim yalıtıcının Z eksenı yönünde, 20°C’de yapılmış olan sonlu elemanlar analizi, serbest serbest sınır koşullu ve sabit serbest sınır koşullu testlerinin sonuçları aynı grafikte Şekil 7.22’de gösterilmiştir.



Şekil 7.22. Oda sıcaklığında (20°C ‘de) Z ekseninde yapılmış olan analiz ve test sonuçları

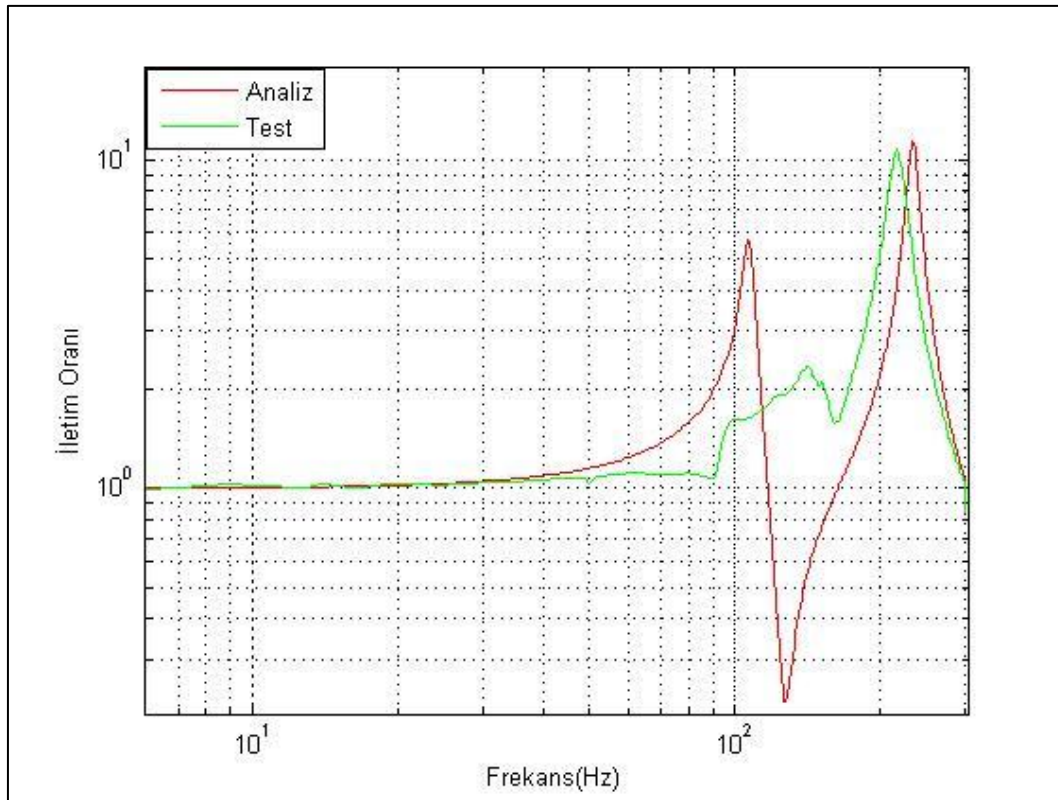
Şekil 7.22’de görüldüğü gibi doğal frekans değerleri analiz ve test sonuçlarında birbirlerine çok yakın elde edilmiştir. İletim oranları arasında ise farklılıklar vardır. Analiz ve test sonuçları Çizelge 7.22’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.22. Z eksenı için analiz ve test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	Sabit-Serbest test		Analiz			Serbest-Serbest test		
30°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	Sapma	İletim Oranı	Doğal Frekans	Sapma	İletim Oranı
		125 Hz	10,3	126,6 Hz	%1,28	17,38	126 Hz	%0,8	8,7

Çizelge 7.22’de görüldüğü gibi analiz ve test sonuçlarından elde edilen doğal frekans değerleri birbirine çok yakın hesaplanmış ve ölçülmüştür. Sapma hesapları sabit-serbest sınır şartları ile Profil 2 titreşim profili kullanılarak yapılmış olan test sonuçlarına göre hesaplanmıştır. Doğal frekans değerleri için sapma %1,3’ün altındadır. Doğal frekans değeri açısından sonuçlar birbirleri ile çok tutarlıdır.

