

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇAMAŞIR MAKİNESİ KÖRÜĞÜNÜN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ
VE MAKİNANIN DİNAMİĞİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve EMEKSİZ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Dinamiği, Titreşim ve Akustik Programı

ARALIK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇAMAŞIR MAKİNESİ KÖRÜĞÜNÜN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ
VE MAKİNANIN DİNAMİĞİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Merve EMEKSİZ
503151404**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Dinamiği, Titreşim ve Akustik Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK

ARALIK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503151404 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Merve EMEKSİZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇAMAŞIR MAKİNESİ KÖRÜĞÜNÜN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE MAKİNANIN DİNAMİĞİNE ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Kenan Yüce Şanlıtürk**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Erdinç Altuğ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Egemen Tınar
Arçelik A.Ş. Ar-Ge

Teslim Tarihi : 17 Kasım 2017
Savunma Tarihi : 14 Aralık 2017





Tüm sevdiklerime,



ÖNSÖZ

Gerek eğitim biçimi, gerek yaşam tavsiyeleri, bilgisi ve kişiliği ile bana ve birçok öğrenciye yol gösterici ve rol-model olan tez danışmanım, Prof. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK' e, bana bu çalışmada ve yaşamımda kattıkları için çok teşekkür ederim. Bunun yanında, Makine Dinamiği, Titreşim ve Akustik programında tüm diğer öğretim üyelerimize bizlere kazandırdıklarından dolayı minnettarım. Ayrıca çalışmalarımıdaki yardım ve sabrından dolayı Sn. Mehmet Sait ÖZER' e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına ortam sağlayan Arçelik A.Ş. ,Çamaşır Makinesi İşletmesi Yapısal-1 ekibine ve yöneticilerine, Titreşim-Akustik Ar-Ge birimine, geçmiş çalışma arkadaşım ve destekçim Aslı Gamze Dalkılıç'a, teşekkürlerimi sunarım.

Hiçbir zaman beni desteklemekten vazgeçmeyen annem Hayriye EMEKSİZ' e, her zaman arkamda duran babam M. Fuat EMEKSİZ, ablalarım Eda YILDIZ ve Seda AYKUT' a gönülden teşekkür ederim. Ayrıca, yüksek lisans eğitimimin bana kazandırdığı en değerli şey olan İbrahim ÇİYLEZ' e gerek çalışmalarımıdaki, gerekse manevi tüm desteği için minnettarım.

Kasım 2017

Merve EMEKSİZ
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Mevcut Problem	2
1.2 Literatür Araştırması	4
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsam	10
2. TEORİ	13
2.1 Titreşim ve Yalıtımı Teorisi	13
2.1.1 Tek Serbestlik Dereceli Sönümsüz Sistemler	14
2.1.2 Tek Serbestlik Dereceli Viskoz Sönümlü Sistemler	15
2.1.3 Yapısal Sönümlü Sistemler	16
2.1.4 Logaritmik Azalma	17
2.1.5 Dönen Dengesizliğin Oluşturduğu Titreşimler	19
2.1.6 Titreşim Yalıtımı	21
2.2 Viskoelastik Malzemeler	23
2.2.1 Viskoelastik Malzeme Modelleri	23
2.2.2 EPDM Malzeme	26
2.2.3 Malzeme Karakteristikleri	27
2.2.4 Malzeme Karakteristiklerine Etki Eden Parametreler	34
2.3 Malzeme Dinamik Özellikleri Test Yöntemleri	39
2.3.1 ASTM 756-05 Standardı ve Teorisi	40
3. KÖRÜK MALZEMESİ DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ	47
3.1 Çekme Testi- ASTM D412	47
3.2 Körük Malzemesi Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi	49
3.2.1 Oberst Yöntemi Hesaplamaları	50
3.3 Dinamik Mekanik Analiz Test Yöntemi Ve Ölçümler	60
3.4 Yöntemlerin Değerlendirilmesi ve Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi	64
4. KÖRÜK TEST DÜZENEGİ GELİŞTİRİLMESİ VE ÖLÇÜMLER	67
4.1 Körük Test Düzenegi Tasarım Çalışmaları	67
4.1.1 Körük Test Düzenegi Değerlendirilmesi	70
4.1.2 Test Düzenegi Simülasyonu ve Sonlu Elemanlar Analizleri	72
4.2 Test Düzenegi Ölçümleri	76
5. KÖRÜĞÜN ÇAMAŞIR MAKİNESİ DİNAMİĞİNE ETKİLERİ	81

5.1 Körüklü ve Körüksüz Titreşim �l��mleri.....	81
5.1.1 Körüksüz Titreşim �l��mleri.....	82
5.1.2 Körüklü Titreşim �l��mleri.....	84
5.2 MSC ADAMS ile Körüksüz ve Körüklü Tahrik Grubu Titreşimlerinin Belirlenmesi.....	85
5.2.1 MSC ADAMS ile Körüksüz Titreşim Sonuçları.....	86
5.2.2 MSC ADAMS ile Körüklü Deplasman Sonuçları	88
5.3 MSC Adams ve Test Verilerinin Analizi	89
6. GENEL DEĞERLENDİRME.....	93
6.1 Değerlendirme	93
6.2 İlerde Yapılabilecek �alışmalar	95
KAYNAKLAR.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
�ZGE�Mİş	100



KISALTMALAR

DMA	: Dinamik Mekanik Analiz
EPDM	: Etilen Propilen Dien Monomer
DMTA	: Dinamik Mekanik Termal Analiz
MTS	: Malzeme Test Sistemi
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Yöntemi Standartları(American Society for Testing and Materials)
DIN	: Alman Standartları Enstitüsü(Deustches Institut für Normung)
ISO	: Uluslararası Standartlar Organizasyonu(International Standardization Organization)
TSD	: Tek Serbestlik Dereceli
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
UFF	: Standart Dosya Formatı(Universal File Format)
FTF	: Frekans Tepki Fonksiyonu(Frequency Response Function)
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)



SEMBOLLER

k^*	: Dinamik direngenlik
m	: Kütle
k	: Direngenlik
c	: Viskoz sönüm elemanı
ω_n	: Doğal frekans
ω'_n	: Doğal frekansın kompleks bölümü
k_{re}	: Dinamik direngenlikte gerçek kısım
k_{im}	: Dinamik direngenlikte sanal kısım
η	: Kayıp faktörü
ζ	: Sönüm oranı
t_i	: i. Dalganın oluştuğu süre
t_{i+1}	: (i+1). Dalganın oluştuğu süre
T	: Periyod
X_i	: i. Dalga genliği
X_{i+1}	: (i+1). Dalga genliği
δ	: logaritmik azalma
e	: Eksantriklik [m]
m_u	: Dengesiz kütle [kg]
ω	: Dönme hızı, [rad/s]
x_p	: Deplasman(harmonik çözüm kabulü),
X	: Genlik(x yönünde)
A_1, A_2	: Katsayı
r	: Frekans oranı
E	: Lineer elastik yayın elastikliği
σ	: Oluşan gerilme
μ	: Sönüm elemanının viskozitesi
ε	: Gerinim(Şekil değiştirme)
$\dot{\varepsilon}$	: Gerinim hızı
ε_1	: Yayın şekil değiştirmesi
ε_2	: Viskoz sönüm elemanının şekil değiştirmesi
σ_1	:Yay gerilmesi,
σ_2	: Viskoz sönüm elemanı gerilmesi
S	: Shore A cinsinden sertlik
Ψ	: Faz açısı
G'	: Kayma saklama modülü
G''	: Kayma kayıp modülü
E'	: Çekme saklama modülü(storage modulus)
E''	: Çekme kayıp modülü(loss modulus)
G^*	: Dinamik kayma modülü
ν	: Poisson oranı
C_n	: Düzgün serbest çubuğun n. modunun katsayısı

E	: Çubuk malzemesinin dinamik elastiklik modülü
Δf_n	: n. modun yarım güç bant genişliği
H	: Titreşim yönündeki çubuğun kalınlığı
l	: Çubuğun boyu
n	: Mod sayısı
η	: Çubuk malzemesinin kayıp faktörü
ρ	: Çubuğun yoğunluğu
D	: Yoğunluk oranı
E	: Çıplak çubuğun dinamik elastiklik modülü
E_1	: Sönüm elemanının dinamik elastiklik modülü
f_n	: n. mod için çıplak çubuğun doğal frekansı
f_c	: Kompozit çubuğun doğal frekansı
Δf_c	: Kompozitin yarım güç bant genişliği frekansı
H	: Çıplak çubuğun kalınlığı
H_1	: Sönüm elemanının numune kalınlığı
M	: Dinamik elastiklik modülü oranları
T	: Kalınlık oranı
η_c	: Kompozit çubuğun kayıp faktörü, boyutsuz
η_1	: Sönüm elemanının kayıp faktörü
ρ	: Çıplak çubuğun yoğunluğu
ρ_1	: Sönüm elemanının yoğunluğu
J	: Atalet momenti

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Malzemelerin fiziksel özellikleri.....	9
Çizelge 1.2 : MER analizi sonuçları	10
Çizelge 1.3 : MTS analiz sonuçları	10
Çizelge 3.1 : Şekil 3.3.'te verilen çekme testinden bazı sonuçları çizelgesi	48
Çizelge 3.2 : Körük2 çekme testi sonuçlarından bazılarının çizelge görünümü	49
Çizelge 3.3 : Yalın halde ölçülen çelik ve körük ölçüleri.....	50
Çizelge 3.4 : Oberst Standartı çıplak çubuk ölçümü değerleri	51
Çizelge 3.5 : Oberst çıplak çubuk test sonuçları.....	52
Çizelge 3.6 : Oberst Standartı kontrol çıplak çubuğu değerleri.....	53
Çizelge 3.7 : Oberst Standartı kontrol çıplak çubuğu verileri	53
Çizelge 3.8 : Oberst kontrol çubuğu testi sonuçları.....	53
Çizelge 3.9 : Sadece Mercury yapıştırıcılı çubuk bilgileri	54
Çizelge 3.10 : Sadece Mercury yapıştırıcılı çubuk Oberst testi sonuçları	55
Çizelge 3.11 : Körük1- Mercury yapıştırıcılı çubuk hesaplanan katsayı sonuçları ..	55
Çizelge 3.12 : Körük1- Mercury yapıştırıcısı numuneli çubuk değerleri.....	55
Çizelge 3.13 : Körük1-Mercury yapıştırıcısı Oberst testi sonuçları	56
Çizelge 3.14 : Körük2- Mercury yapıştırıcılı çubuk için hesaplanan katsayı değerleri	56
Çizelge 3.15 : Körük2- Mercury yapıştırıcılı çubuk değerleri	56
Çizelge 3.16 : Körük2- Mercury yapıştırıcısı Oberst testi sonuçları	57
Çizelge 3.17 : Üzerinde sadece çift taraflı bant bulunan çubuk değerleri	58
Çizelge 3.18 : Sadece çift taraflı bant bulunan çubuğun Oberst test sonuçları	58
Çizelge 3.19 : Çift taraflı bant ve Körük1' den oluşan kompozit çubuk verileri	58
Çizelge 3.20 : Çift taraflı bant ve Körük1' den oluşan kompozit çubuk hesaplanan değerler	59
Çizelge 3.21 : Çift taraflı bant ve Körük1' den oluşan kompozit çubuğun Oberst testi sonuçları.....	59
Çizelge 3.22 : Çift taraflı bant-Körük2 kompozit yapısının verileri	59
Çizelge 3.23 : Çift taraflı bant- Körük2 kompozit yapısının Oberst testi sonuçları ..	60
Çizelge 3.24 : Oberst ve DMA yöntemleri ile elde edilen Körük1 ve Körük2 için dinamik elastiklik modülü ve kayıp faktörü çizelgesi	66
Çizelge 5.1 : Körüklü ve körüksüz test ve Adams sonuçları	89
Çizelge 5.2 : Test ve Korelasyon yapılmış Adams modeli verileri	91



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : EPDM'in farklı kullanımları	2
Şekil 1.2 : Çamaşır makinalarında kullanılan körük örnekleri	3
Şekil 1.3 : Viskoelastik malzeme için Kerwin modeli	5
Şekil 1.4 : Körük test düzeneği	5
Şekil 1.5 : İki eksenle tahrik veren körük test düzeneği	6
Şekil 1.6 : Çelik bilya ile plastik tabaka arasındaki sürtünmeyi belirlemek için kullanılan test düzeneği	8
Şekil 1.7 : Master curve yöntemi kullanılarak elde edilen veri örneği	8
Şekil 2.1 : Çamaşır makinası indirgenmiş model görünümü.....	13
Şekil 2.2 : Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistem modeli	14
Şekil 2.3 : Tek serbestlik dereceli viskoz sönümlü sistemin modeli	15
Şekil 2.4 : Yapısal sönümlü sistemlerin modeli	16
Şekil 2.5 : Serbest titreşim eğrisi	18
Şekil 2.6 : Dönel dengesiz bir sistemin indirgenmiş modeli	19
Şekil 2.7 : Viskoelastik malzemelerin titreşim yalıtımında kullanım şekilleri.	22
Şekil 2.8 : Geçirgenlik eğrisi	23
Şekil 2.9 : a) Lineer elastik yay ve b) viskoz sönüm elemanı modelleri	24
Şekil 2.10 : Maxwell Modeli	24
Şekil 2.11 : Voigt modeli.....	25
Şekil 2.12 : 3 elemanlı modellerin kombinasyonları a) Standart katı I, b) Standart katı II, c) Standart sıvı I, d) Standart sıvı II	26
Şekil 2.13 : Genelleştirilmiş modellerde a) Maxwell modeli b) Kelvin(Voigt) modeli.....	26
Şekil 2.14 : EPDM moleküler yapısı	27
Şekil 2.15 : ISO 1827 dört bloklu kayma testi örnek parça	28
Şekil 2.16 : Durometre testi mekanizması gösterimi	30
Şekil 2.17 : Çekme testinde viskoelastik malzemenin cevabı a) Kalıcı deformasyon verilerek yüklenip boşa çıkarılan malzeme b) farklı esneme oranları	30
Şekil 2.18 : Gerilme ve gerinim arasındaki ilişki	31
Şekil 2.19 : (a) Elastik bir katı ile (b) viskoelastik bir katının harmonik tahrik cevabı	31
Şekil 2.20 : Viskoelastik malzemelerin karakteristiklerine örnekler: (a) kayma gerilmesi altında sürünme davranışı (b) Gerilme rahatlaması sabit kayma gerinimi altında	32
Şekil 2.21 : Histerisis eğrisi	32
Şekil 2.22 : Elastiklik modülünün karmaşık ifadesinin grafiksel görünümü ..	33
Şekil 2.23 : Viskoelastik malzemenin karakteristiklerine etki eden parametreler	34
Şekil 2.24 : a) Kayma ve b) basma elemanı gösterimi	35
Şekil 2.25 : Ön yüklemenin viskoelastik malzemenin karakteristiklerine etkisi	36

Şekil 2.26 : Viskoelastik malzemelerde sabit frekansta elastiklik modülü ve kayıp faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi	37
Şekil 2.27 : Frekansa bağlı elastiklik modülü ve kayıp faktörü değişimi	38
Şekil 2.28 : Farklı sıcaklıklarda dinamik elastiklik modülü (depolama modülü) eğrileri	39
Şekil 2.29 : ASTM E-756 Standardının test düzeneği varyasyonları	41
Şekil 2.30 : Oberst test düzeneği	42
Şekil 2.31 : Termal odada Oberst düzeneği.....	45
Şekil 3.1 : Çekme testi standart numune ve ölçüleri.....	47
Şekil 3.2 : Zwick/Roell Z020 test cihazı.....	48
Şekil 3.3 : Körük1 hamuru çekme testi sonuçları.....	48
Şekil 3.4 : Körük2 hamuru çekme testi sonuçları.....	49
Şekil 3.5 : Standartlara uygun alınmış iki Oberst testi sönüm malzemesi numunesi	50
Şekil 3.6 : ICATS yazılımı kullanılarak yapılan modal analiz çalışması	51
Şekil 3.7 : Test1’de elde edilen dinamik elastiklik modülü ve sönüm değeri ..	52
Şekil 3.8 : 1. modun çıkartılması ile elde edilen Elastiklik modülü ve sönüm değeri.....	53
Şekil 3.9 : Mercury yapıştırıcısı kullanımının Oberst testinde oluşturduğu problemler(a) taşma, (b) ayrılma.....	57
Şekil 3.10 : Çift taraflı bant ve Körük1’ den oluşan kompozit çubuğun elastiklik modülü ve kayıp faktörünün frekansa bağlı değişimi	60
Şekil 3.11 : TA Instruments tarafından sunulan test aparatları görseli [33]	61
Şekil 3.12 : Frekansa bağlı Körük1(SYK) ve Körük2(e450) depo modülü (dinamik elastiklik modülü) sonuçları.....	622
Şekil 3.13 : Körük1(SYK) ve Körük2(e450) kayıp faktörü sonuçları.....	62
Şekil 3.14 : (a) Depo modülü (b) kayıp modülü (c) kayıp faktörü DMA değişken sıcaklık analizi Körük2 sonuçları.....	63
Şekil 3.15 : Körük1’in dinamik elastiklik modülü istenilen frekans aralığı verileri eldesi	65
Şekil 3.16 : Körük2’nin dinamik elastiklik modülü istenilen frekans aralığı verileri eldesi	65
Şekil 4.1 : (a)Alternatif tasarım1 (b) Alternatif tasarım2 (c)Alternatif tasarım3 CAD(bilgisayar destekli tasarım) gösterimi.....	68
Şekil 4.2 : Test düzeneği parçaları.....	69
Şekil 4.3 : Kıvrılma bölgelerinde yapılan feder güçlendirmeleri	69
Şekil 4.4 : (3) numaralı parçanın kaynak güçlendirmeleri	70
Şekil 4.5 : (1) numaralı parça olan kapakta çekiç testi yapılışı	70
Şekil 4.6 : (1) numaralı parçada FTF ölçümü	71
Şekil 4.7 : Test düzeneği serbest cisim diyagramı.....	71
Şekil 4.8 : Körük2 Katı Modeli	72
Şekil 4.9 : Körük2 kesit görünümü.....	73
Şekil 4.10 : Körük2 ağ(mesh) modeli.....	73
Şekil 4.11 : CONM2 kütle elemanının ve modelin gösterimi	74
Şekil 4.12 : (a) z yönü ilk modu 4,5 Hz (b) x yönü ilk modu 10 Hz (c) y yönü ilk modu 10 Hz gösterimleri.....	75
Şekil 4.13 : Körük2 için Frekans cevabı analiz sonuçları.....	75
Şekil 4.14 : Körük2 düzeneğinde ölçüm gösterimi.....	76
Şekil 4.15 : PULSE yazılımından elde edilen zamana bağlı genlik örneği	77
Şekil 4.16 : X yönü direngenlik eğrisi	77

Şekil 4.17 : Y yönü direngenlik eğrisi.....	78
Şekil 4.18 : X yönü kayıp faktörü eğrisi.....	78
Şekil 4.19 : Y yönü kayıp faktörü eğrisi.....	78
Şekil 5.1 : Çamaşır makinesi CAD modeli üzerinden ölçüm noktalarının gösterimi.....	82
Şekil 5.2 : Körüksüz kazan ön x zamana bağlı deplasman verisi.....	83
Şekil 5.3 : Körüksüz kazan ön y zamana bağlı deplasman verisi.....	83
Şekil 5.4 : Körüksüz kazan ön z zamana bağlı deplasman verisi.....	83
Şekil 5.5 : Körüklü kazan ön x yönü zamana bağlı deplasman verisi.....	84
Şekil 5.6 : Körüklü kazan ön y yönü zamana bağlı deplasman verisi.....	84
Şekil 5.7 : Körüklü kazan ön z yönü zamana bağlı deplasman verisi.....	85
Şekil 5.8 : MSC Adams modelinde ölçüm noktalarının gösterimi.....	86
Şekil 5.9 : Körüksüz Adams ön x yönü deplasman verileri.....	87
Şekil 5.10 : Körüksüz Adams ön y yönü deplasman verileri.....	87
Şekil 5.11 : Körüksüz Adams ön z yönü deplasman verileri.....	87
Şekil 5.12 : Adams'ta körük tanımlaması için belirlenen yay-sönüm noktaları.....	88
Şekil 5.13 : Adams körüklü kazan ön x yönünde deplasman verileri.....	88
Şekil 5.14 : Adams körüklü kazan ön y yönünde deplasman verileri.....	89
Şekil 5.15 : Adams körüklü kazan ön z yönünde deplasman verileri.....	89
Şekil 5.16 : Körüklü korelasyon yapılmış modelin x yönündeki deplasman sonuçları.....	90
Şekil 5.17 : Körüklü korelasyon yapılmış modelin y yönündeki deplasman sonuçları.....	91
Şekil 5.18 : Körüklü korelasyon yapılmış modelin z yönündeki deplasman sonuçları.....	91



ÇAMAŞIR MAKİNESİ KÖRÜĞÜNÜN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE MAKİNANIN DİNAMİĞİNE ETKİSİ

ÖZET

Beyaz eşya gibi yüksek üretim adetlerine sahip olan bir sektörün ürünlerinden biri de çamaşır makinesidir. Bu sektörde, her komponentten gelecek olan artı ve eksiler kritiktir. Bir parçanın etkisi birkaç parçada veya tüm makine üzerinde görülebilirken aynı zamanda bu parça algı, kalite, ömür gibi parametrelere de etki etmektedir. Çamaşır makinesinin hem görsel hem de dinamik bir eleman olan körük de sistemde hareketli ve hareketsiz parçaları bağlayan bir unsur olarak kritiktir. Körüğün gerek fonksiyonları gerekse sınır koşulları nedeniyle, tasarımı ve malzeme konusu büyük öneme sahiptir. Körüğün etkin olduğu yapısal konulardan biri tahrik grubu deplasmanlarıdır. Tahrik grubu deplasmanlarının bilinmesi, çamaşır makinesinin genel tasarımı anlamında en etkin konular arasındadır. Bu nedenle tasarım aşamasında çamaşır makinesinin bir yazılım kullanılarak modellenmesi ve tahrik grubu deplasmanlarının elde edilmesi, yeni ürün veya ürün geliştirme çalışmalarına yön verecei olacaktır. Körüğün böyle bir modele dahil edilmesi ise, viskoelastik yapısı kaynaklı zorlayıcı bir mühendislik problemidir. Çamaşır makinesi tahrik grubuna dahil olan körüğün dinamik özelliklerinin belirlenmesi ise bu problemi çözmenin gereğidir.