Silikon 70 Sh A elastomer kısım ile Al6061 malzeme ve 30° yalıtıcı mekaniğine sahip, ısıt işlem ile vulkanize edilerek ilk prototip üretimi yapılan titreşim yalıtıcının X eksen yönünde, 20°C’de yapılmış olan sonlu elemanlar analizi, serbest serbest sınır koşullu ve sabit serbest sınır koşullu testlerinin sonuçları aynı grafikte Şekil 7.23’de gösterilmiştir.



Şekil 7.23. Oda sıcaklığında (20°C ‘de) X ekseninde yapılmış olan analiz ve test sonuçları

Şekil 7.23’de görüldüğü gibi analiz ve test sonuçları her iki durum içinde Z eksen yönündeki doğal frekanstan etkilenmiştir. Bu nedenle Z eksen etrafındaki dar bir bölgede ekstra bir doğal frekans hesaplanmış ve ölçülmüştür. X eksenine ait esas doğal frekans değerleri ise birbirine yakın hesaplanmış ve ölçülmüştür.

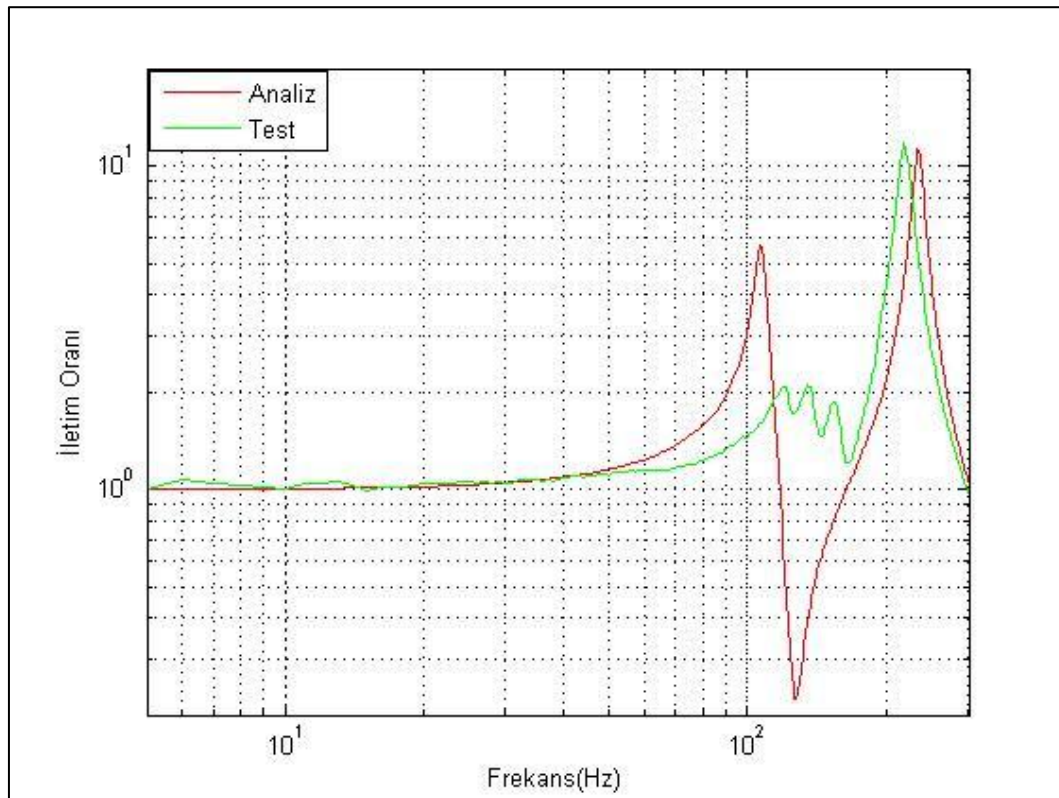
Analiz ve test sonuçları Çizelge 7.23’de verilmiştir.