Tez çalışmasında, karşılaşılan problemin öncelikli olarak literatürde mevcut bir çözüme veya yaklaşıma sahip olup olmadığı araştırılmıştır. Viskoelastik malzemelerin dinamik özelliklerinin test veya sonlu elemanlar yöntemleri ile belirlenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmış, tezlerde test düzenekleri geliştirilmiştir. Fakat istenilen tüm adımlara körüğün dahil olduğu, özelliklerin belirlenip, dinamik bir modelin kurulduğu bir çalışma yapılmamıştır. Daha sonraki bölümde ise çalışmanın temel bilgisinin toplanması adına titreşim, titreşim yalıtımı, körük malzemesi ve modellenmesi, viskoelastik malzeme test yöntemleri ve mekanik altyapının oluşturulduğu teori bölümü sunulmuştur.

Birinci ve ikinci bölümde yapılan çalışmalar tezin amacı doğrultusunda hangi test-analiz yöntemlerinin ve teorik alt yapının kullanılması ile ilgili belirleyici olmuştur. Üçüncü bölümde ise körük malzemesi olan EPDM' in dinamik özelliklerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Önce statik bir test olan çekme testi, daha sonra dinamik test yöntemleri olan Oberst Testi ve Dinamik Mekanik Analiz çalışmaları yapılmıştır. Bu yöntemler eksi ve artı yönleriyle ile değerlendirilmiş, malzeme için dinamik elastiklik modülü ve kayıp faktörü değer aralığı frekansa bağlı elde edilmiştir. İlgilenilen frekans aralığındaki veriler sonraki sonlu eleman analizleri bölümünde malzeme kartında kullanılmıştır.

Bir sonraki bölümde, körüğün dinamik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla körük test düzeneği geliştirilmiştir. Düzenek geliştirilmeden önce alternatif tasarım çalışmaları yapılmış, düzeneğin planlanan testleri yapmaya uygunluğu sağlanmış ve daha sonra imal edilen düzenekte testler yapılmıştır. Test düzeneğinden toplanan veriler, logaritmik azalma yöntemi ile değerlendirilmiş ve dinamik direngenlik ve kayıp faktörü verileri genliğe bağlı elde edilmiştir. Test düzeneğinin ve körüğün sonlu

elemanlar yazılımında modellemesi ve analizi yapıldıktan sonra, test ile model korelasyonu karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde ise tezin başlangıçta belirtilen amacına son adım olan çoklu cisim dinamiği yazılımı olan MSC Adams'ta bir çamaşır makinası modeli kurulmuş; bu model analizleri körüksüz ve körüklü durumda tahrik grubu üzerinden elde edilmiştir. Bu model kurulurken ve öncesinde test ile korelasyonu yapılmış güvenilir bir model elde etmek amacıyla körüklü ve körüksüz durumda çamaşır makinesi tahrik grubuna titreşim testi yapılmıştır. Çoklu cisim dinamiği modeli ve test sonuçları karşılaştırılmış; yaklaşımlar yapılmış ve korele bir modele yaklaşılmıştır. Son olarak altıncı bölümde tezin genel değerlendirilmesi yapılmış, tez çalışmasında önemli noktalar vurgulanmıştır. Sonuçlar hakkında yorumlar yapılmış, ileride bu konuda yapılabilecek çalışmalar hakkında fikirler öne sürülmüştür.



DETERMINATION OF WASHING MACHINE GASKET CHARACTERISTICS AND ITS EFFECT ON MACHINE DYNAMICS

SUMMARY

Washing machine is one of the products in white goods industry and, in this sector, every pros and cons of components are critical due to very high production volume and cost multiplication. While a part can affect another part or the whole machine, it might also affect the other parameters such as sense, quality and machine life. Washing machine gaskets mainly used for sealing purpose, which is a dynamic part of a washing machine for connecting moving and static parts. Springs and dampers are other parts connecting dynamical tub to the panels of the washing machine. There are many different types of washing machine gasket for different brands and these differences are associated with design, color or material. The design and material topic aspects of gasket have high importance as they affect the performance of the gasket directly. Gasket affects the dynamic of the washing machine, including the displacement of dynamic group of washing machines. In this thesis, displacement of tub group of the washing machine is mentioned as displacement of dynamic group or oscillating group. The displacements, or vibrations, of a dynamic group is one of the most important design criteria for washing machine. Therefore, it is very important to model, analyse the washing machine in order to predict the displacements of dynamic group accurately during the design stage. Early stage design parameters will lead to new feasible designs which is very important for competition. Since gasket is a viscoelastic material, including a gasket into a mathematical model is a challenging engineering problem due to nonlinear behaviour of the material and the contacts between the gasket and the other parts of the machine. To solve this problem, the dynamic characteristics of a gasket of washing machine should be determined.

In this study, firstly the literature was searched to find out related work done by others. Similar unknown parameters for different materials have been found to be an issue for engineering studies since 1930s and Kerwin's sandwich model is a milestone for viscoelastic material modelling and testing. After this, very important study for viscoelastic material testing method was developed by Oberst. Oberst was developed a testing method based on beam theory and composite structures. There are examples of studies which include determination of a viscoelastic material dynamic properties by testing or finite element analysis. The studies are limited as focusing on material analyzing or finite element modelling only. There are also limited dynamical model studies for washing machines with different assumptions. However, there is no study covering the objectives of this thesis as determination of gasket properties and building up a dynamic model. After the literature survey presented in this thesis, the relevant theory was summarised comprising vibration, vibration isolation, gasket material and its modelling theory, and viscoelastic material testing methods. The studies presented in the first and second chapters have been critical to decide which test and analysis methods to be to meet the objectives of this thesis.

In the third chapter, determination of the gasket material dynamic properties is aimed. The material of the gaskets is EPDM for almost all brands with different additive rates, colors and designs. EPDM is syntetic rubber which is a type of viscoelastic material. It is widely used in electrical insulation and sealing for different sectors. Although common usage of EPDM in different industrial areas, non-linear material characteristics examination is a challenging topic. Firstly, a tensile test is performed to identify the static behaviour of the gasket material. The standard tensile test data was evaluated for different elongation rates and the lineer zone is shown to be up to %300 elongation with 3 to 5 MPa elasticity modulus. This test is performed to identify brief information for beginning. After this, dynamical material testing methods which are Oberst Beam Method and Dynamic Mechanical Analysis are performed. Oberst Beam Method is applied to two types of gasket materials with two different types of adhesives which are double sided tape and loctite. Advantages and limitations of these methods are evaluated and minuses and ranges of dynamical elasticity modulus and loss factor value are determined as a function of frequency. For the test with loctite, there were problems such as non-homogenous bonding, leakage of loctite from the edges and split of gasket samples from the beam after a time. Double sided tape results were found to be more reliable since matching viscoelastic material behaviour in the literature and these results are used in finite element analysis explained in the third chapter.

After the Oberst Method, Dynamic Mechanical Analyzing(DMA) method is also used to identify the dynamic characteristics of gasket in order to have increase the reliability of the estimated material properties. DMA is executed by a testing machine at different frequency and temperatures. There are different types of DMA for different materials and the shear mode is suggested for viscoelastic material samples. An approximation between shear and elastic modulus is used for parameter transformation. A DMA was performed both for variable frequency and temperatures for two types, namely gasket1 and gasket2. For the variable frequency test, the range between 1 Hz to 100 Hz was scanned at constant tempature, 30°C. For the variable temperature test, the range is between 2°C to 95°C which was performed only on gasket2. The results of both dynamical material testing method was evaluated for dynamic elastic modulus and loss factor. Since the DMA tests are performed using the material gasket only, the effect of beam and adhesive used in Oberst Test Method was eliminated. The loss factor range provided from DMA is proper according to the literature. A comparison between temperature and frequency analysis is performed for accuracy. Material properties identified from tests are used in the finite element analyse as a material card with covering values of both method.

In the next chapter, the design and construction of a gasket testing setup are described. This test rig is then used for determination of the dynamical properties of gaskets. Simultaneously, finite element modelling is performed in Hypermesh software. The finite element model is symmetrical shell model which extracted from 3D SolidWorks data with different thickness values. The gasket is modelled as an axisymmetric. Before the development of experimental setup, alternative design studies were carried out and it was checked whether the setup was appropriate to perform the planned. Then the gasket test setup is built and impact tests are perfomed. The vibration signals in time domain are collected from the test setup with PULSE software. These datas were evaluated by logarithmic decrement method and the dynamic stiffness as well as loss factor values are obtained. After modelling and analyzing the test setup and gasket, the

test results of the test and finite element model predictions are compared and correlated.

In the fifth chapter, dynamic model of a washing machine is described. The model is created using multibody dynamics software, MSC Adams. Before and during the modelling on MSC Adams, a vibration test is performed on the washing machine dynamic group to provide some experimental data for the purpose of creating a reliable model. For the testing purpose, a washing machine is picked from the production line and a vibration test is performed on the dynamic group of the washing machine on the pre-determined locations. This test was repeated three times to avoid measurement errors. These tests were carried out with a gasket and without a gasket. The multibody model preparation covers collecting 3D design data of the all related parts of the machine. Since it is not possible to model every part of the machine in the Adams software, the parts to be modelled are selected. This solid body data was exported from UG NX software to MSC Adams and the material data for each component was defined in the model. The springs and dry friction dampers were tested to check the expected stiffness and force respectively. After this, electrical motor of the washing machine including its time-speed algorithm is defined in the model. This data is an input for rotational velocity of the system which affects the displacements considerably.

The model included many details of a washing machine, including two counter weights, front and back tub, drum, three drum wings, flange, shaft, housing, pulley, electric motor, two springs and two dampers. These components were assembled using appropriate tools in the software. The electric motor gives an excitation to its shaft, it is transferred to belt and pulley, then it rotates the shaft and shaft rotates the flange which is connected to the drum with screws. The flange rotates with the drum and in this way rinsing and spinning occurs. The results of the first Adams model results wasn't close to test results, which required updating the bushing elements used for defining the joints. As one might expect, one of the most important components affecting the resonance vibration levels results was found to be the friction dampers. Since there is no readily available model or library on the for these dampers, a dry friction damper is explicitly modelled at the end of a lot of pre-damper studies. The washing machine model was created without a gasket first, and in this condition motor algorithm is applied as rotational velocity and displacement results were collected from Adams Postprocessor along three orthogonal directions x, y and z. It should be considered that the algorithm of electric motor is very important for behaviour of vibration data and vibration levels. The electric motor algorithm is not shared due to company restrictions. For the purpose of modelling the damper properties of the gasket, the experimentally identified logarithmic decrement results were utilised and equivalent viscous dampers are defined in the model via related equations. Then, the dynamics of the machine is simulated using the washing model with the gasket. The results of the multibody dynamics model and test results were compared and correlated. For the accurate parameters, so many iterations are performed in Adams. Results are assessed so as to determine a gasket yielding lower vibration levels.

Finally, the work done in this thesis is evaluated and the critical points are highlighted for every chapter briefly. All assessments and comparison studies are summarized and directed for topics that should be focused. Furthermore, some ideas for future work and new methods for developing this process has outlined.



1. GİRİŞ

Sürekli gelişmekte ve yenilenmekte olan beyaz eşya sektöründe, görsel ve fonksiyonel tasarımlarda çok yönlülük giderek önem kazanmıştır. Hem mekanik hem de elektronik yönde ilerleme gösterilmesiyle oluşan rekabette, ürünleri veya firmaları bir adım öne geçirecek en ufak çalışmalar bile önem kazanmakta, maliyet düşürme ve pazarlamaya destek hedeflenmektedir. Çamaşır makinesinde de bu tip bir eğilim görülmekte, son yıllarda çamaşır makinesi parçalarına yüklenen fonksiyonlar artmaktadır.

Bir çamaşır makinesinden beklenen temel fonksiyon, makinenin en iyi şekilde çamaşırı yıkamasıdır. Bu yıkama fonksiyonunda yırtmama, iyi sıkma, enerji tüketimi, yıkama süresi gibi birçok alt parametre bulunmaktadır. Çamaşır makinesinde yapılan en önemli çalışmalardan biri de titreşim ve gürültüyü azaltmaya yöneliktir. Titreşim ve gürültünün azaltılması için kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır ve bu yöntemler mühendisliğin çamaşır makinesi uygulamalarında da görülmektedir. Titreşim ve gürültü değerlendirilirken en öne çıkan bileşenler yay, amortisör ve panellerde kullanılan keçelerdir. Fakat bunun yanında titreşim ve gürültüye etki eden başka bileşenler de bulunmaktadır. Bu bileşenlerden irdelenmesi gerekenlerden biri de körüktür.

Körük, çamaşır makinesinde çeşitli fonksiyonlar yüklenmiş bileşenlerden biridir. Hem fiziksel hem kimyasal hem de mekanik özelliklerine dikkat edilerek çamaşır makinesi için körük tasarımı veya seçimi yapılır. Bu tez kapsamında çamaşır makinesinin körüğünün üzerinde durulan esas konu, mekanik özellikleridir ki bunun yanında birçok fiziksel ve kimyasal özellik de incelenmiştir. Körük gerek malzeme yapısı gerekse tasarımı ile titreşim ve gürültü azaltma amaçlı yapılacak çalışmalarda etkilidir. Özellikle çamaşır makinesi dinamik sistemini karakterize eden yay ve amortisörler dışında, gövdeyle tahrik grubu arasındaki sönüm ve direngenlik parametrelerini içermesi nedeniyle makinanın dinamik davranışı üzerinde etkilidir. Bu nedenle körük, viskoelastik bir malzeme olarak ele alınarak, dinamik karakteristikleri olan dinamik direngenlik ve kayıp faktörü özelliklerinin, geliştirilen veya standartlaştırılmış testlerle ve analizlerle ortaya konulması, bu parametrelerin

etkilerinin belirlenmesi ve çamaşır makinesi dinamiğine yansımalarının araştırılması gerekmektedir.

1.1 Mevcut Problem

Çamaşır makinesi krĞindeki kullanımının yanı sıra endüstrinin birçok alanında kullanılmakta olan viskoelastik malzemeler, her zaman aynı koşullar altında çalıştırılmamaktadır. Bu nedenle bu elemanlara gelen kuvvet ve gerilmelerin farklı olması yanı sıra, dinamik ve statik durumlarda da körük, farklı özellikler göstermektedir. Bu nedenle kullanılan makineye olan etkisinin belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir.Krkte kullanılan malzeme olan EPDM(Etilen propilen dien monomer), viskoelastik bir malzemedir. Körüğün çeşitli koşullar altında makinenin dinamiğine etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Körük, amaşır makinesi için sadece sızdırmazlık sağlayan bir eleman değildir. Sızdırmazlık ile beraber, körüğe eklenmiş birçok görev vardır. şekil 1.1’de EPDM’in farklı kullanımları görülmektedir.



şekil 1.1 : EPDM’in farklı kullanımları [1]

Körüğün temel fonksiyonları:

- Sızdırmazlığı sağlamak
- Tambura yükleme boşaltma açıklığı sağlamak
- amaşırın kazan-tambur arasındaki boşluğa girmesini engellemek
- Müşteri beğenisini sağlayacak estetik uyumu sağlamak

- Yürümeyi engellemek için tahrik grubu hareketlerini sönümleyip gövdeye mümkün olduğunca az kuvvet iletmesini sağlamak
- Gövde ile tahrik grubu arasında direngenlik sağlamak

Körük, yay ve amortisörlerle birlikte tahrik grubunun gövde içerisinde gerçekleştirdiği hareketleri, gövdeye ileten bir titreşim plakası oluşturduğundan çamaşır makinası dinamiği açısından oldukça önemli bir elemandır. Şekil 1.2’de gösterilen öğeler bazı çamaşır makinalarında kullanılan körüklere örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 1.2 : Çamaşır makinalarında kullanılan körük örnekleri

Viskoelastik bir malzeme olan körük malzemesi EPDM’ in mekanik özelliklerini özellikle de titreşim ve gürültü açısından dinamik karakteristiklerini belirlemek için çalışma yapılarak dinamik sisteme etkileri belirlemek önem taşır. Viskoelastik malzemelerin mekanik özellikleri sıcaklıkla ve frekansla önemli ölçüde değişmektedir. İdeal bir körükten beklenen özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bütün çalışma frekanslarında düşük dinamik direngenlik göstermesi
- Makinanın rezonans frekanslarında yüksek sönüm özellikleri göstermesi
- Yay askı frekansları üstü frekanslarda düşük sönüm özellikleri göstermesi
- Dinamik direngenlik ve kayıp faktörü özelliklerinin frekans ve genlikle yüksek değişim göstermemesidir.

Körük sabit bir gövde ile hareketli bir kazan arasında çalışmaktadır. Mevcut kaldığı baskın gerilmeler: çekme, basma ve kayma gerilmeleridir.

Körükten beklenen tüm bu özelliklerin yanında, mevcut kullanılan körüklerin özelliklerinin bilinmesi ve güvenilir ölçüm yapılabilirlik konuları net değildir. Mevcut

körüğün titreşim açısından parametrelerinin belirlenmesi ve bunun optimize edilmesi önemli bir mühendislik problemidir.

1.2 Literatür Araştırması

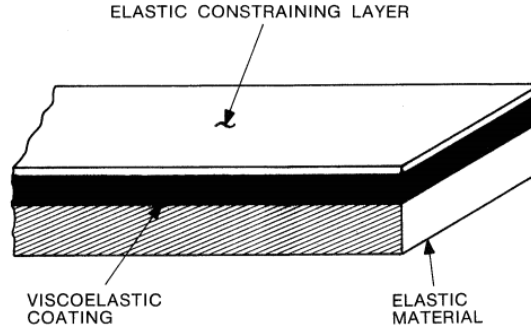
Bu bölümde tez kapsamında kullanılan malzemeler, bu malzemelerin karakteristiği, test yöntemleri ve sonlu elemanlar ile modellenmesi üzerine, literatürdeki kaynakların taranması ile elde edilenler değerlendirilmiştir. Malzemelerin karakteristiği, test yöntemleri ve sonlu elemanlar modellemeleri bölümünde çalışmanın esas amacı olan dinamik özelliklerin belirlenmesi üzerinde durulmuştur.

Viskoelastik malzemelerin özelliklerinin belirlenmesiyle ilgili çalışmaların gelişimi kısaca şu şekildedir:

1930larda Foppl, Zener ve Davidenkof metallerin sönümü üzerine çalışmışlardır; yine o yıllarda Leaderman tarafından bakalit üzerinde sönüm belirlenmeye çalışılmıştır. 1950’lerde ise Ferry, Nolle, Leaderman, Fletcher ve Gent, Rouse ve Sittel, Philippof, Becker, Robinson, Maxwell ve Kurtze, Oberst, Grootenhuis, Painter, McCrum, Rose ve Kerwin Myklestad çalışmaları görülmüştür [2].

Viskoelastik malzemede kaplama yöntemiyle sönüm özelliklerini belirleme konusunda ilk çalışmaları yapan Oberst, elastik bir plaka üzerine yapılmış viskoelastik bir kaplamanın eğilme çubuğu üzerinde titreşim özelliklerini gözlemlemiş ve kompozit materyalin sönüm karakteristiğini belirleyen tek parametrenin kayıp faktörü değil, aynı zamanda esneklik katsayısı ve kalınlık olduğunu belirlemiştir.

Kerwin ise kayma durumunda sönüm özelliklerini belirleyen ilk çalışmaları yapmış; kompleks bir esneklik ilişkisi tanımlamıştır. Şekil 1.3’te gösterimi yapılan ve Kerwin’in çalışmasında ele alınan sonsuz uzunluktaki veya basit mesnetli çubuk bağlantısı DiTarantino ve Blasingame tarafından iki elastik tabaka arasındaki viskoelastik malzeme şeklinde çubukların konumlanması durumuna, daha sonra Mead ve Markus, DiTarantino’nun çalışmasını geliştirmiştir. [3]

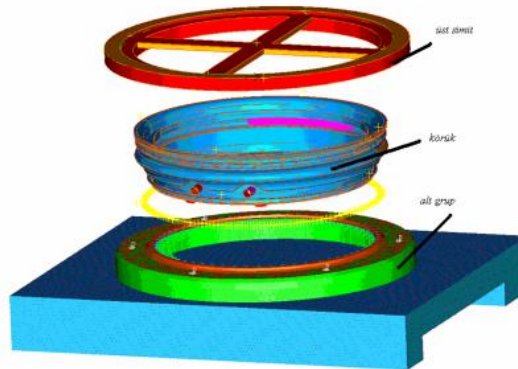


Şekil 1.3 : Viskoelastik malzeme için Kerwin modeli [3]

1960larda ise viskoelastik malzemelerle ilgili çalışmalarda artış görülmüş, 1970’lerde önemli bir şekilde viskoelastik malzemeye parametrelerin etkisi frekans ve zaman bileşenlerinde tanımlanmış ve çalışmalar teorik ve deneysel olarak ilerlemiş, bu konuda bilgi birikimi ile beraber önemli yayınlar yapılmıştır. Viskoelastik malzemelerin dinamik özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar günümüzde de farklı yöntemlerle devam etmektedir. [2]

Levent [4], yüksek lisans tez çalışmasında viskoelastik malzemeye sahip buzdolabı kompresör takozlarının lineer olmayan dinamik davranışlarını frekans tepki fonksiyonu, logaritmik azalma yöntemi ve direk yöntem ile incelemiş ve karşılaştırmıştır.

Varol [5], çalışmasında viskoelastik elemanların, özellikle çamaşır makinesinde kullanılan farklı körüklerin dinamik özelliklerinden kayıp faktörü ve elastiklik modülünü frekansa bağlı olarak belirlerken Oberst yöntemini kullanmış; körük dinamik özelliklerini belirlemek üzere Şekil 1.4.’te görülen test düzeneğini geliştirmiştir. Bu körüğün çamaşır makinası gövde titreşimlerine etkisini test etmiştir.

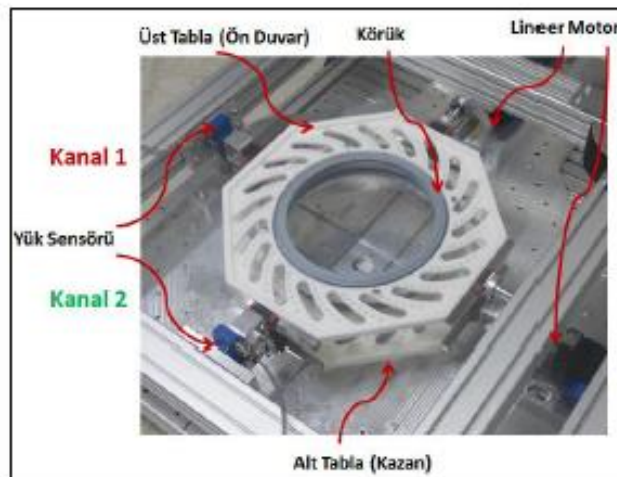


Şekil 1.4 : Körük test düzeneği [5]

Körük [6], doktora tez çalışmasında pasif sönümlü yapıların karakterizasyonu, modellenmesi ve optimizasyonu ile ilgili metotların geliştirilmesini ve önerilmesini ve bu konular üzerinde analitik, sayısal ve deneysel yeni çalışma yöntemleri sunmuştur. Oberst kirişi metodundaki tahrik genliği, bağlantı şartları, bağlantı türü ve test numunelerinin uzunluğu gibi parametrelerin etkileri incelenmiştir. Oberst kiriş metodundaki temassız sarsıcının elektromanyetik etkileri belirlenmiş ve modellenmesi yapılmıştır. Testlerde sönüm belirsizliği verideki gürültü düzeyinin fonksiyonu olarak ortaya konmuştur. Sönümün modellenmesinde de modal enerji yöntemi kullanılmıştır.

Özer [7], yüksek lisans tez çalışmasında viskoelastik malzemelerin karakterizasyonu ve viskoelastik malzemeleri yapıların modellenmesi üzerine çalışmıştır. Tek tarafı sönüm malzemeli çubuk, çift tarafı sönüm malzemeli çubuk ve iki metal çubuk arasına sönüm malzemesi konularak oluşturulan numuneler için çeşitli frekans çözünürlüklerinde ölçümler yapılmıştır. Sönüm parametrelerinin değerlerini belirlerken frekans çözünürlüğünün etkisi, modal analiz yönteminin etkisi ve manyetik tahrik altındaki uzunluğun etkisi incelenmiştir. Testlerde Oberst ölçüm düzeneği kullanılmıştır.

Uysal [8], çamaşır makinasının dinamik davranışının modellenmesi çalışmasında Şekil 1.5.'te görülen körük test düzeneği ile körüğün iki ekseninde elastiklik katsayısının tek bir frekans için elde etmiş ve çamaşır makinası körük parametresini bu şekilde belirlemiştir.



Şekil 1.5 : İki ekseninde tahrik veren körük test düzeneği [8]

Ollson [9], doktora çalışmasında kauçuk malzemelerin dinamik özelliklerinin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi üzerine çalışmıştır. Çalışılan beş makaleden

ilkinde, genliğe bağılı kauçuğun dinamik özellikleri sonlu elemanlar programında viskoelastik model ile elastoplastik modellerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. İkinci makalede ise ilk modelde elde edilmesi gereken verileri, harmonik kayma testi deneyleri ile elde etmiştir ve modele uygun hale getirmiştir. Üçüncü makalesinde kauçuk malzemeden, radyal yüklemeli bir burç modellemiş ve test verileriyle sonlu elemanlardan gelen dinamik cevabın sonuçlarını karşılaştırmıştır. Dördüncü makalede kararlı hal yükü uygulanan bir viskoelastik model üzerine çalışılmış ve son makalede viskoplastik ve viskoelastik modeller, kauçuk kaplamalı silindirler için yuvarlanma teması durumundaki non-lineer durumu göstermek amacıyla karşılaştırılmıştır.

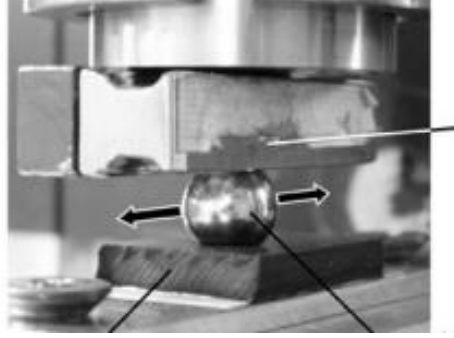
Rao, Gruenberg ve Griffiths [10], otomobillerdeki egzozunu bağlayan elastomer malzemenin, otomobilin gövdesine iletilen titreşimlerde etkili bir parametre olacağını ve simülasyon çalışmalarında da kullanmak üzere elastomer malzemenin dinamik karakteristiklerinden elastiklik ve sönüm değerlerini elde etmeye çalışmışlardır. Bu karakteristiklerin test ile belirlenmesinde sarsıcı metodu ve hidrolik tahrikli sistem metodu kullanılmış; yöntemler arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Körük ve Şanlıtürk [11], sönüm malzemelerinin dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla Oberst test yöntemini kullanmış; bu yöntem kullanılarak yapılan ölçümlerde kesinliği sağlamak için tahrik kuvveti genliği, elektromanyetik etki, test numunesi ve hazırlanmasıyla ilgili testler üzerine çalışılmıştır. Oberst testlerinde doğru sonuçlar için tekrarlanabilirliğin önemi belirtilmiştir.

Lin, Farag ve Pan [12], kauçuk yatak elemanının çekiç testi ile sönüm ve elastiklik özelliklerinin frekansa bağılı belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Dinamik koşuldan statik koşula geçişte elastik özelliklerin belirlenmesi, mekanik sarsıcı metoduyla doğrulama, tek serbestlik dereceli model yaklaşımıyla kıyaslama ve kauçuğun non-lineerliğinin gösterilmesi üzerinde durulmuştur.

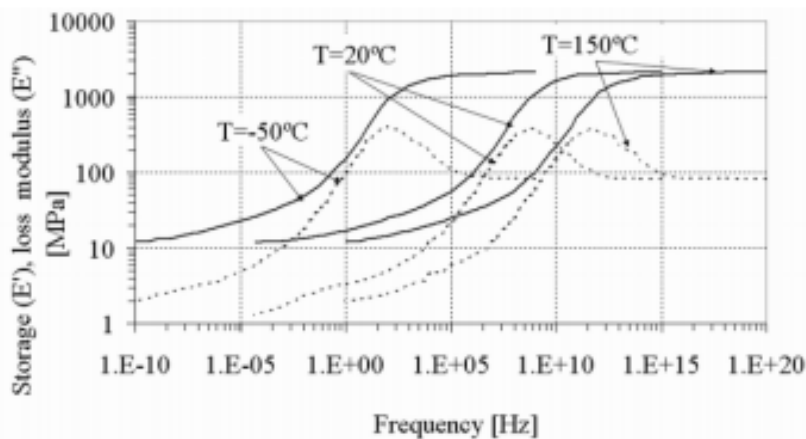
Felhös, Xu, Schlarb, Váradı ve Goda [13], EPDM malzemenin viskoelastik karakterizasyonu ve kuru yuvarlanma sürtünmesinin sonlu elemanlar ile simüle edilmesiyle ilgili çalışma yürütmüşlerdir. Şekil 1.6'da gösterildiği üzere temel amaç olarak plastik bir plaka ile üzerinde yuvarlanan çelik bir bilya arasındaki sürtünme kuvvetini belirlemektir. Bu çalışma için yapılanlardan biri de EPDM malzeme testi için DMTA(dinamik mekanik termal analiz) sonuçları, malzemenin davranışı için

uygun 15 terimli Maxwell modeli ve elde edilen verilerle sonlu elemanlarla yuvarlanma sürtünmesi durumunda oluşacak özelliklerin belirlenmesidir.



Şekil 1.6 : Çelik bilya ile plastik tabaka arasındaki sürtünmeyi belirlemek için kullanılan test düzeneği [13]

Pálfi ve Váradi [14], EPDM'in viskoelastik karakteristiklerinin verilerini, enerji kaybı tahmini yapılması için, sonlu elemanlar analizine entegre etmeye çalışmışlardır. Zamana ve sıcaklığa bağlı EPDM'in ölçümleri DMTA ekipmanları ile yapılmış; ayrıca zaman-sıcaklık bağıntısı ilişkisi kullanılarak master curve yöntemiyle değişik sıcaklıklarda eğriler Şekil 1.7.'deki gibi elde edilmiştir. Sistemin zamana ve sıcaklığa bağlı dinamik davranışı, farklı Maxwell modelleri kullanılarak, sonlu elemanlar modeline eklenmiştir. Sonlu elemanlar ve DMTA sonuçları temel alındığında, 15 terimli Maxwell modelinin master curve için sönüm karakteristiklerinde yanlış sonuçlar oluşturduğu ve 40 terimli bir model kullanılmasının daha doğru sonuçlar sağlayacağı belirtilmiştir.



Şekil 1.7 : Master curve yöntemi kullanılarak elde edilen veri örneği [14]

Rao ve Lin [15], farklı tipteki çok katmanlı bir çubuk viskoelastik malzeme için Biot sönüm modelini sonlu elemanlar programına entegre etmek için çalışma yapmışlardır.

Sonuç olarak, çok katmanlı sönümlü bir çubuk elemanın sonlu elemanlar modeline dönüştürülmesi için iki önemli parametrenin, elastik katman ve sönüm katmanı, koordinat dönüştürülmesine ihtiyaç olduğu görülmüştür. Ayrıca lineer olmayan eğri uydurma yönteminin Biot modeli sabitlerini yapılacak titreşim analizleri için oldukça uygun duruma getirdiği belirlenmiştir.

EPDM malzeme özellikleri ile ilgili patent çalışmaları da bulunmaktadır. Özellikle malzeme bileşen oranları üzerine bu çalışmalar yoğunlaşmıştır.

EP1444295 A1 numaralı patentte [16], motor bağlantılarında kullanılmak üzere tasarlanmış EPDM malzemenin bileşenlerinin etkilerinin dinamik şartlarda etkisinin görülmesi üzerinedir. Doğal kauçuğa benzer mekanik özellikleri olan çekme ve yırtılma dayanımı özelliklerini muhafaza ederken; ozon, hava ve termal direnci de dinamik yükleme şartlarında sağlayabilecek bileşenlere sahip bir EPDM amaçlanmaktadır. Yüksek molekül ağırlıklı EPDM malzemelerin dinamik koşullardaki düşük yorulma, aşınma ve çekme dayanımı bu malzemelerin dinamik koşullarda fazla kullanılmamasına neden olmaktadır. EPDM malzemenin üstün özellikleri korunurken, artı maliyet getirilmeden katkı malzemesi olarak belirli oranlarda konjuge dien kauçuklar ve polikloropren dahil edilmiştir. Optimum vulkanizasyon işlemlerinin belirlenmesi çalışılmıştır. Yüksek dinamik yorulma direncine karşılık gelen düşük bir kayıp faktörü, yüksek çekme ve yırtılma mukavemeti sergileyen EPDM malzemelerde çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır: farklı sınıflarda, farklı karbon siyahları, farklı hızlandırıcılar, farklı düzeyde dolgu maddesi ve sıvı yağ ve farklı kükürt / hızlandırıcı oranları.

Örnek malzemelerin fiziksel özellikleri Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 : Malzemelerin fiziksel özellikleri

Property	A	B	C	D	E
Tensile Strength (MPa)	7.8	13.6	16.5	22.7	20.2
Elongation (%)	393	555	581	636	584
Modulus @ 100% (MPa)	1.2	1.3	1.4	1.9	1.8
Hardness (Shore A)	49	60	53	61	59
Tear Strength ((kN/m)	20.9	27.1	30.3	39.6	39.5
Compression Set after 22 hr. @ 100°C (%)	11.7	11.2	15.5	17.8	14.6
Heat aged 70 hours at 100°C					
Tensile strength change (%)	-16.7	-17.6	-7.9	4	-6.4
Elongation change (%)	-36.9	-11.2	-10.5	-6.9	-15.1

Örnek malzeme A'nın yetersiz fiziksel özellikleri nedeniyle dinamik teste dahil edilmemiştir. Dinamik karakteristikler ASTM standartlarına bağlı olarak MER (Mechanical Energy Resolver) ile Çizelge 1.2'deki gibi belirlenmiştir:

Çizelge 1.2 : MER analizi sonuçları

Property	B	C	D	E
E* (MPa)	4.3544	5.0310	8.6850	6.5403
E' (MPa)	4.3291	4.9880	8.6423	6.4820
E'' (MPa)	0.4669	0.6578	0.8623	0.8700
Tan δ	0.1079	0.1319	0.0998	0.1342
Stiffness (KN/mm)	4.2580	4.7168	9.2665	6.2292
Loss Energy	9.4757	10.4658	4.0419	8.0410

MTS(Malzeme test sistemi,-2600 N $\pm$ 3G zorlanmış titreşim aralığı) kullanılarak elde edilen sonuçlar da Çizelge 1.3'te görülmektedir:

Çizelge 1.3 : MTS analiz sonuçları

Property	A (N990)	B (N774)	C (N650)	D (N330)
K _s (N/mm)	1088	1081	1170	1026
K _d (N/mm)	1509	1470	1597	1384
K _d /K _s	1.39	1.36	1.36	1.35
Damping Coefficient (Ns/mm)	1.5708	1.5316	1.7971	1.3727
Tan δ	0.0982	0.0983	0.1063	0.0936
Fatigue Life @ room temp.	32,817	10,027	14,843	11,747
Fatigue Life @ 250°C	4,268	10,630	5,897	4,313

Patentte test edilen parametrelerle belirlenen malzemelerden çıkarılan sonuç EPDM malzemenin gerekli bileşenlerle ve işlemlerle, mevcut mekanik özelliklerini dinamik yük koşulları altında da koruyabileceğidir.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsam

Literatür çalışmaları ile elde edilen veriler viskoelastik malzemelerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi kapsamında incelenmiştir. Farklı viskoelastik malzemelerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi, geometrik özelliklerin buna eklenmesi, farklı test yöntemlerinin kullanılması çalışmaları yol gösterici olmakla beraber, asıl amaç olan çamaşır makinesi için analiz parametrelerinin belirlenmesi ve çoklu cisim dinamiği programında dinamik davranışa etkilerin belirlenmesi konusunda literatürde net bir çalışma yapılmadığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında amaçlananlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- i) Körük modelinin bilgisayar destekli çalışmalarda kullanılabilmesi için malzeme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle  amaşır makinesinde motorun değişen tahrik frekanslarına karşılık, körüğün dinamik karakteristikleri elde edilmelidir.
- ii) Körük test düzeneğinin tasarlanması, hazırlanması, düzeneğin kurulması, körük özelliklerinin ölçüm verilerinden belirlenmesi
- iii) Körüğün dinamik karakteristiklerinin çoklu cisim dinamiği yazılımında çamaşır makinesi modeline eklenmesi
- iv) Körük parametreleri için dinamik davranışta rezonans ve kararlı rejim bölgesi için optimum parametre aralıkları belirlenmesi

Böylece hem makinanın dinamik modeli bilgisayar ortamında elde edilecek hem körük geometri ve malzeme değişiminde dinamik modele etkileri gözlemlenebilir hale gelecek ve gerekli tasarım veya malzeme değişikliği öngörülebilecektir.

Bu amaçlar doğrultusunda tezin kapsamı ise şu şekildedir:

Tezin ikinci bölümünde teorik yaklaşımlar açıklanmıştır. İlk olarak titreşim ve yalıtımı üzerinde durulmuştur. Sistem yapısal sönümlü bir sistem olarak incelenmiştir. Viskoelastik malzemelerin teorik modellenmesi, yaklaşımlar ve karakterizasyonu için çözüm yöntemleri verilmiştir. Malzeme  zellikleri test yöntemleri aktarılmıştır.

    nc  bölümde körük malzemesi dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine çeşitli testler yapılmıştır. Öncelikle statik bir test olan çekme testi yapıldıktan sonra, Oberst test yöntemi ve dinamik mekanik analiz(DMA) testleri yapılmıştır. Bu test yöntemleri değerlendirilmiş ve körüğün frekansa bağlı olarak dinamik elastiklik modülü ve sönüm oranı aralığı saptanmıştır.

Bir sonraki bölümde körük test düzeneği çalışmaları üzerinde durulmuştur. Bu bölümde körüğün direkt olarak bağlanarak test edildiği bir düzenek geliştirilmiştir. Bu düzenek ile ilgili teorik incelemeler yapılmıştır. Logaritmik azalma yöntemi ile körük dinamik karakteristikleri için aralıklar belirlenmiştir. Bunun yanında test düzeneği sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar ortamında simüle edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde körüğün çamaşır makinası dinamiğine etkileri yine testlerle ve çoklu cisim dinamiği programıyla incelenmiştir. Öncelikle tahrik grubu deplasmanları

körüklü ve körüksüz koşullarda test edilmiştir. Daha sonra çoklu cisim dinamiği programında(MSC ADAMS) körüklü ve önceki bölümden verileri alınan körüklü model kurulmuştur. Bu modelden çıkan sonuçlar değerlendirilerek körüğün rijitliği ve sönüm değerleri değiştirilerek rezonans ve kararlı rejimdeki deplasman değerleri korele olacak şekilde optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Son olarak tez kapsamında yapılanlar değerlendirilmiş, çıktılar verilmiş ve yapılacak yeni çalışmalar için öneriler sunulmuştur.



2. TEORİ

Bir çamaşır makinesinin ana bileşenleri, dinamik grubu ve gövde grubu olarak ikiye ayrılabilir. Bu sistemin serbest cisim diyagramında $m_{\text{dinamik grup}}$ olarak belirtilen kısım makinanın hareket eden tahrik grubunun kütlesini belirtirken, $m_{\text{gövde}}$ ise belirtilen gövde grubunun kütlesini ifade etmektedir. Bu gövde ayarlı ayaklardan yere sabitlenmiştir. Tezin amaçları arasında gövde titreşimlerini incelemek yer almamaktadır. Bunun yanında iki grubu birbirine bağlayan yay ve amortisörlerin yanında körük de yapısal sönüme sahip bir eleman(k^*) olarak gösterilmektedir. Şekil 2.1’de çamaşır makinasının indirgenmiş modeli üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 2.1 : Çamaşır makinası indirgenmiş model görünümü

Bu bölümde sırasıyla, tek serbestlik dereceli sistemler üzerinden titreşim ve yalıtımı, viskoelastik malzemeler ile birlikte bu türdeki malzemelerin modelleri, EPDM malzeme, malzeme karakteristikleri ve etki eden parametreler, son olarak malzeme dinamik özellikleri test yöntemleri açıklanmıştır.

2.1 Titreşim ve Yalıtım Teorisi

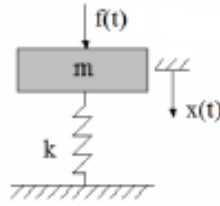
Titreşimi sönümlmek veya titreşim karakteristiklerini belirlemek için bu bölümde titreşimle ilgili temel yaklaşımlar sunulmuştur. Birçok sistem pratik olarak tek

serbestlik dereceli olarak modellenemese de bu yaklaşım çok serbestlik dereceli sistemleri anlamada oldukça yardımcı olacaktır. Çünkü çok serbestlik dereceli sistemler, birden çok tek serbestlik dereceli sistemin lineer süperpozisyonu olarak ifade edilebilir [17]. Bundan sonra gelen alt bölümlerde, aşağıda belirtilen sönüm karakteristiğine sahip tek serbestlik dereceli sistemlerin titreşim teorisi kısaca özetlemiştir.

- Sönümsüz
- Viskoz sönümlü
- Yapısal veya histerik sönümlü

2.1.1 Tek Serbestlik Dereceli Sönümsüz Sistemler

Şekil 2.2’de gösterilen bu sistemde elemanlar sadece kütle m ve yay katsayısı olan k ’dır. $f(t)$ ve $x(t)$ zamana bağlı olarak sırasıyla kuvvet ve yer değiştirmedir.



Şekil 2.2 : Tek serbestlik dereceli sönümsüz sistem modeli

$f(t)=0$ durumu için ilk denklem:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2.1)$$

Çözüm önerisi olarak, $x(t) = X \cdot e^{i\omega t}$ olmak üzere,

$$(k - \omega^2 m) = 0 \quad (2.2)$$

Tek çözümden oluşan denklemin çözümü ω_n olan doğal frekansı verir ve sonuç $\left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$ şeklindedir [17].

Eğer kuvvet sıfır değilse,

$$f(t) = F \cdot e^{i\omega t} \quad (2.3)$$

ve çözüm kabulü,

$$x(t) = Xe^{i\omega t} \quad (2.4)$$

X ve F karmaşık olup hem genlik hem de faz bilgisi içermektedir. Böylece hareket denklemi:

$$(k - \omega^2 m)Xe^{i\omega t} = F \cdot e^{i\omega t} x(t) = Xe^{i\omega t} \quad (2.5)$$

Buradan frekans cevap fonksiyonu ise şu şekilde elde edilir:

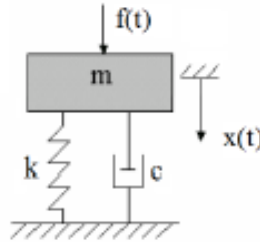
$$\alpha(\omega) = H(\omega) = \frac{X}{F} = \frac{1}{(k - \omega^2 m)} \quad (2.6)$$

Frekans cevabının yer değiştirmeye bağlı verildiği bu özel tipine reseptans denir [17].

2.1.2 Tek Serbestlik Dereceli Viskoz Sönümlü Sistemler

Tek serbestlik dereceli sönümsüz sisteme bir viskoz sönüm elemanı, c, eklenmesiyle Tek serbestlik dereceli viskoz sönümlü sistemler elde edilir. Modellemesi ise Şekil 2.3'te görüldüğü üzere yapılabilen bu sistemler için serbest titreşim durumunda hareket denklemi [17]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.7)$$



Şekil 2.3 : Tek serbestlik dereceli viskoz sönümlü sistemin modeli

Ve s karmaşık sayı olmak üzere çözüm kabulü,

$$x(t) = Xe^{st} \quad (2.8)$$

yapıldıktan sonra elde edilen denklem:

$$(ms^2 + cs + k) = 0 \quad (2.9)$$

Bu denklemin kökleri,

$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{\sqrt{c^2 - 4km}}{2m} = -\omega_n \zeta \pm i\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.10)$$

Bu denklemlerde $\omega_n^2 = (\frac{k}{m})$; $\zeta = \frac{c}{c_0} = (\frac{c}{2\sqrt{km}})$ ve çözüm ;

$$x(t) = X e^{-\omega_n \zeta t} e^{i(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t)} = X e^{-at} e^{i\omega'_0 t} \quad (2.11)$$

Bu tek bir modu olan titreşimin kompleks doğal frekansını iki parçada göstermektedir:

- Sanal kısım frekansı: $\omega'_n = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$
- Gerçek kısım: $\omega_n \zeta$

Yine $f(t) = F e^{i\omega t}$ gibi zorlanmış bir titreşim durumunda $x(t) = X e^{i\omega t}$ çözüm kabulü yapılırsa, hareket denklemi:

$$(-\omega^2 m + i\omega c + k) X e^{i\omega t} = F e^{i\omega t} \quad (2.12)$$

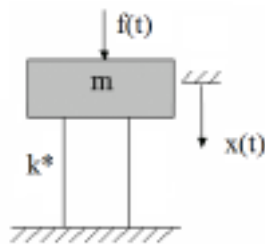
elde edilir ve buradan reseptans:

$$H(\omega) = \alpha(\omega) = \frac{1}{(k - \omega^2) + i(\omega c)} \quad (2.13)$$

olarak karmaşık sayı şeklindedir, faz ve genlik bilgisini içerir [17].