Çizelge 7.23. X eksenini için analiz ve test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	Test		Analiz		
30°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	Sapma	İletim Oranı
		216 Hz	10,81	234,2 Hz	%8,42	11,35

Çizelge 7.23’de görüldüğü gibi analiz ve test sonuçlarından elde edilen doğal frekans değerleri birbirine yakın hesaplanmış ve ölçülmüştür. Sapma hesapları sabit-serbest sınır şartları ile Profil 2 titreşim profili kullanılarak yapılmış olan test sonucuna göre hesaplanmıştır. Doğal frekans değerleri için sapma %8,5’in altındadır.

Silikon 70 Sh A elastomer kısım ile Al6061 malzeme ve 30° yalıtıcı mekanizmasına sahip, ısıtıl işlem ile vulkanize edilerek ilk prototip üretimi yapılan titreşim yalıtıcının Y eksenini yönünde, 20°C’de yapılmış olan sonlu elemanlar analizi ve sabit serbest sınır koşullu testlerinin sonuçları aynı grafikte Şekil 7.24’de gösterilmiştir.



Şekil 7.24. Oda sıcaklığında (20°C 'de) Y ekseninde yapılmış olan analiz ve test sonuçları

Şekil 7.24’de görüldüğü gibi analiz ve test sonuçları her iki durum içinde Z eksenini yönündeki doğal frekanstan etkilenmiştir. Bu nedenle Z eksenini etrafındaki dar bir bölgede

ekstra bir doğal frekans hesaplanmış ve ölçülmüştür. Y eksenine ait esas doğal frekans değerleri ise birbirine yakın hesaplanmış ve ölçülmüştür.

Analiz ve test sonuçları Çizelge 7.24’de verilmiştir.

Çizelge 7.24. Y eksenine için analiz ve test sonuçları

Geometri	Elastomer malzeme	Test		Analiz		
30°	Silikon 70 Sh A	Doğal Frekans	İletim Oranı	Doğal Frekans	Sapma	İletim Oranı
		218 Hz	11,87	234,2 Hz	%7,43	11,35

Çizelge 7.24’de görüldüğü gibi analiz ve test sonuçlarından elde edilen doğal frekans değerleri birbirine yakın hesaplanmış ve ölçülmüştür. Sapma hesapları sabit-serbest sınır şartları ile Profil 2 titreşim profili kullanılarak yapılmış olan test sonucuna göre hesaplanmıştır. Doğal frekans değerleri için sapma %7,5’in altındadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir aviyonik birimin özgün geometriye sahip bir titreşim yalıtıcısının tasarım, analiz ve test aşamaları incelenmiştir. Farklı sertlikte silikon malzemeler, farklı geometriye sahip yalıtıcı mekanikleri ile konsept tasarımlar yapılmış, bunların sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş ve bu analizlerin sonuçlarını doğrulamak için testler gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan titreşim yalıtıcı standart bir geometriye sahip olmayıp sadece kullanıldığı aviyonik birim ve geometrisine özgüdür. Yapılan çalışmalarda hesaplanan ve ölçülen doğal frekans değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar;