2.1.3 Yapısal Sönümlü Sistemler

Gerçek ve çok serbestlik derecesine sahip sistemlerde viskoz sönüm ile yapıyı tarif etmek sistemin davranışını tanımlama konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu tip gerçek yapılarda sönümde frekansa bağıllık gözlemlenmektedir ve farklı bir şekilde ifade edilmelidir. Şekil 2.4'de görülen yapısal sönümlü sistemlerde k^* , karmaşık bir yay katsayısını ifade eder:



Şekil 2.4 : Yapısal sönümlü sistemlerin modeli

$$k^* = k_{re} + k_{im} \quad (2.14)$$

k_{re} , yay katsayısının gerçek kısmını, k_{im} , yay katsayısının sanal kısmını göstermektedir. Sisteme uygulanan kuvvet ve yer değiştirme kabulleri:

$$f(t) = Fe^{i\omega t} \quad (2.15)$$

$$x = Xe^{i\omega t} \quad (2.16)$$

Olmak üzere hareket denklemi,

$$m\ddot{x} + kx = f(t) \quad (2.17)$$

$$(\omega^2 m + k_{re} + ik_{im})Xe^{i\omega t} = Fe^{i\omega t} \quad (2.18)$$

Ve reseptans şu şekilde elde edilir:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{(k_{re} - \omega^2 m) + ik_{im}} \quad (2.19)$$

Yapısal sönüm için kayıp faktörü, η değeri:

$$\eta = k_{im}/k_{re} \quad (2.20)$$

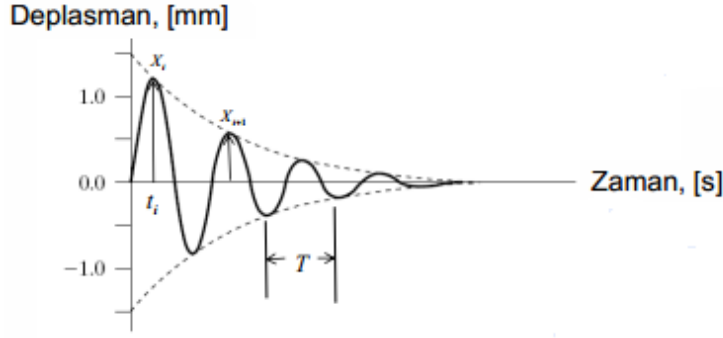
olarak belirlenir. Aynı zamanda kayıp faktörünün sönüm oranı cinsinden ifadesi;

$$\eta = 2\zeta \quad (2.21)$$

şeklindedir [17].

2.1.4 Logaritmik Azalma

Geçici rejime(transient) sahip az sönümlü bir sistemdeki ölçüm sonucundan, sistemin sönüm oranına dair özellikleri elde edilebilir. Sistem cevabından elde edilen zarf eğrisi az sönümlü sistemin davranışını ve logaritmik azalma(logarithmic decrement) yaklaşımını oluşturur [18].



Şekil 2.5 : Serbest titreşim eğrisi [18]

t_i : i. Dalganın oluştuğu süre

t_{i+1} : (i+1). Dalganın oluştuğu süre

$T = t_{i+1} - t_i$: Periyod

X_i : i. Dalga genliği

X_{i+1} : (i+1). Dalga genliği

Deplasman şu şekilde ifade edilir:

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (2.22)$$

$$X_i(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t_i} \quad (2.23)$$

$$X_{i+1}(t_i + T) = Ae^{-\zeta\omega_n(t_i+T)} \quad (2.24)$$

Deplasman oranları ve logaritmik azalma ifadeleri şu şekildedir:

$$\delta = \ln\left(\frac{X_i}{X_{i+1}}\right) = \zeta\omega_n T \quad (2.25)$$

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{X_i}{X_{i+n}}\right) \quad (2.26)$$

Eğer sönüm azsa,

$$\delta = \ln\left(\frac{X_i}{X_{i+1}}\right)\zeta\omega_n T \cong 2\pi\zeta \quad (2.27)$$

$$\frac{X_i}{X_{i+1}} = e^{\zeta\omega_n T} \quad (2.28)$$

$$\delta = \ln\left(\frac{X_i}{X_{i+1}}\right) = \zeta \omega_n T \quad (2.29)$$

Eğer sönüm az değilse,

$$T = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.30)$$

$$\delta = \ln\left(\frac{X_i}{X_{i+1}}\right) = \zeta \omega_n T = \zeta \omega_n \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.31)$$

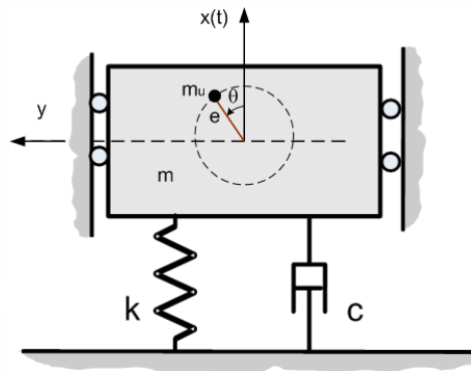
$$\delta = \ln\left(\frac{X_i}{X_{i+1}}\right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.32)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (2.33)$$

olarak ifade edilir [18].

2.1.5 Dönen Dengesizliğin Oluşturduğu Titreşimler

Çamaşır makinesi, dönen dengesizliğin en çok meydana geldiği sistemlerden biridir. Salınımı yapan bütün haldeki kazan grubu iken tambur içerisindeki çamaşır çoğu zaman dengesizlik yaratmaktadır. Bu dengesizlik farklı çamaşır koşullarında farklı değerlere ulaşmaktadır. Çamaşır makineleri bu dengesiz yükleri belirli kütle değerlerine kadar sıkılmaktadır. Büyük değerlerdeki dengesiz kütle, özellikle yüksek sıkma devirlerinde çamaşır makinesindeki elemanlara gelen kuvvetleri oldukça arttırmaktadır. Şekil 2.6.'da indirgenmiş gösterimi yapılan sistem için dönel dengesizlik hesapları basitçe gösterilecek olur ise:



Şekil 2.6 : Dönel dengesiz bir sistemin indirgenmiş modeli

Harmonik zorlanmış bir sistem kabulü ile,

e : Eksantriklik [m]

m_u : Dengesiz kütle [kg]

ω : Dönme hızı, [rad/s]

$$F_x = m_u e \omega^2 \cos \theta = m_u e \omega^2 \cos \omega t \quad (2.34)$$

$$F_y = m_u e \omega^2 \sin \theta = m_u e \omega^2 \sin \omega t \quad (2.35)$$

x yönündeki hareket denklemi,

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_u e \omega^2 \cos \omega t \quad (2.36)$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{m_u}{m} e \omega^2 \cos \omega t \quad (2.37)$$

Harmonik çözüm kabulü ile,

$$x_p = X \cos(\omega t - \theta) \quad (2.38)$$

veya,

$$x_p = A_1 \sin(\omega t) + A_2 \cos(\omega t) \quad (2.39)$$

x_p : Deplasman(harmonik çözüm kabulü),

X : Genlik(x yönünde)

A_1, A_2 : Katsayı

$r = \frac{\omega}{\omega_n}$: Frekans oranı olmak üzere,

$$X = \frac{m_u e}{m} \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.40)$$

$$\frac{mX}{m_u e} = \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.41)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1 - r^2} \quad (2.42)$$

şeklinde elde edilir [18].

2.1.6 Titreşim Yalıtımı

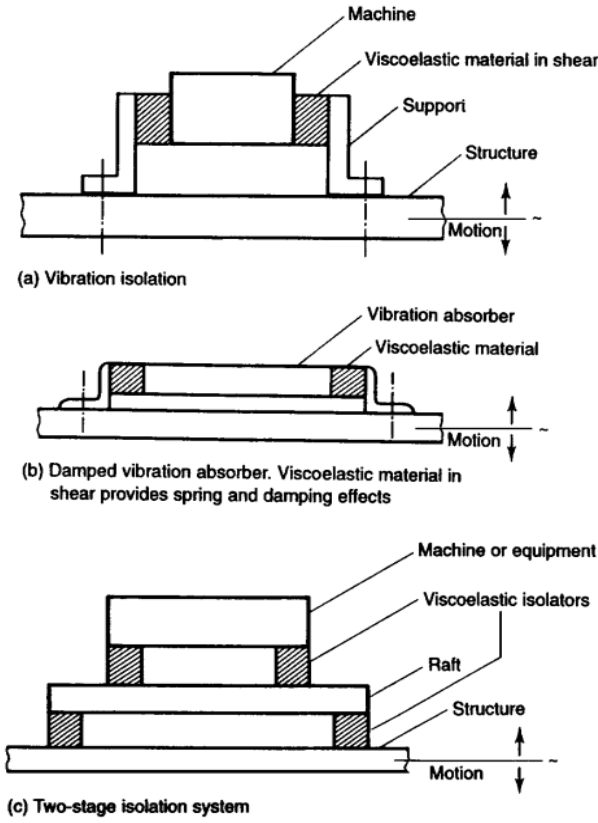
Tüm malzemeler tekrarlı deformasyon koşulları altında bir miktar enerji harcar. Harcanan enerjinin miktarı da malzemenin içyapısıyla ilgili özelliklere bağlı olarak değişiklik göstermektedir ki bu tip değişken ve lineer olmayan sönüm özelliklerine sahip malzemeleri analiz etmek zordur. Buna rağmen örnek malzemelerin numuneleriyle elde edilen deneysel yöntemlerle içyapıya harcanan enerji miktarı değişik uzama miktarlarında belirlenebilir. Malzemenin enerji yutumunu belirlemek için genellikle histerisis çevrimi çizilir. Lineer malzemeler için sinüzoidal yüklemde histerisis eğrisi eliptiktir ve şekil değiştirme arttıkça, karesiyle orantılı eğri alanı artar. Dinamik karakteristiklerden sönüm faktörü malzemenin içeriklerine, sıcaklığa, gerilmeye ve yükleme koşulları ile değişse de yaklaşık bir sönüm faktörü elde edilebilir [19].

Viskoelastik sönüme sahip birçok polimer de malzemenin iç sönüm özellikleri nedeniyle birçok makine ve yapıda Şekil 2.7.'de görüldüğü üzere titreşim kontrolü için kullanılmaktadır. Üretim kontrolü ile polimerler farklı sıcaklık ve frekanslarda yüksek sönüm, mukavemet, sürünme dayanımı özelliklerine sahip olabilir [19].

Ayrıca viskoelastik sönüm içeren sistemler tasarlarken dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da statik elastikliğin dinamik elastiklikten çok daha düşük olduğudur. Sönüm ve elastiklik özelliklerin deneysel olarak belirlenmesi birlikte olmalıdır [19].

Pratikte dinamik kuvvetlerin yarattığı titreşimleri tamamen yok etmek mümkün olmasa da bu titreşimler azaltılabilir. Bunu sağlamak için problemin kaynağı dikkate alınarak farklı çözümler üretilir: Dış tahriklerin olduğu bir sistemde, sistemin doğal frekanslarını kontrol etmek; rezonans bölgesinde artış gösteren sistem cevabını, sisteme sönüm veya enerji yutum mekanizması ekleyerek önlemek; titreşim yutucuları kullanarak tahrik kuvvetlerinin makinanın bir parçasından diğerine geçmesini önlemek; destek bir kütle eklemek veya titreşim yutucu ekleyerek sistemin cevabının seviyesini düşürmektir [20].

Yöntemlerden sisteme sönüm eklenmesi seçeneği eğer tahrik frekansı belirli bir frekansta ise rezonans durumu engellenebilir. Fakat bir sistem eğer değişken frekanslarda tahrik ediliyor ise rezonanstan kaçınma söz konusu olmayabilir. Böyle



Şekil 2.7 : Viskoelastik malzemelerin titreşim yalıtımında kullanım şekilleri [19]

bir durumda sisteme sönüm eklemek için kendiliğinden sönüm içeren malzemeye sahip komponentler kullanılabilir.

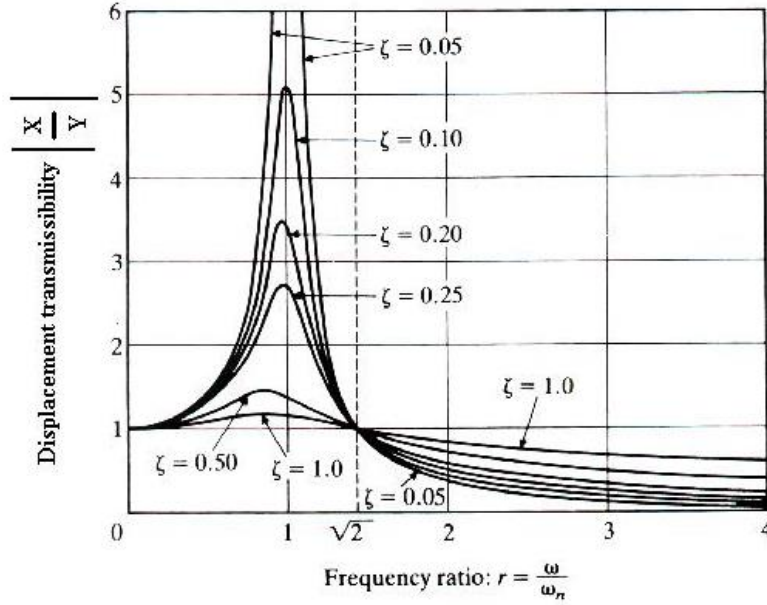
Bu tip elemanlardan biri de çamaşır makinesi körüğünde kullanılan EPDM malzemesi gibi viskoelastik malzemelerdir. Tek serbestlik derecesine sahip sönümlü bir sistemde harmonik tahrik kabulü ve η kayıp faktörü olmak üzere hareket denklemi,

$$m\ddot{x} + k(1 + i\eta)x = F_0 e^{i\omega t} \quad (2.43)$$

ile ifade edilir [20].

$$\eta = \frac{\left(\frac{\Delta W}{2\pi}\right)}{W} = \frac{(\text{Bir çevrimde, birim radyanda yutulan enerji})}{(\text{Çevrimde oluşan maksimum gerinim enerjisi})} \quad (2.44)$$

Gövdeye iletilen titreşimleri etkileyen körük, tahrik grubu ile gövde arasında frekansa bağlı farklı titreşim iletim özelliği gösterir. Bu iletim Şekil 2.8.’deki gibi bir karakteristiğe sahiptir.



Şekil 2.8 : Geçirgenlik eğrisi

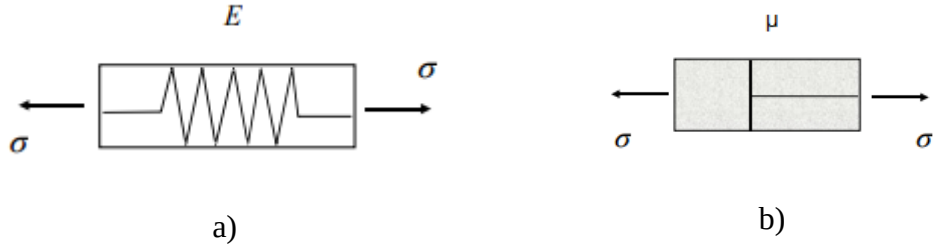
Bu formüllere göre teorik anlamda en iyi titreşim yalıtımı sadece yay elemanlarından oluşan r (Frekans oranı) $> \sqrt{2}$ durumunda ve sönüm elemanının olmadığı durumdur [20].

2.2 Viskoelastik Malzemeler

Viskoelastik sönüm, özellikle polimerik ve camsı malzemelerde görülen; iç sönüm mekanizması ile birçok uygulamada önemli yere sahiptir. Polimer malzemeler uzun karbon zincirlerinden oluşur ve bu zincirlerin bağlantıları bağlanma durumuna göre güçlü veya zayıf olabilir. Bu bağların deformasyondan sonra gerilme rahatlaması ve eski haline dönmesi mekanizması sönümün temel sebebidir. Malzeme sıcaklığı ve moleküler hareketlere bağlı olan sönüm mekanizması dolayısıyla sıcaklık ve frekansa büyük derecede bağlıdır [21].

2.2.1 Viskoelastik Malzeme Modelleri

Viskoelastik malzemeler ile ilgili farklı modeller mevcuttur. Tek yönlü lineer viskoelastik malzeme için mekanik model, Maxwell modeli, Kelvin(Voigt) modeli, üç element modeli, genelleştirilmiş modeller ve lineer olmayan modeller bulunmaktadır. Bu modellerin açıklanmasındaki lineer elastik yay ve lineer viskoz sönüm elemanı modelleri Şekil 2.9.'da görüldüğü gibidir [22].



Şekil 2.9 : a) Lineer elastik yay ve b) viskoz sönüm elemanı modelleri

Yay ve sönüm elemanı için eşitlikler sırasıyla şu şekildedir:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma \quad (2.45)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\mu} \sigma \quad (2.46)$$

E :Lineer elastik yayın elastikliği

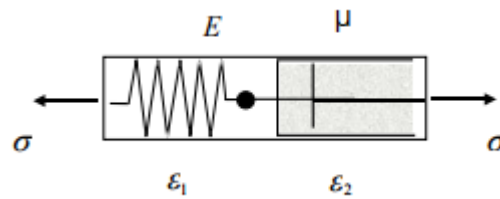
σ : Oluşan gerilme

μ : Sönüm elemanının viskozitesi

ε : Gerinim(Şekil değiştirme)

$\dot{\varepsilon}$: Gerinim hızı

Maxwell modelinde ise Şekil 2.10.'da verilen durum söz konusudur:



Şekil 2.10 : Maxwell Modeli

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \sigma \quad (2.47)$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{\mu} \sigma \quad (2.48)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2.49)$$

ε_1 : Yayın şekil değıştirmesi,

ε_2 : Viskoz sönüm elemanının şekil değıştirmesi,

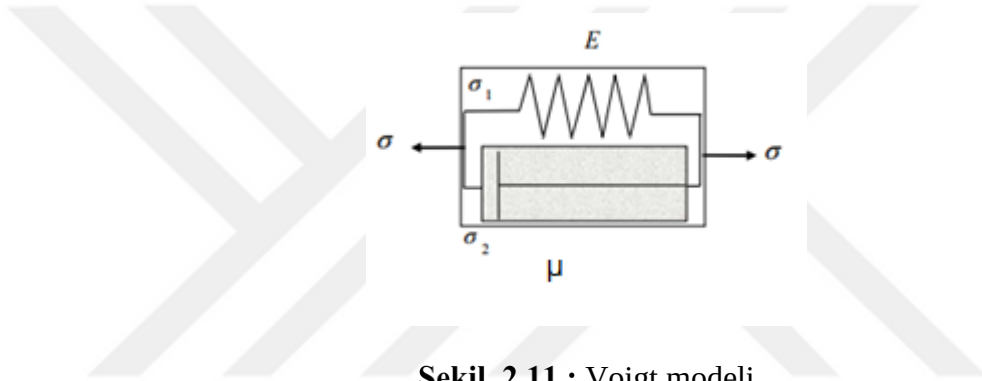
ε : Toplam şekil değıştirme,

olmak üzere, Maxwell modelinin denklemi:

$$\sigma + \frac{\mu}{E} \dot{\sigma} = \mu \dot{\varepsilon} \quad (2.50)$$

şeklindedir [22].

Şekil 2.11.'de görülen Kelvin(Voigt) modeli, paralel bağlanmış yay ve viskoz sönüm elemanından oluşmaktadır.



Şekil 2.11 : Voigt modeli

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma_1 \quad (2.51)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\eta} \sigma_2 \quad (2.52)$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.53)$$

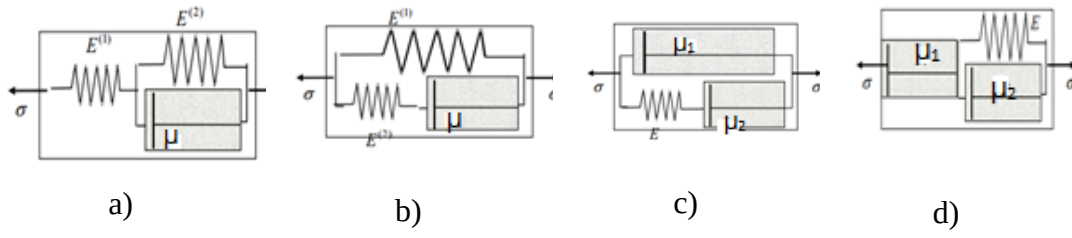
$$\sigma = E\varepsilon + \mu\dot{\varepsilon} \quad (2.54)$$

σ_1 :Yay gerilmesi,

σ_2 : Viskoz sönüm elemanı gerilmesi,

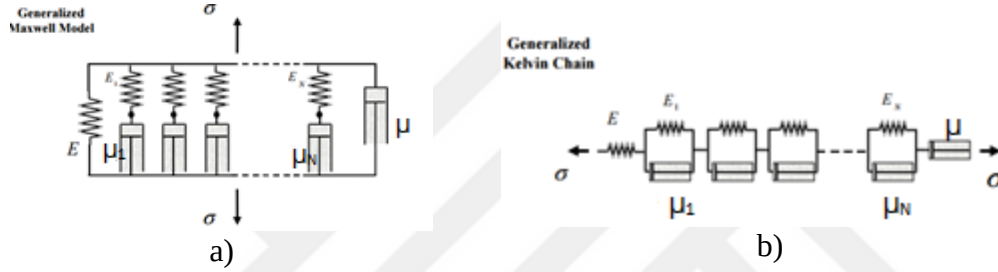
olarak tanımlanmıştır [22].

Üç element modelinde yaylar ve sönüm elemanlarından 3'lü kombinasyonlarla modelleme yapılmıştır. Şekil 2.12.'de sırasıyla; standart katı I, standart katı II, standart sıvı I, standart sıvı II modelleri verilmiştir.



Şekil 2.12 : 3 elemanlı modellerin kombinasyonları –a) Standart katı I, b) Standart katı II, c) Standart sıvı I, d) Standart sıvı II

Genelleştirilmiş modellerde ise Maxwell ve Kelvin(Voigt) modeli için N sayıda Maxwell ve Kelvin(Voigt) elementi birleştirilmiştir. Şekil 2.13.'te Maxwell-Kelvin modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : Genelleştirilmiş modellerde a) Maxwell modeli b) Kelvin(Voigt) modeli

Non-linear modelde ise yay şu denklem ile modellenir:

$$\sigma = E \varepsilon^n \quad (2.55)$$

Viskoz sönüm elemanı için de non-linear ifadeler:

$$\sigma = A \varepsilon^n \dot{\varepsilon} \quad (2.56)$$

veya,

$$\sigma = A e^{-\varepsilon/\varepsilon_0} \dot{\varepsilon} \quad (2.57)$$

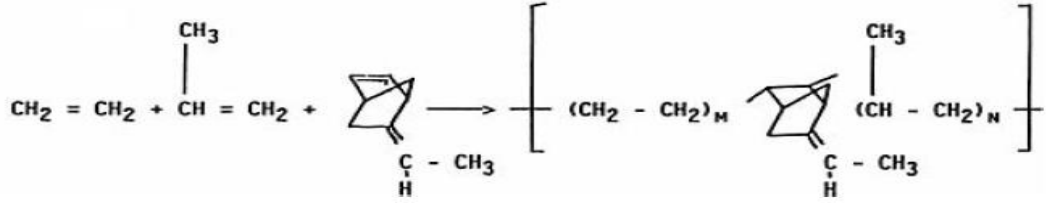
şeklinde olabilir. Malzeme verilerinin lineer olmayan ifadesi ile örtüşmesi gerekmektedir. Bu tip lineer olmayan ifadelerin yarattığı diferansiyel denklemlerin çözümleri de zorlaşır [22].

2.2.2 EPDM Malzeme

Malzeme ile ilgili yapılan çalışmada çamaşır makinası körüğünde kullanılan malzemenin tüm beyaz eşya sektöründe EPDM(Etilen Propilen Dien Monomer)

olduğu görülmüştür. EPDM malzeme sadece körük malzemesi olarak değil birçok alanda çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır: sızdırmazlık, hortum ve bağlantı elemanı olarak birçok alanda, beyaz eşya sektöründe diğer uygulamalarda, kayışlarda, elektrik yalıtım elemanlarında kullanılmaktadır [23].

1960'larda geliştirilen bu malzeme EPDM ASTM tarafından da standartlaştırılmış polimetilenin etilen, propilen ve dienden oluşan Şekil 2.14.'de görüldüğü üzere doymuş bir polimer zinciridir. Bu malzeme sentetik kauçuğun bir türüdür [24].



Şekil 2.14 : EPDM moleküler yapısı [24]

EPDM, sabit ve doymuş polimer yapısından dolayı ısı, oksidasyon, ozon ve hava yıpranma dayanımı yüksektir. Körük hamurunda da kullanılan siyah renkli pigmentlerin ve diğer pigmentlerin renkleri stabildir. Dolgu malzemelerine(özellikle etilen oranı arttıkça) ve plastik yüklere uygundur. Çekme dayanımı, yırtılma dayanımı ve aşınma dayanımı yüksektir. EPDM malzemenin özelliklerini; moleküler ağırlık, moleküler ağırlık dağılımı ve uzun zincir dallanması, kristallilik, etilen içeriği, bileşenlerin dağılımı, bileşenlerin sıralaması, çözünürlük gibi kimyasal özellikler belirler [24].

EPDM malzemeye diğer amaçlarla eklenen herhangi bir bileşen EPDM malzemenin mekanik özelliklerini de etkilemektedir. Bir kauçuk tipi olan EPDM' in iyi mekanik özelliklerinin yanı sıra, bunların belirlenmesi için de kauçuğun ve EPDM bileşenlerinin oluşturduğu viskoelastik ve lineer olmayan malzemenin karakteristiklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Malzemenin çeşitli bileşenlerle farklı oranlarda karışmasıyla elde edilen malzemedeki bileşenlerin oranı malzemenin ve yapının dinamik özelliklerini de etkilemektedir [13].

2.2.3 Malzeme Karakteristikleri

EPDM malzeme, viskoelastik bir malzeme olarak ele alınır. Fiziksel özellikler; kütle, yoğunluk ve boyutsal özelliklerdir. Bu özellikler standartlaştırılmış yöntemlerle belirlenmektedir.

Bu tez kapsamında incelenen ve firma kapsamında kullanılan iki tip körük hamuru bulunmaktadır. Giriş kalite kontrolü amaçlı yapılan standart testlerden DIN 53479/ISO 1183:1997, kauçuk malzemelerin yoğunluk ölçümü testi, şartlandırılmış ortamda 3 saat süre ile bekletilmiş körük hamuru önce hassas olarak tartılır, daha sonra suya atılarak hacmi belirlenir. Sonuç olarak tüm körükler için yoğunluk değeri 1.10-1.14 g/cm³ aralığındadır. Malzeme ile ilgili kontrollerde boyut ve sertlik kontrolleri yapılmaktadır.

Kullanılan körüğün mekanik özellikleri belirlenirken viskoelastik malzeme olarak değerlendirilmiştir. İlk olarak, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile malzemenin kayma, çekme-basma durumlarında oluşan şekil değiştirme ile kayma ve elastik modülünün (Young modülü) elde edilmesi amaçlanır. Genellikle malzemenin sıkıştırılmaz olması kabulü(ile tek bir modül olarak elastiklik modülü verilmektedir. Başlangıç yaklaşımı için kullanılabilir olan bu durum dışında gerçekçi bir yaklaşım için kayma, çekme-basma, eşdeğer çift eksenli uzama(equ-biaxial extension) ayrı ayrı elde edilmelidir. ISO 37 ve ASTM D412 ile standart numuneler üzerinde çekme testi yapılarak çekme gerilmesi- uzama eğrisi elde edilir [25].

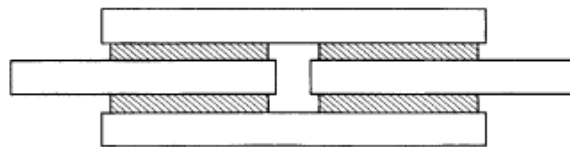
Basma gerilmesi ve uzaması ile ilgili standart ise ISO 7743 ile belirlenmiştir.

Ayrıca gerilme durumundan belirli bir süre sonraki gerilme ve uzamaya bağlı olarak rahatlama modülü parametresi de ASTM 1416 standardında bulunmaktadır.

Bulk modülü çok yüksek olduğundan ve kauçuk sıkıştırılmaz olduğundan bunu ölçmeye yönelik bir standart bulunmamaktadır.

Şekil 2.15.'te görüldüğü üzere kayma gerilmeleri de ISO 1827 dört bloklu kayma testi standardı ile belirlenmiştir.

İki eksenli genişleme(biaxial extension) ile ilgili bir standart bulunmamakla beraber, bu durum genellikle sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmektedir. İngiliz standartları sonlu elemanlar yöntemi kullanılan bir standart belirlemiştir.



Şekil 2.15 : ISO 1827 dört bloklu kayma testi örnek parça [25]

Poisson oranı da elde edilebilecek bir diğer parametredir. Poisson oranı malzemenin bir yönde uzarken diğer yönde görülen kısalmanın ölçüsüdür. Kauçuk malzemeler sıkıştırılmaz malzemeler olarak ele alınır ve genel olarak Poisson oranı 0,5 olarak kabul edilir. Ölçme yöntemlerinde ekstensometre kullanılsa da ölçümlerde yapılan hatalar nedeniyle kayma ve elastiklik modülünden bu değeri elde etmek daha doğru bir yaklaşım olmaktadır.

Sertlik tespiti, kauçuğun elastiklik modülünü belli bir kuvvet altında bulunan çentik uygulayıcının direnci ile ölçme yöntemidir. Bu ölçümde kuvvet uygulaması 3 farklı şekilde yapılabilir: sabit bir kuvvet uygulayıp çentiği ölçmeyle, sabit bir çentik oluşturmak için uygulanması gereken kuvvetin ölçülmesiyle veya yay kuvveti uygulayıp değişken kuvvet ve değişken çentik derinlikleri elde etme ile. Burada sabit derinlik, değişken kuvvet yöntemi daha uygundur. Çünkü, ölçülen kuvvet, modül ile orantılı olmalıdır. Sertlik ölçümü ile ilgili ISO standardı bulunmaktadır(ISO 48, 1994, AMD 1, 1999. Determination of Hardness (Hardness between 10 and 100 IRHD (Uluslararası Kauçuk Sertlik Birimi))).

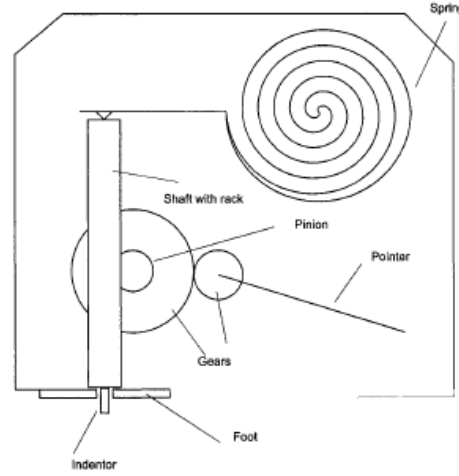
Bunun dışında ölü yük testi yöntemi ve durometre testi yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler arasındaki fark sadece ölü yük yönteminin kuvvet uygulama yönünden daha hassas olmasıdır. Şekil 2.16.'da görülen durometre yaygın bir yöntem olmakla beraber, Shore A ve Shore D skalasındaki ölçümleri ISO 7619 ile standartlaştırılmıştır [25].

Bu standart(ISO 7619) Shore skalası ile modül arasında bir ilişki vermemektedir. Bu ilişki Briscoe, Sebastian ve Qi tarafından belirlenmiştir [26]. ASTM D2240 standartındaki elastik modülü Gent tarafından türetilmiştir. aşağıda Gent'in formülü verilmiştir. S, Shore A cinsinden sertlik; E MPa biriminden Young modülüdür.

$$E = \frac{0.0981(56 + 7.62336S)}{0.137505(254 - 2.54S)} \quad (2.58)$$

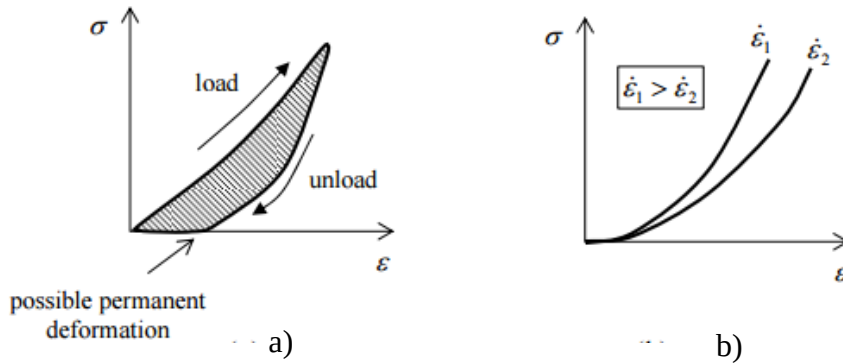
Bu tez çalışması kapsamında incelenen körüklerin sertlikleri 43 ± 4 Shore A aralığındadır.

Yırtılma direnci de elastik malzemelerde belirlenen bir diğer parametredir. Bunu belirlemeye yönelik standartlar da ISO ve ASTM standartları arasında değişik versiyonları bulunmaktadır.



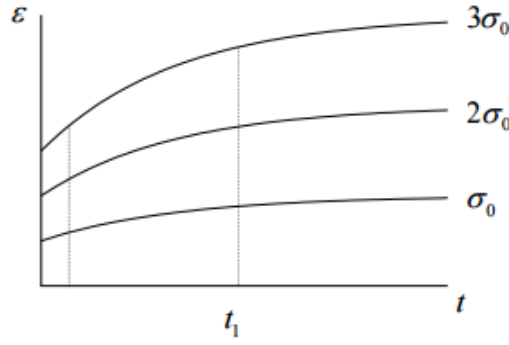
Şekil 2.16 : Durometre testi mekanizması gösterimi [25]

Viskoelastik malzemelerin özellikleri, zamana bağlı olarak tanımlanmaktadır. Viskoelastik malzemelerde, Şekil 2.17.(a)'da görüldüğü üzere yüklü ve yüksüz durumda gösterdiği davranış eğrileri aynı değildir, bu eğrilerin birleşimi histerisis eğrisini verir; Şekil 2.7.(b)'de uzama oranlarında zamana bağlı değişim gösterilmiştir ve deformasyon yük durumuna göre kalıcı veya geçici olabilir [22].



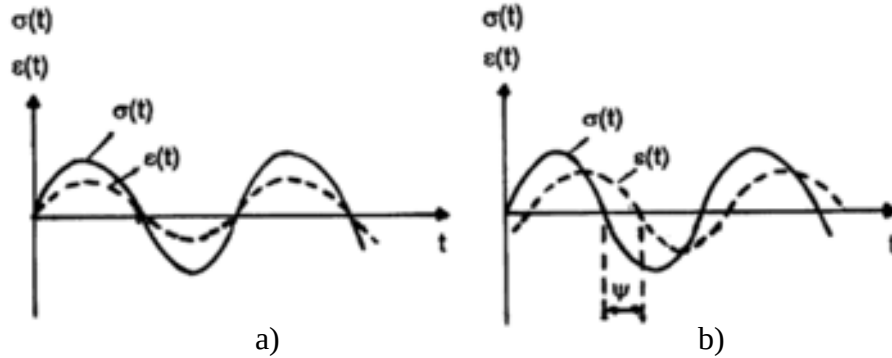
Şekil 2.17 : Çekme testinde viskoelastik malzemenin cevabı a)Kalıcı deformasyon verilerek yüklenip boşa çıkarılan malzeme b) farklı esneme oranları [22]

Lineer viskoelastisite ise gerilme ile gerinim ilişkisinin lineer olduğu durumdur. Bu durum uzamanın küçük, mühendislik uzamasının ölçülebildiği durum olur, çünkü gerçek uzama eğrisi lineer olmayan özellik gösterebilir. Sabit gerilme durumunda lineer viskoelastik malzeme davranışı için durum şekilde gösterilmiştir. Şekil 2.18'de görüldüğü üzere gerilme sabit olmasına karşın malzemede oluşan gerinim zamanla artmaktadır [22].



Şekil 2.18 : Gerilme ve gerinim arasındaki ilişki [22]

Daha önceden belirtildiği üzere, viskoelastik malzemeler özellik olarak hem elastik olan malzemelerin hem de viskoz olan malzemelerin özelliklerini aynı anda içinde barındırır. İdeal elastik malzemelerde gerilme ve gerinim orantılıdır ve aynı fazdadır(Hooke Yasası).Şekil 2.19.(a)'da gösterildiği sinüzoidal yük koşullarında elastik katıda faz açısı yokken, Şekil 2.19.(b)'de görüldüğü üzere viskoelastik malzemelerde ise gerilme gerinmeden faz açısı(ψ) olarak 90 derece öndedir [3].

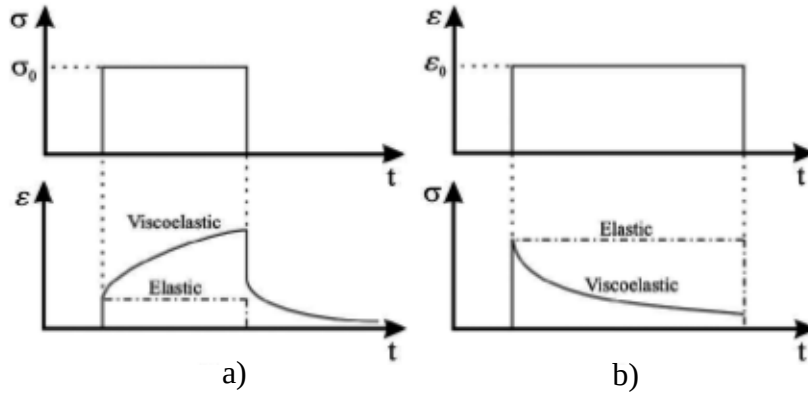


Şekil 2.19 : (a) Elastik bir katı ile (b) viskoelastik bir katının harmonik tahrik cevabı [3]

Viskoelastik malzemeler sürünme(creep)özelliği gösterirler. Şekil 2.20.(a)'da gösterilen sürünme, viskoelastik bir malzemenin deformasyonun sabit yük altında zamanla artarak asimptotuna ulaşması ile görülen bir süreçtir. Şekil 2.20.(b)'de gösterilen gerilme rahatlaması(stress relaxation) da yükün zamanla sabit bir uzama değerine ulaşana kadar azalmasıdır [3].

Viskoelastik malzemelerde gerilme hem şekil değiştirmeye hem de şekil değiştirme oranına bağlıdır ve tekrarlı yükleme ve deformasyon durumunda gerilme ve deformasyon aynı fazda değildir.

Viskoelastik malzemeler elastik malzemeler gibi lineer veya non-lineer olabilir.

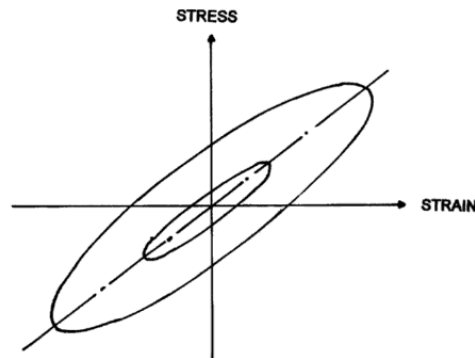


Şekil 2.20 : Viskoelastik malzemelerin karakteristiklerine örnekler: (a) kayma gerilmesi altında sürünme davranışı (b) Gerilme rahatlaması sabit kayma gerinimi altında [3]

Viskoelastisite üzerine mühendislik teorisi şu şekilde oluşmuştur. Eğer bir polimere harmonik bir yük uygulanırsa, oluşacak şekil değiştirme de uygulanan strese bağlı bir faz farkı veya zaman gecikmesi ile beraber yine harmonik ve aynı frekanstadır. Ölçülen gerilme ve şekil değiştirmeye bağlı bir grafik çizilirse eliptik bir eğri elde edilir. Bu eliptik eğriye histerisis eğrisi denir ve bir çevrimde ve birim hacimde ısıya dönüşen enerjiyi göstermektedir.

Bu eliptik eğrinin eğimi malzemenin esneklik katsayısını, boy-en oranı(aspect ratio) malzemenin sönüm özelliklerine dair bilgi verir. Viskoz sönüm gibi histerisis eğrisi eliptik olsa da frekansa bağlı aspect oranı değişimi hızlı değildir. Sıcaklığın etkisi daha fazladır.

Şekil 2.21.'de görülen histerisis eğrisi viskoelastik malzemenin modellenmesi için sıcaklık, frekans ve zamana bağlı temeli oluşturur [2].



Şekil 2.21 : Histerisis eğrisi [2]

Oluşan kayma gerilmeleri ile elde edilecek parametre kayma modülü, çekme-basma zorlamalarında elastiklik modülü ve kayıp faktörü çıkarımları için formüller şu şekildedir:

Çekme-basma durumu için:

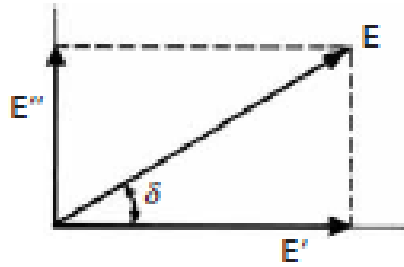
$$\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t) \quad (2.59)$$

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (2.60)$$

$$E' = \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0}\right) \cos \delta \quad (2.61)$$

$$E'' = \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0}\right) \sin \delta \quad (2.62)$$

Şekil 2.22.'de verilen E' çekme saklama modülü(storage modulus), E'' çekme kayıp modülü(loss modulus) olmak üzere:



Şekil 2.22 : Elastiklik modülünün karmaşık ifadesinin grafiksel görünümü [27]

Veya karmaşık gösterimde:

$$\epsilon = \epsilon_0 e^{i\omega t} \quad (2.63)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 e^{i\omega t} \quad (2.64)$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (2.65)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} e^{i\delta} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} (\cos \delta + i \sin \delta) = E' + iE'' \quad (2.66)$$

Kayma durumunda ise kayma modülü genellikle burulma sarkacı (ISO 4663) ile belirlenir.

$$G = G' + iG'' \quad (2.67)$$

G' Kayma saklama modülü, G'' kayma kayıp modülü

$$G'' = G \sin \delta \quad (2.68)$$

$$G' = G \cos \delta \quad (2.69)$$

$$E' = E \cos \delta \quad (2.70)$$

$$E'' = E \sin \delta \quad (2.71)$$

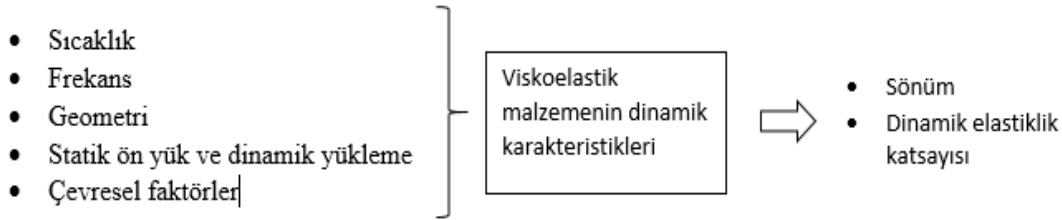
Kayıp faktörü tanımlaması yapılırsa;

$$\tan \delta = \eta = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\text{Kayıp enerji}}{\text{Depo edilen enerji}} \right) = \frac{G''}{G'} = \frac{E''}{E'} \quad (2.72)$$

olarak elde edilir [27].