- Mekanik kısıtları sağlayan titreşim yalıtıcı tasarlanmıştır.
- Testler ile analiz sonuçları frekans cevabı olarak değerlendirildiğinde aralarındaki fark %10'un altında ve tutarlıdır.
- Dinamik cevap açısından tasarım kriterine göre en iyi seçeneğin Al6061 mekanik 30° ara yüzlere sahip silikon 70 Sh A sertlik değerine elastomer ile vulkanize edilmiş olan titreşim yalıtıcı olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlara göre ileride yapılabilecek ve çalışmanın daha ileri taşınabilmesini sağlayacak öneriler mevcuttur. Bu çözüm önerileri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yapılan deneysel çalışmalarda belirli zorlamalarda titreşim cevabının geniş bir frekans aralığında davrandığı görülmüştür. Buradan yola çıkarak yalıtıcının yük genlikli zorlamalarda doğrusal olmayan karakteristiğini yansıttığı görülmüştür. Bu çerçevede hem analiz, hem deneysel çalışmalarda bu doğrusal olmayan karakteristiği göz önüne alınarak çalışmaların genişletilmesi faydalı olacaktır.
- DMA analizlerinde silikon numuneler 100 Hz'e kadar olan frekanslarda tarandı. Dolayısıyla bu çalışmada 100 Hz üzeri karakteristik eğri uydurma ile yapıldı. İleride yapılan çalışmalarda malzeme karakterizasyonunun daha yüksek frekansları kapsayan ekipmanlar ile yapılması daha doğru sonuçlar verecektir.
- Sayısal analiz çalışmalarında malzeme modeli olarak kurumdaki ekipmanların kabiliyetleri değerlendirilerek, 'Elastik-Plastik İzotropik' malzeme kartı seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Gerekli ekipmanlar sağlanarak malzeme

karakterizasyonunun detaylandırılması ve analizlerde farklı malzeme kartlarının kullanılmasının sonuçlara etkisi incelenmelidir.

Bu çalışma ile TÜBİTAK SAGE, farklı geometriye sahip ekipmanlar için özgün titreşim yalıtıcı tasarlama ve üretme kabiliyeti kazanmıştır. Özgün ve standart olmayan yapısı ile bir ilk olma özelliğine sahiptir.

KAYNAKLAR

1. Jones, D. I. G. (2001). *Handbook of viscoelastic vibration damping* (First Edition). United States of America: John Wiley & Sons Limited, 56-58.
2. Özgen, G. (2010). *ME 708 Techniques for vibration control and isolation lecture notes*. Ankara: Middle East Technical University, Fall, 29-32.
3. Harris, C. M., Piersol, A. G. (2002). *Harris' shock and vibration handbook* (Vol. 5). New York: McGraw-Hill, 33-35.
4. ASTM D2240. (2015). *Standard test method for rubber property-durometer hardness* (2015 Edition). Pennsylvania: ASTM International, 5-10.
5. Cangialosi, D., Boucher, V. M., Alegría, A. and Colmenero, J. (2013). Physical aging in polymers and polymer nanocomposites: recent results and open questions. *Soft Matter*, 9(36), 8619-8630.
6. Zhao, J., Dong, J., Liu, Z. and Xie, H. (2019). Characterization method of mechanical properties of rubber materials based on in-situ stereo finite-element-model updating. *Polymer Testing*, 79, 106015.
7. Zhang, Z., Sun, J., Lai, Y., Wang, Y., Liu, X., Shi, S. and Chen, X. (2018). Effects of thermal aging on uniaxial ratcheting behavior of vulcanised natural rubber. *Polymer Testing*, 70, 102-110.
8. Khimi, S. R., Pickering, K. L. (2014). A new method to predict optimum cure time of rubber compound using dynamic mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(6), 40008.
9. Jaunich, M., Stark, W. and Hoster, B. (2009). Monitoring the vulcanization of elastomers: Comparison of curemeter and ultrasonic online control. *Polymer Testing*, 28(1), 84-88.
10. Karaağaç, B., İnal, M. and Deniz, V. (2012). Predicting optimum cure time of rubber compounds by means of ANFIS. *Materials & Design*, 35, 833-838.
11. Ciesielski, A. (1999). *An introduction to rubber technology* (First Edition). United Kingdom: Rapra Technology Limited, 1.
12. Hoffman, W. (1989). *Rubber technology handbook* (First Edition). United States of America: Hanser/Gardner Publications, 475.
13. Aggarwal, S. L. (1990). Influence of polymer composition on the thermal characteristics of sulfonated EPDM ionomers. *Journal of Polymer Science, Part C*, 28, 210.
14. Okay, Ö. Deniz. (2010). *Validation of structural analysis model of a layered structure with elastomeric component*. Master Thesis, Institute of Science of Middle East Technical University, Ankara, 34-45.