2.2.4 Malzeme Karakteristiklerine Etki Eden Parametreler

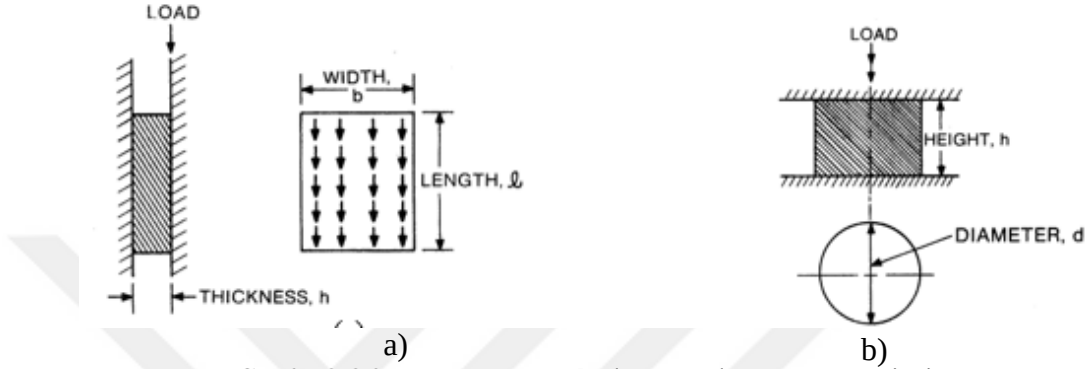
Bu bölümde malzemenin, önceki bölümlerde verilen karakteristiklerine etki eden parametreler Şekil 2.23'te özetlendiği üzere verilmiş, bu etkilerin ne şekilde olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.23 : Viskoelastik malzemenin karakteristiklerine etki eden parametreler

Geometri, kayma ve basma durumuna göre ayrı ayrı belirlenen etkiler aynı zamanda gerilme durumunun oluşması durumuna göre de değerlendirilmelidir. Kayma gerilmesi oluşumuna bağlı deney yapılırken dikkat edilmesi gereken uzunluk-kalınlık oranı en az 4 olması durumunda eğilme etkisinin ihmal edilebilirliği gösterilmiştir. Aynı şekilde eğilmenin etkisinin gösterilmesi konusunda bitiş sınır koşulları önem taşımaktadır ve çap-uzunluk oranının 0,5'ten büyük olduğu durumlarda kayma önem taşımaya başlar [3].

Geometrik etki özellikleri; kayma numunesi olarak dikdörtgen kesitli, basma numunesi olarak silindirik kesitli elemanlar kullanılarak elde edilen formüller açıklanmıştır. Gerilmeye maruz kalan kesit alanı A ve şekil değiştirmenin olduğu boyu h ile gösterilmek üzere; Şekil 2.24.(a)'da görülen kayma elemanı üzerinde alan $b \cdot l$, Şekil 2.24.(b)'de görülen basma elemanı üzerinde ise alan $\pi d^2/4$ olmak üzere kayma elementi üzerinde:



Şekil 2.24 : a) Kayma ve b) basma elemanı gösterimi

Dinamik direngenlik katsayısı,

$$k_{re} = G' \frac{A}{h} \quad (2.73)$$

$$k_{im} = G'' \frac{A}{h} \quad (2.74)$$

Ve

$$G^* = G' + iG'' \quad (2.75)$$

Olmak üzere basma elementi üzerinde de klasik elastiklik ilişkisinden;

$E = 2(1 + \nu)G$ ve Poisson oranı 0,5 kabul edilmek üzere,

Dinamik direngenlik katsayısı,

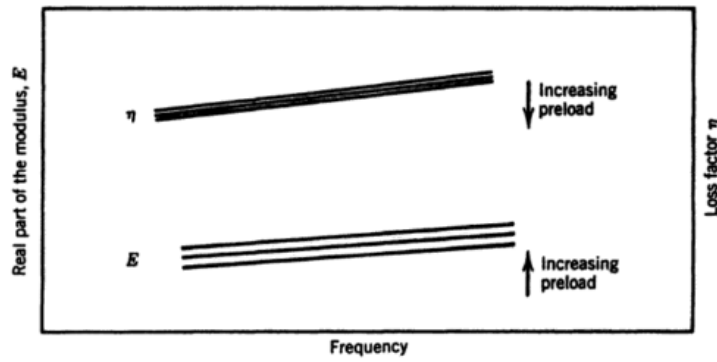
$$k_{re} = 3G' \frac{A}{h} \quad (2.76)$$

$$k_{im} = 3G'' \frac{A}{h} \quad (2.77)$$

şeklinde basma durumu için elde edilir [3].

Geometrik etkileri belirlemek için kiriş-sütun yöntemi, Göbel yöntemi, yüzey gerilme analizine göre tahmin yöntemi olarak belirlenebilir. Bu statik-analitik yöntemler elementin elastiklik modülünün kayıp modülüne oranını verir ve bu da dinamik elastikliği ve sönümün tahminine yöneliktir [3].

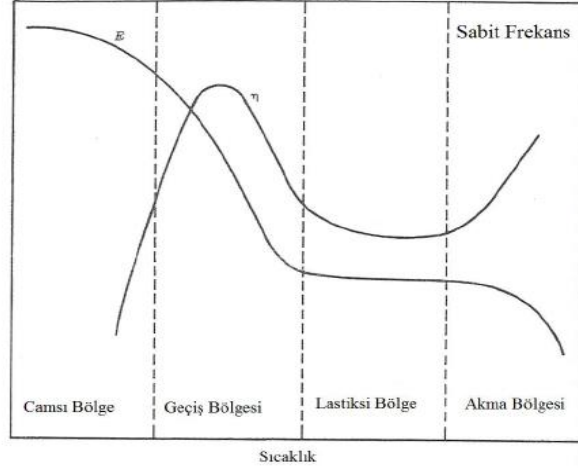
Statik ön yük ve dinamik şekil değiştirme: Şekil 2.25.'te görüldüğü üzere ön yük veya statik şekil değiştirmenin büyük olduğu değerlerde elastomer malzemelerin dinamik özellikleri değişmektedir. Fakat genellikle bu malzemelerde ön yük deformasyonu fazla değildir. Dinamik deformasyonun ise etkisi ise genellikle açıkça görülür ve bu etki kimyasal ve termal etkilerle beraber gelişir. Kimyasal etkiler malzemenin bağ yapısının deformasyona uğraması ile bağlantılıyken, ısı etkileri ise ısı yutumu ile oluşan malzemenin kendini ısıtması mekanizması yüksek deformasyonlarda görülen, düşük deformasyonlarda ise etkisiz bir mekanizmadır [3].



Şekil 2.25 : Ön yüklemenin viskoelastik malzemenin karakteristiklerine etkisi [3]

Çevresel faktörler: Kauçuksu malzemelerin sönüm özelliği genellikle yaşlanma, yağa veya yüksek sıcaklığa maruz kalma, vakum ve basınç gibi çevresel faktörlerden etkilenmektedir. Bu nedenle sönüm malzemesinin testlerini mümkün olduğunca farklı koşullarda yapıp, bu şekilde değerlendirilmeye çalışılmalıdır [21].

Sıcaklık: Viskoelastik malzemelerin G kayma modülü, E elastiklik modülü ve kayıp faktörü malzemenin sıcaklığına büyük ölçüde bağlıdır. Lineer olmayan davranış belli sıcaklıkların üzerinde görülmektedir. Geçiş sıcaklığının belirlendiği, sıcaklığa bağlı modüllerin değişimi Şekil 2.26.'da gösterildiği üzere malzeme davranış bölgelerine ayrılırsa; camsı bölge, geçiş bölgesi, lastiksi bölge ve akma bölgesinden oluşur. Camsı bölge malzemenin elastiklik modülünün maksimum değeri alırken, kayıp faktörünün çok düşük değerleri aldığı bölgedir. Bu bölgede elastik özellikler sıcaklıkla çok az değişirken, artan sıcaklıkla kayıp faktörü artmaktadır [21].



Şekil 2.26 : Viskoelastik malzemelerde sabit frekansta elastiklik modülü ve kayıp faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi [21]

İkinci bölge olan geçiş bölgesinde elastiklik modülü artan sıcaklıkla düşmektedir. Kayıp faktörü ise en yüksek değerine bu bölgede ulaşmaktadır. Üçüncü bölge olan lastiksi bölgede artan sıcaklıkla beraber hem elastiklik modülü hem de kayıp faktörü özellikleri pek değişmezken, bu değerler düşüktür. Dördüncü bölge ise camsı emayeler ve termoplastikler gibi çok az sönüm malzemesinde görülmektedir. Bu bölgede malzeme sıcaklıkla beraber yumuşamaya devam ederek erimeye başlar ve kayıp faktörü çok yüksek değerlere ulaşır.

Dördüncü bölge sıcaklıkla değişen durumu karakterize etmek için önemli olsa da istenmeyen fiziksel özellikleri ve sabit olmayan özellikleri nedeniyle sönümlü sistemlerde bir tasarım parametresi değildir. Ayrıca bu bölge çapraz bağlı polimerler gibi birçok kauçuksu malzemedede bulunmaz [2].

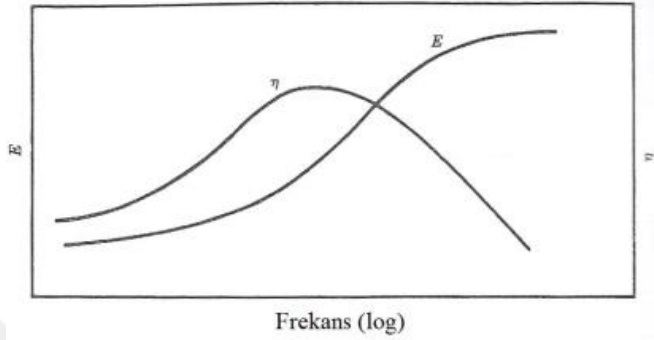
EPDM malzeme için geçiş bölgesi sıcaklığı(T_g) -54°C civarındadır [28]. Çamaşır makinesi çalışma sıcaklığı aralığı bu sıcaklıktan çok uzaktır. Bu nedenle lastiksi bölgede çalışıldığı kesin olarak belirlenmiştir.

Frekans: Tipik elastik katılar için frekansın etkisi düşük iken polimerler için frekansın etkisi büyüktür [2].

Malzemenin kendi içindeki zamana bağlı stres rahatlatma sürecinden dolayı beklenen bir durumdur. Histerisis çevriminin eğimi ve alanı frekansın bir fonksiyonudur. Niteliksel olarak frekans ile sıcaklığın malzeme üzerindeki etkisi terstir. Artan frekansın etkisi ile azalan sıcaklığın etkisi farklı aralıklarda benzer özellikler

göstermektedir. Bu da özellikle yüksek sıcaklıkları ölçmenin mümkün olmadığı durumlarda frekans eğrisini sıcaklık eğrisine dönüştürme yönünde fırsat sağlar [3].

Artan frekansa bağlı olarak en önemli oluşan durum elastiklik modülünün de sürekli artmasıdır. Bu durum Şekil 2.27.'de gösterilmiştir. Sabit sıcaklık için verilen şekilde, kayıp faktörü geçiş bölgesinde en yüksek değerde iken, elastiklik modülünün en yüksek olduğu bölge lastiksi bölgedir [2].



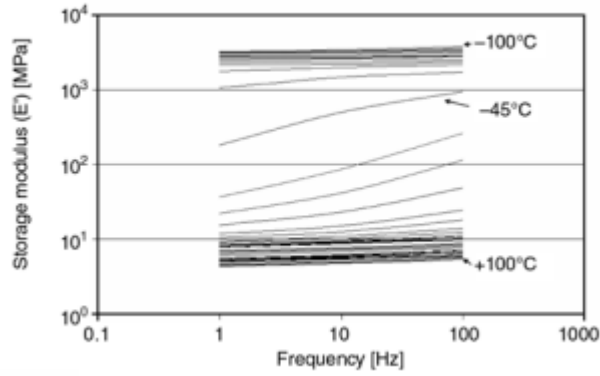
Şekil 2.27 : Frekansa bağlı elastiklik modülü ve kayıp faktörü değişimi [21]

Çamaşır makinesi için çalışma frekansı 0 ila 27 Hz arasında değişmektedir. Özellikle bu frekans aralığında körüğün davranışı kauçuksudur ve bu davranışın nasıl değiştiği ve değişim miktarı önem taşır.

Sönüm özelliklerinin lineer özellik gösterdiği bölge sadece düşük genlikli tekrarlı yük durumunda geçerlidir. Polimerin tipine ve yapısına göre lineer olmayan davranış da görülebilir [2].

Polimerlerin lineer olmayan yapısının modellenmesi ve özellikle viskoelastik teoriyle birleştirilmesi mühendislik açısından zorlayıcıdır. Lineer olmayan davranışın gözlenmesi için yapılması gereken test sayısı, lineere göre çok daha fazladır. Genellikle bu davranış ortalama alınarak gözlemlenir. Bu yüzden lineer modellemeyi takip eden sonra lineer olmayan modelleme çabası gösterilmelidir. [2]

EPDM malzeme için yapılan çalışmada değişken sıcaklık ve frekansa bağlı özellikler Şekil 2.28.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.28 : Farklı sıcaklıklarda dinamik elastiklik modülü(depolama modülü) eğrileri [13]

2.3 Malzeme Dinamik Özellikleri Test Yöntemleri

Viskoelastik malzemelerin davranışlarını belirlemek veya var olan verileri doğrulamak adına testler yapılmaktadır. Proses olarak en basit uygulama, kayma veya çekme- basma modunda uygulanan bir kuvvet sonucu oluşan deplasmanın zaman bileşeninde incelenmesidir [2].

Sinüzoidal bir tahrik kuvveti ile yapılan testte oluşacak deplasmanlar da yine harmonik, aynı frekansta olacak ve belirli bir faz açısı oluşacaktır. Burada zamana bağlı ve test sıcaklığında bir sonuç elde edilecektir. Fakat bu testin çeşitli parametrelerden etkilenmesi nedeniyle birçok sorunlu yanı vardır.

Kayma gerilmesi oluşturulacak durumda rijit taban testi yapılarak aynı ölçüm yapılmaya çalışılsa da testte etkili diğer parametreler(özellikle sıcaklık ve rezonans durumu), testin güvenilirliğini azaltmaktadır.

Tek serbestlik dereceli test konfigürasyonu: Sistem tek serbestlik derecesine indirgenerek yapılan testlerle datanın kompleks modülü elde edilmeye çalışılır.

- TSD sistemlerin genlik ve faz ölçümü

Sisteme çekiçle uygulan ve bilinen bir kuvvet ile ivmeölçer ile alınan sonuçlarla beraber FFT uygulanan sonuçlarla frekans davranışları gözlenmektedir. FFT' nin lineer sistemlere uygulandığını bu nedenle sarsıcı ve elektromanyetik tahrikle yapılacak testlerde dikkate alınmalıdır.

- TSD sistemlerde sadece genlik ölçümü

Her seferinde tek bir doğal frekans için yapılan testte, doğal frekansa gelindiğinde en yüksek genliklerin oluşması beklenir ve sistemin karakteristikleri bu veriye göre değerlendirilir.

Titreşen çubuklar yöntemi: Bu yöntem donanım basitliği ile oldukça net veriler elde edilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. ASTM 756-05 standardı ile (Characterization of the dynamic mechanical properties of materials using the vibrating beam technique) belirlenmiştir. Rezonans frekansının, malzemeyle kaplanmış kirişin kayıp faktörünün belirlenmesi veya test malzemesinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. 3 ayrı konfigürasyonda ortaya çıkmaktadır:

- Tek tarafı kaplanmış ankastre kirişi-Oberst Yöntemi
- İki tarafı kaplanmış ankastre kirişi-Van Oort Yöntemi
- Simetrik sandviç ankastre kirişi
- Diğer test metotları da bulunmaktadır: DMA(Dinamik mekanik analiz), DMTA(dinamik mekanik termal analiz), Viskoanaliz, RSA II, Autovibron, Model 831... [2]

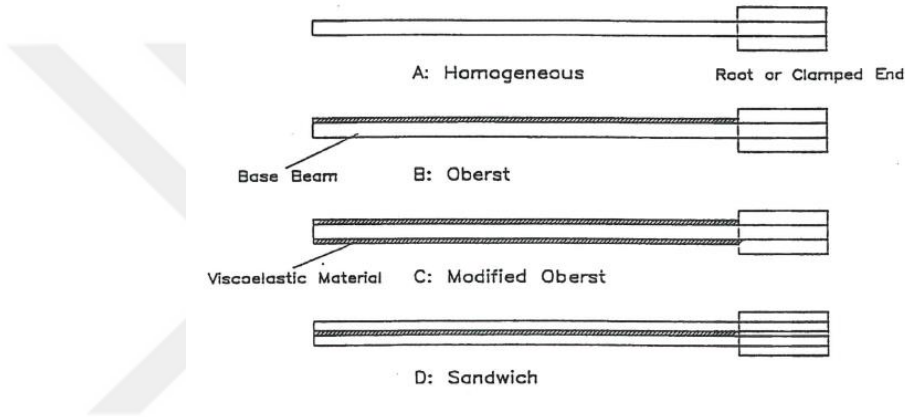
2.3.1 ASTM 756-05 Standardı ve Teorisi

ASTM 756-05 standardı yöntemleri ile malzemelerin dinamik özelliklerini belirleyen karakteristiklerden; kayıp faktörü, dinamik elastiklik modülü veya kayma modülünün belirlenmesi amaçlanır. Bu yöntem 50Hz ile 5000Hz frekans aralığında ve malzemenin kullanılabilir sıcaklık skalasında daha kesin sonuçlar verir [29].

Kullanılması gereken konfigürasyon Şekil 2.29.'da verilen seçeneklerden, sönüm özellikleri belirlenecek olan malzemeye ve belirlenmesi istenen sönüm özelliklerine göre belirlenir. Kendini taşıyan malzemelerin sönüm özellikleri ilk konfigürasyon ile belirlenirken, kendini taşıyamayan sönüm malzemelerinin çekme-basma durumundaki sönüm özellikleri iki aşamada belirlenir: ilk olarak ilgilenilen sıcaklıklarda rezonans frekansları belirlenmesi gereken çıplak çubuk olarak da adlandırılan düzgün metal bir çubuk ve etrafına sönüm elemanı ya sadece üst kısımda ya da hem alt hem de üstte olacak şekilde uygulanır. Bu kompozit yapı yine ilgilenilen sıcaklık değerlerinde rezonans frekansları ve kayıp faktörleri yalın haldeki çıplak çubuğun dinamik elastiklik bilgileri ve test verileri de kullanılarak bulunur. Kendini taşımayan bir malzemenin kayma sönüm özellikleri belirlenirken de işlem iki aşamada gerçekleşir,

ilk olarak iki eş çıplak metal çubuk test edilir ve aralarına sönüm malzemesi konarak sandviç forma getirilir.

Test edilecek malzemeler belirlendikten sonra, çubuklar sabitlenir ve istenilen çevresel ortama konur. Uygulanan kuvveti ve sistem cevabını ölçmek üzere iki adet transdüser(dönüştürücü) kullanılır. Titreşen çubuğun birden fazla rezonans frekansları ölçülerek sönümün frekansa bağlı değişimi; testi istenilen çevre koşullarında yaparak da sıcaklığın malzeme özellikleri üzerine etkisi incelenebilir. Kendini taşımayan malzemelerin tam anlamıyla camsıdan lastiksi bölgeye kadar doğru değerlendirmek için hem elastik hem de kayma durumu için 2 test yapılabilir.

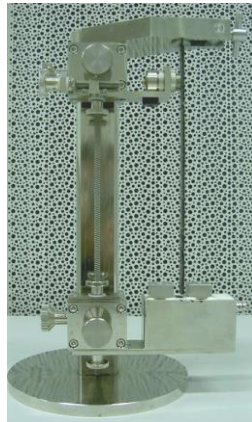


Şekil 2.29 : ASTM E-756 Standardının test düzeneği varyasyonları [29]

Teste başlanmadan önce alınması gereken önlemler ve ekipmanlar standardın içinde belirlenmiştir. Belirlenen test düzeneklerinde, uygun örneklerle yapılan testlerde şu şekildedir: numune malzemenin ölçüleri düzgün tanımlı olmalı, ayrıca uç kısmında test düzeneğine bağlı olmalıdır ve bu simülasyona en uygun ankastre giriş şartlarını yansıtmalıdır. Sönüm malzemesiyle çıplak çubuk arasındaki yapışkan yüzey kalınlığı ile ilgili parametreler belirlenmiştir. Aradaki yapışkan malzeme ile ilgili bu kurallara uyulmadığı takdirde deformasyon bu aradaki yüzeyde meydana gelebilir ve hataya sebep olur. Bazı durumlarda sönüm malzemesi kendinden yapışkan özelliğe sahiptir. Çıplak çubuk malzemesi genellikle çelik veya alüminyumdur. Çıplak çubuğun ölçüleri de genişlik 10 mm, serbest boyu 180 ile 250 mm arasında ve kalınlığı 1mm ila 3mm arasında olacak şekilde seçilmelidir. Çubuk ile ilgili diğer parametreler beklenen ölçüm frekans aralığına ve sönüm özellikleri test edilecek malzemenin karakteristiklerine göre belirlenebilir. Çubuğun burulma titreşimlerine maruz

kalmamasına dikkat edildiği takdirde, çubuğun genişliğinin malzeme özelliklerini hesaplarken bir faktör olduğu söylenemez. Malzemenin kalınlığı ilgilenilen malzemenin spesifik özelliklerine, ilgilenilen frekans ve sıcaklık aralığına bağlı olarak belirlenmektedir [29].

Prosedür şu şekildedir: Çubuğu ankastre mesnet koşullarına uygun olarak monte ettikten sonra, ortamın çevresel koşulları istenilen ayarlanmalıdır. Ölçüm için uygun uygun iki transdüser (genellikle temassız olanlar numuneden 1 mm uzağa yerleştirilir.) yerleştirilir. Çevre koşullarında sıcaklık ayarlanırken artışlar 5 veya 10 derece olacak şekilde artırılır. Sıcaklık aralığının belirlenmesi sönüm malzemesinin kayıp faktörünün ölçümlerinin doğru bir şekilde görüntülenebildiği aralıklarda yapılmalıdır ve test sırasında numune, termal dengede olmalı, bunun içinde bekleme süresi en az 30dakika olmalıdır. Bütün veri toplanan sıcaklıklarda sistem, tahrik transdüserinin amplifikatöründen sinüzoidal veya rastgele bir sinyal ile tahrik edildikten sonra ikinci bir transdüser ile sistemin cevabı ölçülür. Çubuğun dört veya daha fazla rezonans modu farklı sıcaklıklarda ölçülür ve ilk mod genellikle ölçülmez. Elde edilen cevap eğrisine her rezonans frekansı için yarım güç bant genişliği metodu uygulayarak, yani 3dB düşüş ve çıkış yaptığı durumlarda yarım güç noktaları bulunmalıdır. Burada kayıp faktörü yarım güç frekansının rezonans frekansına oranı ile bulunabilir. Ayrıca yarım güç bant genişliği metodu dışında da modal eğri uydurma, Nyquist çizimi, dinamik elastiklik metodu ve “n dB” bant genişliği metodu bulunmaktadır. Yarım güç bant genişliği metodu kullanılırken cevap eğrisinin simetrisine dikkat edilmelidir; eğer eğri simetrisi ve numune hazırlıklarına dikkat edilmezse, belirtilen formülleri kullanarak sönüm faktörü elde edilmeye çalışılmalıdır [29].



Şekil 2.30 : Oberst test düzeneği [30]

Hesaplama kısmı için standardın belirttiği formüller bulunmaktadır. Bütün tipteki numune ve test tipleri için gerekli olanlar her modun doğal frekansı, her modun sönüm faktörü veya yarım güç bant aralığı(3dB az olan noktalar), çubuğun geometrik özellikleri ve malzeme yoğunluklarıdır. Numunenin kendini taşıyan ve taşımayan malzeme olmasına bakılmaksızın bütün hesaplamalar düzgün çubuğun frekans cevabının değerlendirilmesi ile başlar. Buradan sonra eğer malzeme kendini taşıyan bir malzeme ise deney burada biter; eğer kendini taşımayan bir sönüm malzemesi ise düzgün çubuğun oluşturduğu veriler, sönüm materyali eklendikten sonraki yapıdan sönüm materyalinin özelliklerinin belirlenmesi için girdi oluşturur.

Düzgün veya çıplak çubuğun dinamik elastiklik modülü ve kayıp faktörü hesaplanmalıdır:

$$E = \frac{(12\rho l^4 f_n^2)}{(H^2 C_n^2)} \quad (2.78)$$

ve

$$\eta = \frac{(\Delta f_n)}{(f_n)} \quad (2.79)$$

C_n : düzgün serbest çubuğun n. modunun katsayısı

E : Çubuk malzemesinin dinamik elastiklik modülü, Pa

f_n : n. modun doğal frekansı, Hz

Δf_n : n. modun yarım güç bant genişliği, H

H : Titreşim yönündeki çubuğun kalınlığı, m

l : Çubuğun boyu, m

n : Mod sayısı

η : Çubuk malzemesinin kayıp faktörü, boyutsuz

ρ : Çubuğun yoğunluğu, kg/m³

C_1 : 0,55959

C_2 : 3,5069

C_3 : 9,8194

$C_4:19,242$

$C_5:31,809$ ve

$$C_n = \left(\frac{\pi}{2}\right) (n - 0.5)^2, n > 3 \text{ için.}$$

Oberst çubuğu yönteminde ise hesaplar şu şekildedir:

$$E_1 = \frac{E}{(2T^3)} [(\alpha - \beta) + \sqrt{\{(\alpha - \beta)^2 - 4T^3(1 - \alpha)\}}] \quad (2.80)$$

ve,

$$\eta_1 = \eta_{kompozit} \left[\frac{(1 + MT)(1 + 4MT + 6MT^2 + 4MT^3 + M^2T^4)}{(MT)(3 + 6T + 4T^2 + 2MT^3 + M^2T^4)} \right] \quad (2.81)$$

$D = \rho_1/\rho$:yoğunluk oranı

E : Çıplak çubuğun dinamik elastiklik modülü, Pa

E_1 : Sönüm elemanının dinamik elastiklik modülü, Pa

f_n : n. mod için çıplak çubuğun doğal frekansı, Hz

f_c : kompozit çubuğun doğal frekansı, Hz

Δf_c :kompozitin yarım güç bant genişliği frekansı, Hz

H : Çıplak çubuğun kalınlığı, m

H_1 : Sönüm elemanının numune kalınlığı, m

$M = E_1/E$: Dinamik elastiklik modülü oranları

$T = H_1/H$: kalınlık oranı

$$\alpha = (f_c/f_n)^2(1 + DT) \quad (2.82)$$

$$\beta = 4 + 6T + 4T^2 \quad (2.83)$$

$\eta_c = \Delta f_c/f_c$: kompozit çubuğun kayıp faktörü, boyutsuz

η_1 : Sönüm elemanının kayıp faktörü, boyutsuz

ρ : Çıplak çubuğun yoğunluğu, kg/m³

ρ_1 :Sönüm elemanının yoğunluğu, kg/m³

Sönüm elemanının dinamik kayma veya elastiklik modülü ve kayıp faktörünün tek bir çubuk ile birçok modu belirlenebilir; yani frekansa bağlı bu özellikler elde edilmiş olur. Ayrıca Şekil 2.31.'de görüldüğü üzere testleri değişik çevresel koşullarda yaparak, bu özellikleri değişik sıcaklıklarda da elde etme seçeneği de bulunmaktadır.



Şekil 2.31 : Termal odada Oberst düzeneği [31]



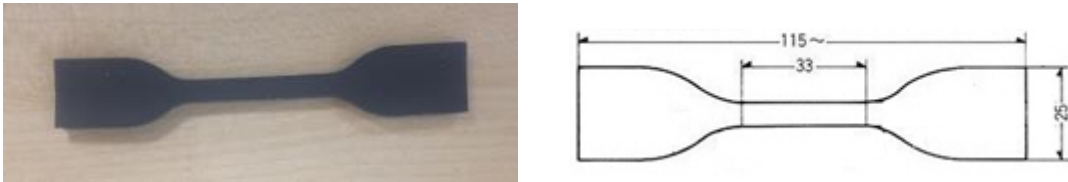
3. KÖRÜK MALZEMESİ DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu bölümde körük malzemesinin dinamik karakteristiklerinin test yöntemleri ile belirlenmesi, bu test yöntemlerinin pozitif ve negatif yanları ile sonuçları üzerinde durulmuştur. İlk önce, statik bir yöntem olan çekme testi ile açıklanmıştır. Bunun ardından, dinamik yöntemler kullanılarak malzemenin dinamik elastiklik modülü E' değeri ve kayıp faktörü η ; belirli bir frekans aralığında elde edilmiştir. Kullanılan dinamik yöntemler; ASTM standardı olan Oberst Çubuğu Yöntemi, diğeri ise Dinamik Mekanik Analiz yöntemidir.

3.1 Çekme Testi- ASTM D412

Çekme testinin polimerler için olan standardı incelenerek bu test yapılmıştır. Sonuçlar, sıfır Hz' de, genliğe, sıcaklığa ve ölçüm hatalarına bağlı, aynı zamanda hassas olacaktır. Kullanılan iki türdeki körük hamuru için çekme testi yapılmıştır. Bunun için mevcut bir körükten standartta belirlenen boyutlarda Şekil 3.1.'de görüldüğü üzere numuneler kesilmiştir.

Çekme testleri iki tip körükten 6'şar adet olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Testte kullanılan cihaz, Şekil 3.2.'de gösterilen Zwick/Roell Z020'dir ve cihazın numune çekme hızı 200mm/dk' dır. Çekme testi sonucunda iki hamur için de elastiklik modülü- % uzama grafiği elde edilmiştir. Burada cihaz, kesit daralmasını hesaba katmaktadır.

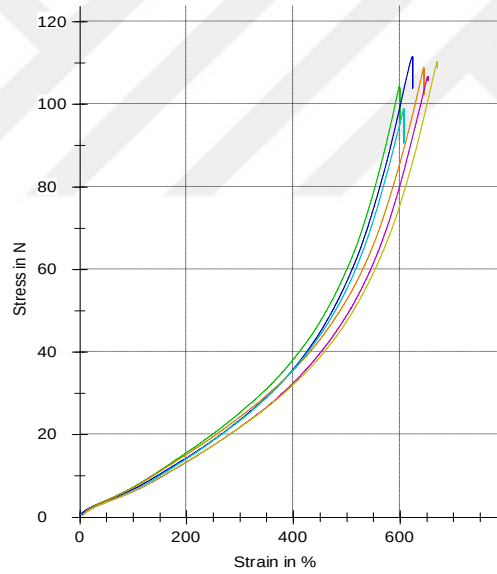


Şekil 3.1 : Çekme testi standart numune ve ölçüleri



Şekil 3.2 : Zwick/Roell Z020 test cihazı

Körük1’de yapılan 6 numune test sonuçları Şekil 3.3.’te ve sonuçlar Çizelge 3.1’de görülmektedir:

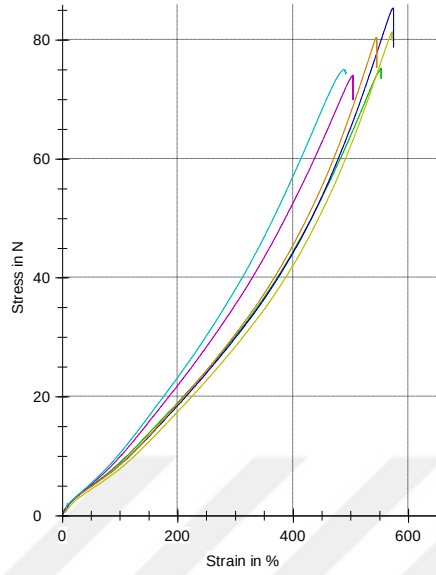


Şekil 3.3 : Körük1 hamuru çekme testi sonuçları

Çizelge 3.1 : Şekil 3.3.’te verilen çekme testinden bazı sonuçları çizelgesi

Numune No	E(N/mm ²) (%300 uzama)	E(N/mm ²) (%500 uzama)
1	3,74	9,22
2	3,55	8,41
3	3,72	8,05
4	3,21	7,19
5	3,51	8,29
6	3,23	7,05
Ortalama	3,493	8,035

Körük2’de yapılan 6 numune eğrileri Şekil 3.4.’ te ve sonuçlar Çizelge 3.1’de verilmiştir:



Şekil 3.4 : Körük2 hamuru çekme testi sonuçları

Çizelge 3.2 : Körük2 çekme testi sonuçlarından bazılarının çizelge görünümü

Numune No	E(N/mm ²) (%300 uzama)	E(N/mm ²) (%500 uzama)
1	3,95	8,37
2	3,9	8,5
3	4,03	8,94
4	4,66	-
5	4,99	-
6	3,84	8,38
Ortalama	3,95	8,58

Eğriler, eğer %300 bölgesinde değerlendirilirse (lineer davranışa yakın bölge),Körük1 için 3,5 MPa, Körük2 için 3,95 MPa elastiklik modülü öngörülebilir.

3.2 Körük Malzemesi Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi

EPDM malzemeye sahip körüğün dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için Titreşen Çubuklar Yöntemi adı verilen ASTM 756-05 standardının seçeneklerinden biri olan Oberst Çubuğu Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin teorik yönü ve test sistemi ele alınarak malzeme için sönüm ve dinamik elastiklik modülü için bir aralık belirleme çalışması yapılmıştır.

3.2.1 Oberst Yöntemi Hesaplamaları

Oberst yöntemi için , ASTM 756-05 standartının tek taraflı sönüm malzemesi kaplı seçeneği ile verilen uygulamanın yapılması için gerekli çalışmalarda ilk olarak belirlenen iki körüğün hamurundan, standarda uygun numuneler Şekil 3.5.’te görüldüğü üzere alınmıştır. Bu hamur numuneleri Hamur1(H1) ve Hamur2(H2) olarak nitelendirilmiştir:



Şekil 3.5 : Standartlara uygun alınmış iki Oberst testi sönüm malzemesi numunesi

Bu körüklerden başlangıç olarak üstteki şekilde numune alındıktan sonra Oberst çubuğuna uygun boyutlarda kesilmiş ve yapıştırılmaya hazır hale getirilmiştir. Körük malzemesi olan EPDM kendinden yapışkanlı bir numuneye sahip değildir. Aksine yapışmaya karşı zorluk yaratan kaygan ve pürüzsüz bir yüzeyi vardır. Bu nedenle körüğü yapıştırabilmek de bu test yönteminde dikkat edilmesi gereken önemli bir detaydır. Testte kullanılan çıplak çubuk, bu tez kapsamında tüm testlerde çeliktir. Çizelge 3.3. ‘te ölçülen yalın haldeki çelik ve körük ölçülerini verilmiştir.

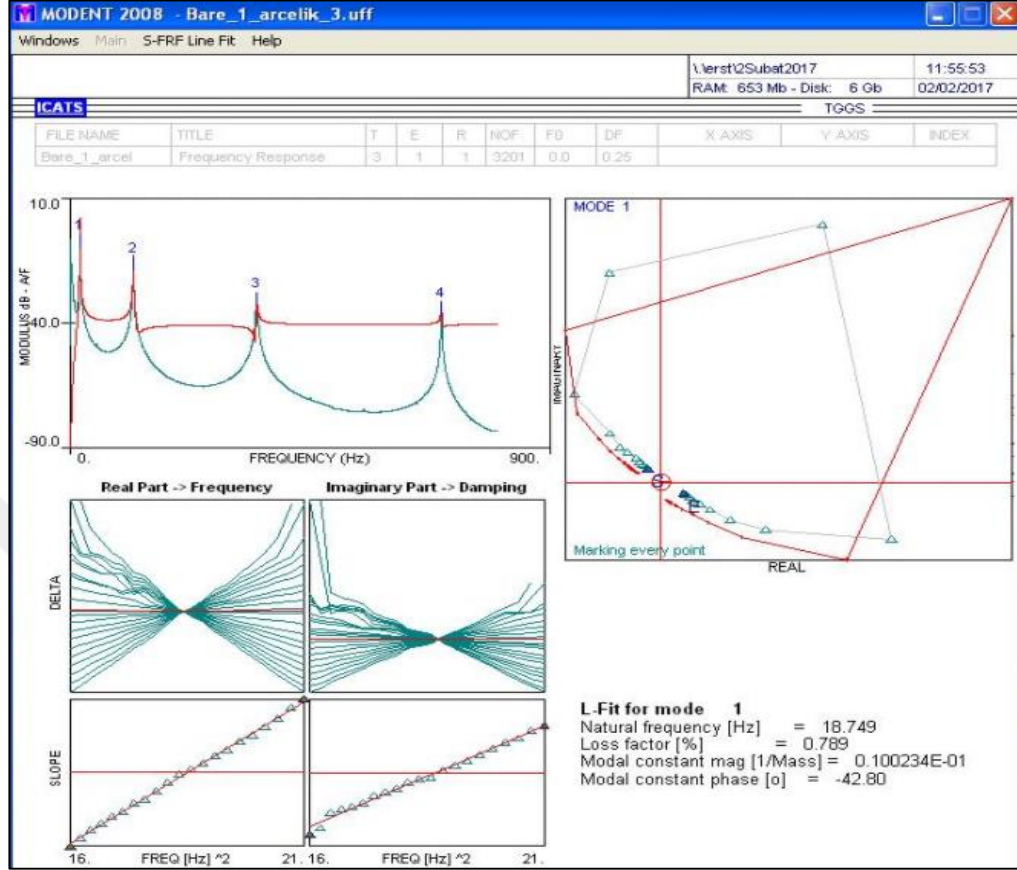
Çizelge 3.3 : Yalın halde ölçülen çelik ve körük ölçüleri

Malzeme	Kalınlık(H)	Uzunluk(l)	Genişlik
Çıplak çubuk	1 mm	250 mm	10 mm
Körük	2 mm	199 mm	10 mm

Test yapılmadan önce çubuk ve numunelerin yüzeyleri temizlenmiştir. Çıplak çubuk ile körük numunesinin yapıştırılması için iki tür yapıştırıcı denenmiştir: Mercury yapıştırıcısı ve çift taraflı bant. Ölçüm frekans aralığı 0-800 Hz’dir.

Ölçüm yazılım ve donanımları Brüel&Kjaer firmasına aittir. Kullanılan kuvvet ve ivme ölçümü verilerinin işlendiği yazılım, PULSE, UFF(Universal File Format) formatında FTF(Frekans Tepki Fonksiyonu) ölçümlerinin alınması için kullanıldı. UFF formatında alınan FTF’ ler Şekil 3.6.’ da görüldüğü üzere ICATS programında çizgi uydurma(line fitting) yöntemi kullanılarak analiz edildi ve doğal frekans ile

sönüm bilgisi elde edildi. Bu veriler kullanılarak standartta belirtilen hesaplamalar gerçekleştirildi.



Şekil 3.6 : ICATS yazılımı kullanılarak yapılan modal analiz çalışması

3.2.1.1 Çıplak Çubuk Ölçümleri

İlk olarak frekans çözünürlüğü $\Delta f=0.125$ Hz olmak üzere, sadece çıplak çubuk için ölçüm yapıldı. Bu ve bundan sonraki tüm testlerde ORT, ortalamanın kısaltması olarak, f_n ise doğal frekans kısaltması olarak kullanılmıştır. Çubuğun yukarıda verilen bilgiler dışındaki gerekli değerlerden C değerleri Oberst standardından alınırken diğer değerler Çizelge 3.4.' te verilmiştir ve sonuçlar Çizelge 3.5 'te gösterilmiştir:

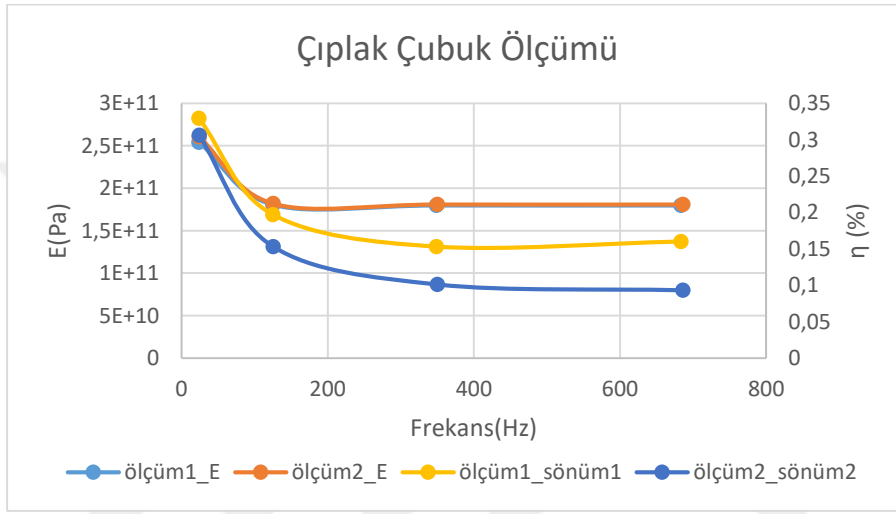
Çizelge 3.4 : Oberst Standartı çıplak çubuk ölçümü değerleri

l (m)	0,199
H (m)	0,001
$\rho(\text{kg/m}^3)$	7562,5

Çizelge 3.5 : Oberst çıplak çubuk test sonuçları

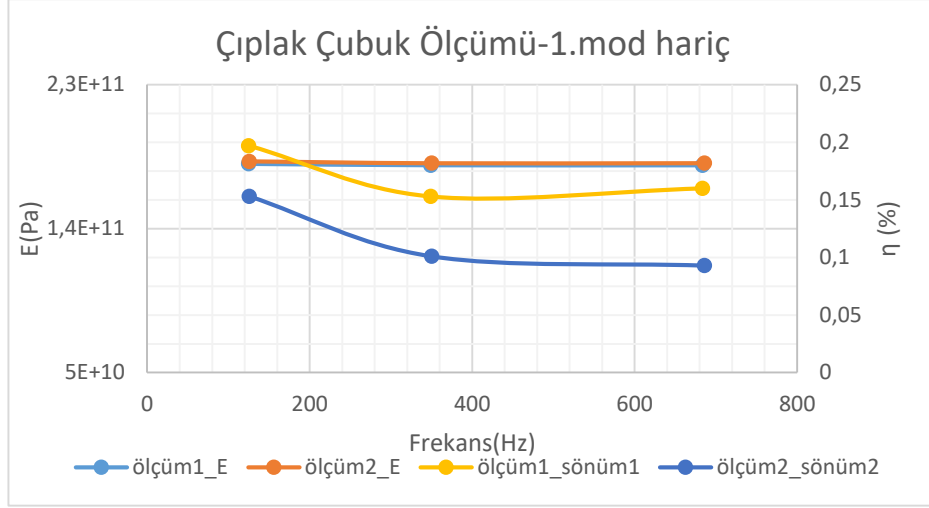
1_1	fn(Hz)	η (%)	E(Pa)	1_2	fn(Hz)	η (%)	E(Pa)	ORT-fn	ORT- η (%)	ORT-E (Pa)
1	23,639	0,329	2,54E+11	1	23,938	0,306	2,60E+11	23,7885	0,3175	2,57E+11
2	124,882	0,197	1,80E+11	2	125,396	0,153	1,82E+11	125,139	0,175	1,81E+11
3	348,816	0,153	1,80E+11	3	350,061	0,101	1,81E+11	349,4385	0,127	1,80E+11
4	683,468	0,16	1,80E+11	4	686,031	0,093	1,81E+11	684,7495	0,1265	1,80E+11

Sonuçlardan çıplak haldeki çelik çubuğun doğal frekans değerleri ve dinamik elastiklik modülü değerleri elde edilmiştir. Buna göre çıplak çubuk için elde edilen dinamik elastiklik modülü Şekil 3.7.'de görülmektedir:



Şekil 3.7 : Test1’de elde edilen dinamik elastiklik modülü ve sönüm değeri

Eğriye bakılarak, yapılan ölçümlerde 1. modda elde edilen veriler viskoelastik malzeme için frekans- dinamik elastiklik modülü eğrisinin öngörülen trendini bozmaktadır. Standartta da belirtildiği üzere ilk modda ölçüm hataları oluşabilmektedir. Körük ve Şanlıtürk, makalelerinde bu hatanın sebeplerini incelemişlerdir [11]. Aynı zamanda standartta da bununla ilgili dikkat edilmesi gereken bir sonraki modla ilgili önlem belirtilmiştir. Bu hatalar göz önünde bulundurularak ilk mod verilerden çıkarılırsa frekansa bağlı dinamik elastiklik modülü eğrisi malzeme davranışına uygun olarak Şekil 3.8.’de olduğu gibi elde edilecektir:



Şekil 3.8 : 1. modun çıkartılması ile elde edilen Elastiklik modülü ve sönüm değeri

Aynı test doğrulama amaçlı(özellikle dinamik elastiklik modülü) Çizelge 3.6.’ da verildiği gibi uzunluğu ve yoğunluğu farklı yine çelik bir çubuk ile $\Delta f=0,25$ Hz olmak üzere testler yapılmıştır. Bu çubuk testlerde kullanılsa dahi çubuğun elde edilen eğrilerinden ölçüm sisteminin güvenilirliği kontrol edilmiştir. Burada yine çıplak çubuğun dinamik elastiklik modülü formülleri uygulanarak hesaplama yapılmıştır:

Çizelge 3.6 : Oberst Standartı kontrol çıplak çubuğu değerleri

Malzeme	Kalınlık(H)	Uzunluk(l)	Genişlik
Çıplak çubuk	1 mm	300 mm	10 mm
Körük	2 mm	199 mm	10 mm

Hesaplamalarda çizelge 3.7’ deki değerler kullanıldı ve Çizelge 3.8.’ deki sonuçlar elde edildi:

Çizelge 3.7 : Oberst Standartı kontrol çıplak çubuğu verileri

l (m)	0,199
H (m)	0,001
$\rho(\text{kg/m}^3)$	7780,333

Çizelge 3.8 : Oberst kontrol çubuğu testi sonuçları

1_1	fn(Hz)	E(Pa)	1_2	fn(Hz)	E(Pa)	1_3	fn(Hz)	E(Pa)	ORT-fn (Hz)	ORT-E (Pa)
1	20,25	1,91E+11	1	20,75	2,01E+11	1	20,75	2,01E+11	20,58	1,98E+11
2	123,8	1,83E+11	2	124,3	1,84E+11	2	124,3	1,84E+11	124,12	1,83E+11
3	358,8	1,96E+11	3	359,3	1,96E+11	3	359,5	1,96E+11	359,2	1,96E+11
4	710	1,99E+11	4	710,3	1,99E+11	4	710,8	1,99E+11	710,35	1,99E+11

Burada farklı yoğunluktaki ve boydaki çıplak çelik test edilmiştir. Yine, eklendiği üzere, 1.modda hatalar gözlemlenmiş ve analizlere dahil edilmemiştir. Standart da bu şekilde belirtilmiştir.