15. MSC.Software Corporation. (2000). *Nonlinear finite element analysis of elastomers*. California: MSC.Software Corporation, 40-44.
16. Lord Corporation. (2000). *Lord user's guide*. United States of America: Lord Corporation, 92-94.
17. Ardiç H. (2013). *Design and modeling elastomeric vibration isolators using finite element method*. Master Thesis, Institute of Science of Middle East Technical University, Ankara, 6.
18. Carrella, A. (2012). Nonlinear identifications using transmissibility: Dynamic characterisation of Anti Vibration Mounts (AVMs) with standard approach and nonlinear analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 63(1), 74-85.
19. Lu, Z., Brennan, M. J. and Chen, L. Q. (2016). On the transmissibilities of nonlinear vibration isolation system. *Journal of Sound and Vibration*, 375, 28-37.
20. Lee, J. H., Kim, K. J. (2009). A method of transmissibility design for dual-chamber pneumatic vibration isolator. *Journal of Sound and Vibration*, 323(1-2), 67-92.
21. Xiao, Z., Jing, X. and Cheng, L. (2013). The transmissibility of vibration isolators with cubic nonlinear damping under both force and base excitations. *Journal of Sound and Vibration*, 332(5), 1335-1354.
22. Gil-Negrete, N., Vinolas, J. and Kari, L. (2006). A simplified methodology to predict the dynamic stiffness of carbon-black filled rubber isolators using a finite element code. *Journal of Sound and Vibration*, 296(4-5), 757-776.
23. Clemens, A. J., Beijers, C. and de Boer, A. (2003, July). *Numerical modeling of rubber vibration isolators*. Paper presented at the Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden.
24. Levent, M. E., Şanlıtürk, K. Y. (2003, July). *Characterization of Vibration Isolators Using Vibration Test Data*. Paper presented at the Tenth International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden.
25. Takayama, M., Morita, K. (2000). *Finite element analysis of natural rubber isolators*. Master Thesis, Department of Architecture, Fukuoka University, Japan, 55.
26. Piersol, G., Paez, T. L. (2009). *Harris' shock and vibration handbook*. (Sixth Edition). United States of America: McGraw-Hill, 122-124.
27. Köksal, M. (2012). *Elastomer malzemelerin dinamik karakteristiklerinin teorik ve deneysel incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 35-47.
28. Gent, A. N. (2012). *Engineering with rubber: How to design rubber components* (Third Edition). United States of America: Hanser Publications, 122-125.
29. Gandhi, F., Chopra, I. (1996). A time-domain non-linear viscoelastic damper model. *Smart Materials and Structures*, 5, 517-528.

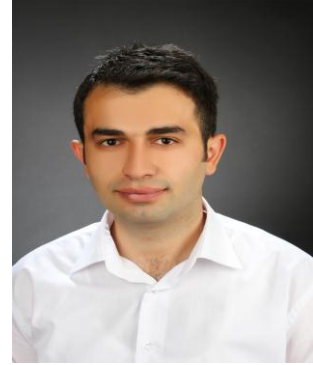
30. Zhang, J., Feng, S. Y. (2003). Effect of crosslinking on the conductivity of conductive silicone rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 89, 3471–5.
31. Park, E. S. (2008). Mechanical properties and antibacterial activity of peroxide-cured silicone rubber foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 110, 1723–1729.
32. Xu, Q., Pang, M., Zhu, L., Zhang, Y. and Feng, S. (2010). Mechanical properties of silicone rubber composed of diverse vinyl content silicone gums blending. *Materials & Design*, 31(9), 4083-4087.
33. Han, Y., Zhang, J., Yang, Q., Shi, L., Qi, S. and Jin, R. (2008). Novel polymethoxysiloxane- based crosslinking reagent and its in- situ improvement for thermal and mechanical properties of siloxane elastomer. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(6), 3788-3795.
34. Jia, Y., Sun, S., Liu, L., Xue, S. and Zhao, G. (2003). Investigation of computer-aided engineering of silicone rubber vulcanizing (I)—vulcanization degree calculation based on temperature field analysis. *Polymer*, 44(1), 319-326.
35. Ansorge, S., Papailiou, K. (2016). Mechanical properties of silicone rubber under high loadings of alumina trihydrate filler. *Journal of Elastomers & Plastics*, 48(4), 354-382.
36. Parker Hannifin Corporation. (2018). *Parker o-ring handbook ORD 5700*. Cleveland: O-Ring Division, 8.
37. Wang, Y., Liao, L., Lin, H., Zhang, F., Zhong, J., Xu, K. and Peng, Z. (2018, February). *Damping Properties of Natural rubber/Epoxidized Natural Rubber composites with different fillers*. Paper presented at the 2017 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2017), China.
38. Menard, P. K. (2008). *Dynamic mechanical analysis* (Second Edition). New York: CRC Press, 1-3.
39. Internet: Alpha Testing Systems. (2019). The dynamic testing of elastomers. <http://www.alpatestingsystems.com/downloads/dynamic-testing.pdf>, Son Erişim Tarihi: 21.05.2019.
40. Han, Y., Zhang, J., Yang, Q., Shi, L., Qi, S. and Jin, R. (2008). Novel polymethoxysiloxane- based crosslinking reagent and its in- situ improvement for thermal and mechanical properties of siloxane elastomer. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(6), 3788-3795.
41. Darlow, M. and Zorzi, E. (1981). *Mechanical design handbook for elastomers*. The United States of America: NASA Contractor Report, 5-137, 156-203.
42. Bergström, J., Rimnac, C. and Kurtz, S. (2005). Molecular chain stretch is a multiaxial failure criterion for conventional and highly crosslinked UHMWPE. *Journal of Orthopaedic Research*, 2(2), 367-375.

43. Kulik, V. M., Boiko, A. V., Bardakhanov, S. P., Park, H., Chun, H. H. and Lee, I. (2011). Viscoelastic properties of silicone rubber with admixture of SiO₂ nanoparticles. *Materials Science and Engineering: A*, 528(18), 5729-5732.
44. Ogden, R. W. (1997). *Non-linear elastic deformation* (Dover Edition). United States of America: Dover Publications, 83-89.
45. Greaves, G. N., Greer, A. L., Lakes, R. S. and Rouxel, T. (2011). Poisson's ratio and modern materials. *Nature Materials*, 10(11), 823-837.
46. Francesconi, L., Baldi, A., Liang, X., Aymerich, F. and Taylor, M. (2019). Variable Poisson's ratio materials for globally stable static and dynamic compression resistance. *Extreme Mechanics Letters*, 26, 1-7.
47. Ling Dynamic Systems Limited. (2004). Vibration and shock test fixture design user manual. Wallingford: Ling Dynamic Systems Limited, 10-16.
48. İbrahim, R. A. (2008). Recent advances in nonlinear passive vibration isolators. *Journal of Sound and Vibration*, 314(3-5), 371-452.
49. Carrella, A., Brennan, M. J. and Waters, T. P. (2007). Static analysis of a passive vibration isolator with quasi-zero-stiffness characteristic. *Journal of sound and vibration*, 301(3-5), 678-689.
50. Rivin, E. I. (2003). *Passive vibration isolation*. United States of America: American Society of Mechanical Engineers Press, 576-581.
51. Mead, D. J. (1998). *Passive vibration control*. United States of America: John Wiley and Sons Press, 422-425.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KOÇ, Çağrı
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.11.1990, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (507) 418 03 75
 e-mail : cagri.koc@tubitak.gov.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi/ Endüstri Mühendisliği	2014
Lise	Fethiye Kemal Mumcu Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Tubitak SAGE	Araştırmacı
2014-2016	Anova Proje ve Danışmanlık A.Ş.	Mekanik Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Koç, Ç. (2018, Kasım). *Titreşim yalıtımı için kullanılan elastomer bir malzemesinin metal ile bağlantı şeklinin yalıtım performansına ve dinamik özelliklere etkisi*. ISAS 2018 - Uluslararası Bilimsel Çalışmalarda Yenilikçi Yaklaşımlar Sempozyumu, Samsun.

Hobiler

Yüzme, Bağlama, Seyahat



GAZİ GELECEKTİR..