3.2.1.2 Kompozit Çubuk Ölçüm ve Hesapları

Testlerde kullanılan körük, yapıştırılmadan önce yapıştırıcının etkisinin gözlenmesi ile ilgili çalışma yapılmıştır. Yapıştırıcı malzeme seçilirken en önemli unsurlar: yapışmanın tüm körük yüzeyinde sağlanması, homojen malzeme kullanılması(yapıştırıcı kalınlığının sabit olması), yapıştırıcı malzeme özelliklerinin bilinmesi. Testler kapsamında yapıştırıcı olarak Mercury yapıştırıcısı ve çift taraflı yapıştırıcı kullanılmıştır.

İlk olarak Mercury yapıştırıcısı ile ölçümler yapılmıştır. Bu yapıştırıcı plastik malzemelerin metal malzemeler arası,0,15mm'den az boşluklarda,-40°C ila 80°C aralığında sıcaklıklara uygundur [32]. Mercury yapıştırıcısının etkisinin belirlenmesi için öncelikle sadece Mercury yapıştırıcısı sürülmüş çubuktan ölçümler alınmıştır. Çelik çubuk çıplak çubuk olarak kabul edildikten sonra üzerine eklenip yapıyı kompozit hale getiren Mercury yapıştırıcısı ve körük katmanı değerlendirilecektir.

İlk olarak, çıplak çubuk üzerine Mercury yapıştırıcısı sürülmüş ve $\Delta f=0.125$ Hz olmak üzere çubuk incelenmiştir. Bundan sonra ki ölçümlerde de ölçüm sonuçları hassaslığı dikkate alınarak ve önceden yapılan hazırlık testleri ile $\Delta f=0.125$ Hz olarak belirlenmiştir. Çubuğun körük yapıştırılan 199 mm' lik kısma Mercury yapıştırıcısı sürülmüştür, fakat yapıştırıcı kalınlığının her bölgede aynı olması sağlanamamıştır, sürülme durumuna bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Ortalama yapıştırıcı kalınlığı için 0,025 mm değeri kabul edilmiştir.c1,c2,c3,c4 değerleri aynı olmak üzere diğer gerekli çubuk değerleri Çizelge 3.9.' daki gibidir ve sonuçlar ise Çizelge 3.10' da verilmiştir:

Çizelge 3.9 : Sadece Mercury yapıştırıcılı çubuk bilgileri

Kütle(g)	18,5
Hacim(m ³)	2,50E-06
Yoğunluk(kg/m ³)	7401,48
H(m)	0,00105

Çizelge 3.10 : Sadece Mercury yapıştırıcılı çubuk Oberst testi sonuçları

M_1	fn (Hz)	η (%)	E (Pa)	M_2	fn (Hz)	η (%)	E (Pa)	ORT-fn (Hz)	ORT- η (%)	ORT-E (Pa)
1	19,388	0,649	1,52E+11	1	19,385	0,674	1,52E+11	19,3865	0,6615	1,52E+11
2	121,283	0,441	1,51E+11	2	121,283	0,441	1,51E+11	121,283	0,441	1,51E+11
3	344,407	0,322	1,55E+11	3	344,435	0,338	1,55E+11	344,421	0,33	1,55E+11
4	678,596	0,317	1,57E+11	4	678,591	0,318	1,57E+11	678,594	0,3175	1,57E+11

Burada gözükten, yapıştırıcının kalınlığına bağlı olarak ölçümün ciddi ölçüde etkilenmesidir. Doğal frekanslar çıplak çubuğun çelik çubuk olduğu duruma göre düşmüştür ki bu da yapıştırıcı olarak Mercury seçildiğinde kütlenin etkin olduğunu göstermektedir. Ayrıca 1.modda yine çıplak çelik çubukta görülen durum görülmektedir. Bu nedenle yine 1.mod göz önüne alınmamıştır.

Çıplak çubuk olarak çelik çubuğun alındığı durumda Körük1 ve Körük2 numunelerinde Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12.' de verilen değerler dahilinde testler yapıldı. Testlerde elde edilen sonuçlardan Körük1 için Çizelge 3.13.' te görüldüğü gibidir:

Çizelge 3.11 : Körük1- Mercury yapıştırıcılı çubuk hesaplanan katsayı sonuçları

K1-1.ölçüm			
alfa1	0,84872	beta1	37,0336
alfa2	0,95074	beta2	37,0336
alfa3	0,98887	beta3	37,0336
alfa4	0,9977	beta4	37,0336
2.ölçüm			
alfa1	0,87611	beta1	37,0336
alfa2	0,95281	beta2	37,0336
alfa3	0,98928	beta3	37,0336
alfa4	0,99816	beta4	37,0336
3.ölçüm			
alfa1	0,84505	beta1	37,0336
alfa2	0,95793	beta2	37,0336
alfa3	0,99872	beta3	37,0336
alfa4	1,00873	beta4	37,0336

Çizelge 3.12 : Körük1- Mercury yapıştırıcısı numuneli çubuk değerleri

D	0,14966
T	2,22
H	0,001
H1	0,00222

Çizelge 3.13 : Körük1-Mercury yapıştırıcısı Oberst testi sonuçları

K1_1	fn(Hz)	$\eta(\%)$ -komp	E(Pa)	K1_2	fn(Hz)	$\eta(\%)$ -komp	E(Pa)
1	18,987	0,509	-2,90E+08	1	19,291	0,457	-2,40E+08
2	105,714	0,361	-9,50E+07	2	105,829	0,363	-9,10E+07
3	301,057	0,268	-2,10E+07	3	301,119	0,255	-2,10E+07
4	592,569	0,249	-4,40E+06	4	592,706	0,232	-3,50E+06
K1_3	fn(Hz)	$\eta(\%)$ -komp	E(Pa)	ORT-fn (Hz)	ORT-E (Pa)		
1	18,946	0,519	-3,00E+08	19,07	-2,70E+08		
2	106,113	0,377	-8,10E+07	105,9	-8,90E+07		
3	302,552	0,265	-2,50E+06	301,6	-1,50E+07		
4	595,836	0,233	1,70E+07	593,7	2,90E+06		

Körük2'nin değerleri Çizelge 3.14 ve 3.15'te verilmiştir ve sonuçlar Çizelge 3.16' da belirtildiği gibidir:

Çizelge 3.14 : Körük2- Mercury yapıştırıcılı çubuk için hesaplanan katsayı değerleri

K2-1.ölçüm			
alfa1	0,84871	beta1	37,75
alfa2	0,95074	beta2	37,75
alfa3	0,98887	beta3	37,75
alfa4	0,99769	beta4	37,75
2.ölçüm			
alfa1	0,87611	beta1	37,75
alfa2	0,95281	beta2	37,75
alfa3	0,98928	beta3	37,75
alfa4	0,99816	beta4	37,75
3.ölçüm			
alfa1	0,84505	beta1	37,75
alfa2	0,95793	beta2	37,75
alfa3	0,99871	beta3	37,75
alfa4	1,00873	beta4	37,75

Çizelge 3.15 : Körük2- Mercury yapıştırıcılı çubuk değerleri

D	0,147663
T	2,25
H	0,001
H1	0,00225

Çizelge 3.16 : Körük2- Mercury yapıştırıcısı Oberst testi sonuçları

K2_1	fn(Hz)	$\eta(\%)$ -komp	E(Pa)	K2_2	fn(Hz)	$\eta(\%)$ -komp	E(Pa)
1	18,987	0,509	-2,80E+08	1	19,291	0,457	-2,30E+08
2	105,714	0,361	-9,20E+07	2	105,829	0,363	-8,80E+07
3	301,057	0,268	-2,10E+07	3	301,119	0,255	-2,00E+07
4	592,569	0,249	-4,30E+06	4	592,706	0,232	-3,40E+06
K2_3	fn(Hz)	$\eta(\%)$ -komp	E(Pa)	ORT-fn (Hz)	ORT-E (Pa)		
1	18,946	0,519	-2,90E+08	19,07	-2,70E+08		
2	106,113	0,377	-7,80E+07	105,9	-8,60E+07		
3	302,552	0,265	-2,40E+06	301,6	-1,40E+07		
4	595,836	0,233	1,60E+07	593,7	2,80E+06		

Kompozit çubuğun hem sönüm hem de dinamik elastiklik modülü özellikleri çıplak çelik çubuğun özelliklerinden oldukça farklıdır. Mercury yapıştırıcısı için yapılan ölçümler sırasında da karşılaşılan en belirgin problem, Şekil 3.9.(b)'de görüldüğü üzere yapışmanın tam anlamıyla sağlanamamasıdır, bölgesel ayrılmalar görülmektedir. Bunun dışında yapıştırıcı üzerine körük yapıştırılırken yapıştırıcının hala akışkan olması nedeniyle Şekil 3.9.(a)' da görülen durumda kenar bölgelerden malzeme taşması görülmektedir; bu durum aradaki yapıştırıcı kalınlığının ölçümden ölçüme çok büyük farklılıklar göstermesine neden olmaktadır. Tüm bu problemler ölçüm sonuçlarında da büyük farklılıklar olarak ortaya çıkmakta, yapıştırıcı olarak farklı bir deneme yapılmasını gerektirmiştir.



a)

b)

Şekil 3.9 : Mercury yapıştırıcısı kullanımının Oberst testinde oluşturduğu problemler(a) taşma, (b) ayrılma

Daha homojen bir yapı sağlanması, kalınlık, yoğunluk gibi özelliklerin daha hassas biçimde belirlenmesi için çift taraflı bant kullanılarak ölçümlere devam edilmiştir. Yine Mercury yapıştırıcısı ile yapılan testlerdeki gibi çıplak çubuk olarak yapışkanlı çubuk ve sadece çelik çubuk durumu ele alınmıştır. Çıplak çubuk için yine aynı boyutlardaki çubuk kullanılmıştır. Ölçüm değerlerinde Çizelge 3.8. verileri baz alınmış ve Çizelge 3.17 verileri kullanılmıştır.

Çizelge 3.17 : Üzerinde sadece çift taraflı bant bulunan çubuk değerleri

l (m)	0,199
H (m)	0,00102
$\rho(\text{kg/m}^3)$	7500,6

Çizelge 3.18 : Sadece çift taraflı bant bulunan çubuğun Oberst test sonuçları

ÇB_1	fn (Hz)	η (%)	E (Pa)	ORT-E (Pa)	
1	23,162	0,607	2,30E+11	2,30E+11	
2	124,66	0,509	1,70E+11	1,70E+11	
3	349,09	0,403	1,70E+11	1,70E+11	
4	684,6	0,303	1,70E+11	1,70E+11	
ÇB_2	fn (Hz)	η (%)	E (Pa)	ORT-fn (Hz)	ORT-E (Pa)
1	23,175	0,522	2,30E+11	23,17	2,30E+11
2	124,749	0,462	1,70E+11	124,7	1,70E+11
3	349,248	0,343	1,70E+11	349,2	1,70E+11
4	685,133	0,3	1,70E+11	684,9	1,70E+11

Dinamik elastiklik modülü düşmüş, çeliğin çıplak çubuk olduğu duruma göre doğal frekanslar çok az değişiklik göstermiştir. Yapıştırıcılı durumda kompozit haldeki yapının hesapları Çizelge 3.19 ve Çizelge 3.20’de verilen değerler kullanılarak yapılmıştır. Körük1 ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.21’ de görülmektedir:

Çizelge 3.19 : Çift taraflı bant ve Körük1’ den oluşan kompozit çubuk verileri

D	0,150744
T	2,22
H (m)	0,001
H1 (m)	0,00222
M1	-5,36E-04
M2	1,47E+04
M3	7,60E+03
M4	7,11E+03

Çizelge 3.20 : Çift taraflı bant ve Körük1’den oluşan kompozit çubuk hesaplanan değerler

1.ölçüm			
alfa1	0,95039	beta1	37,03
alfa2	1,00538	beta2	37,03
alfa3	1,00983	beta3	37,03
alfa4	1,01037	beta4	37,03
2.ölçüm			
alfa1	0,96369	beta1	37,03
alfa2	1,00553	beta2	37,03
alfa3	1,01121	beta3	37,03
alfa4	1,01213	beta4	37,03

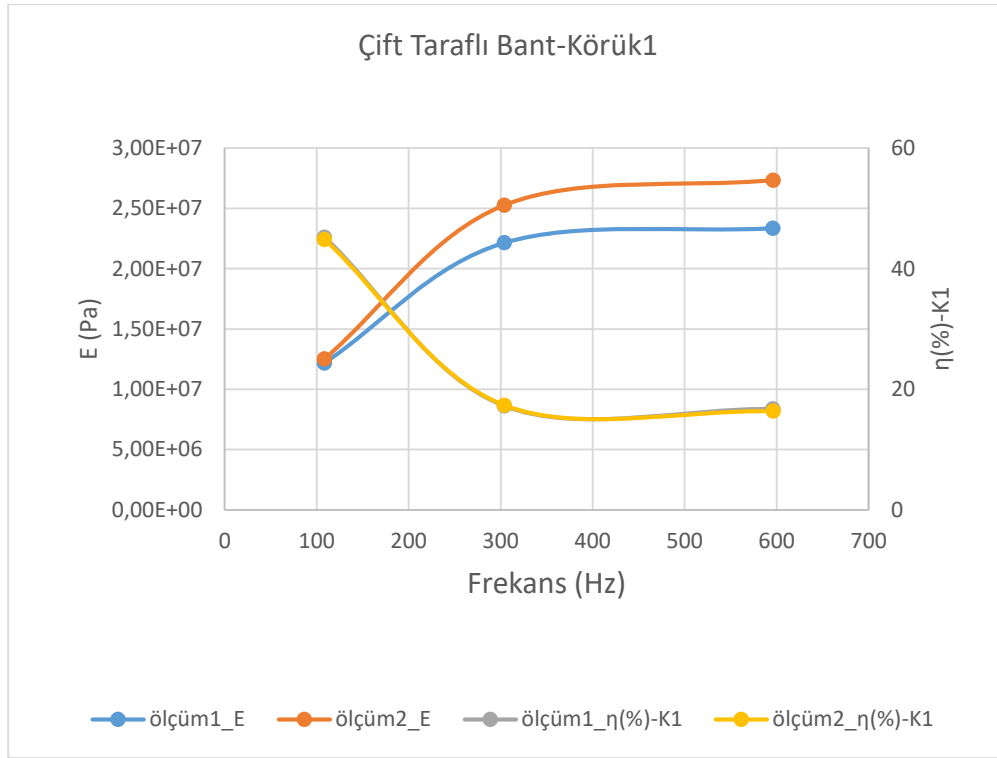
Çizelge 3.21 : Çift taraflı bant ve Körük1’den oluşan kompozit çubuğun Oberst testi sonuçları

ÇB_K1_1	fn (Hz)	η(%)-komp	E (Pa)	η(%)-K1		
1	20,074	0,355	-1,60E+08	-6,79		
2	108,61	0,242	1,22E+07	45,23		
3	303,96	0,168	2,21E+07	17,26		
4	595,78	0,172	2,34E+07	16,77		
ÇB_K1_2	fn(Hz)	η(%)-komp	E (Pa)	η(%)-K1	ORT-fn (Hz)	ORT-E (Pa)
1	20,214	0,397	-1,17E+08	-7,6	20,144	-1,40E+08
2	108,619	0,24	1,25E+07	44,9	108,62	1,20E+07
3	304,164	0,169	2,53E+07	17,4	304,06	2,40E+07
4	596,302	0,168	2,73E+07	16,4	596,04	2,50E+07

Aynı test Körük2 için de yapılmıştır. Test verileri Çizelge 3.22’de ve sonuçlar Çizelge 3.23’ te görülmektedir:

Çizelge 3.22 : Çift taraflı bant-Körük2 kompozit yapısının verileri

D	0,150744
T	2,22
H (m)	0,001
H1 (m)	0,00222
M1	-1,31E+03
M2	-1,73E+04
M3	4,10E+04
M4	2,28E+04



Şekil 3.10 : Çift taraflı bant ve Körük1’ den oluşan kompozit çubuğun elastiklik modülü ve kayıp faktörünün frekansa bağlı değişimi

Çizelge 3.23 : Çift taraflı bant- Körük2 kompozit yapısının Oberst testi sonuçları

ÇB_K2_1	fn (Hz)	η(%) -komp	E (Pa)	η(%) -K2	ÇB_K2_2	fn (Hz)	η(%) -komp	E (Pa)	η(%) -K2
1	19,954	0,434	-1,96E+08	-6,68	1	20,067	0,483	-1,61E+08	-7,432
2	108,07	0,326	-1,04E+07	-70,4	2	108,577	0,31	1,08E+07	-66,91
3	302,768	0,277	4,39E+06	142,3	3	303,855	0,259	2,06E+07	133,1
4	593,757	0,293	7,91E+06	83,77	4	595,59	0,278	2,19E+07	79,48
ÇB_K2_3	fn (Hz)	η(%) -komp	E (Pa)	η(%) -K2	ORT-fn (Hz)	ORT-η(%) -K2	ORT-E (Pa)		
1	20,074	0,397	-1,59E+08	-6,109	20,032	-6,74	-1,72E+08		
2	108,61	0,24	1,22E+07	-51,8	108,42	-63,02	1,15E+07		
3	303,96	0,169	2,21E+07	86,82	303,53	120,73	1,57E+07		
4	595,78	0,168	2,34E+07	48,03	595,04	70,427	1,77E+07		

3.3 Dinamik Mekanik Analiz Test Yöntemi Ve Ölçümler

Dinamik Mekanik Analiz (DMA) polimerlerin viskoelastik davranışlarını incelemek için kullanılan bir tekniktir. DMA, direngenliği ve kayıp faktörünü ölçerek bunları ‘modül’ ve ‘tan delta’(kayıp faktörü, η) olarak ifade eder. Merkez Ar-Ge laboratuvarlarında bulunan ‘Q800 DMA (TA Instruments)’ ve test cihazı ile DIN EN 6721-1 standartlarına göre körük malzemesi incelenmiştir. Şekil 3.11’ de görülen 3

noktadan eğilme, kayma, basma ve çekme için cihazın aparatları verilirken, bu aparatlar farklı polimerlerin testlerine uygunluk göstermektedir. EPDM numunelerinin ölçümünde önerilen aparat kayma modüllerini ölçmeye uygun olanıdır. Bu test verileri daha sonra istenilen dinamik elastiklik modülüne teorik yaklaşım kabulü ile dönüştürülebilir.

Çamaşır makinesinin çalışma koşulları ve körüğün maruz kaldığı kuvvetler göz önünde bulundurularak bir test prosedürü hazırlanmıştır. Kayma modülünün elde edilmesi gelecek çalışmalarda da kayma etkisinin dahil edilmesi adına önemli bir veri oluşturmaktadır.

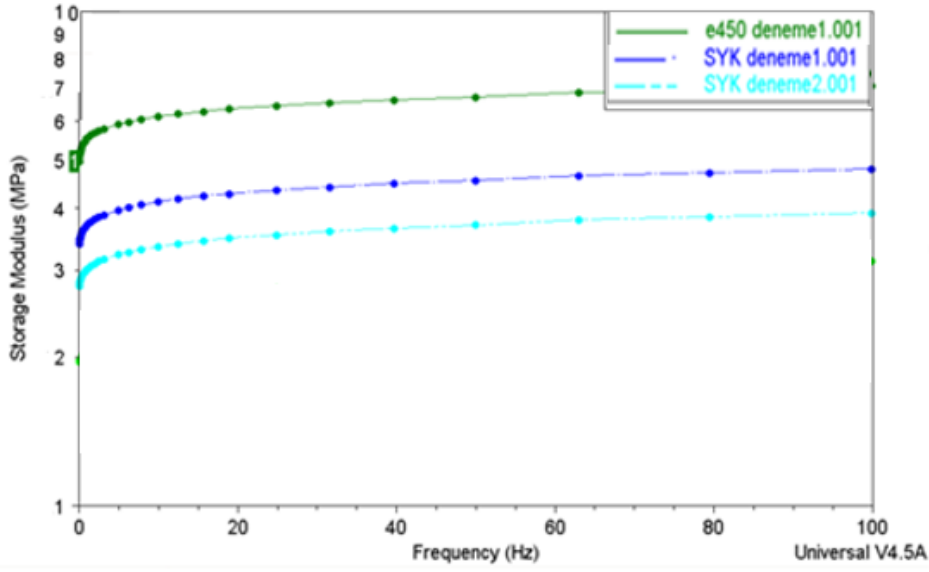


Şekil 3.11 : TA Instruments tarafından sunulan test aparatları görseli [33]

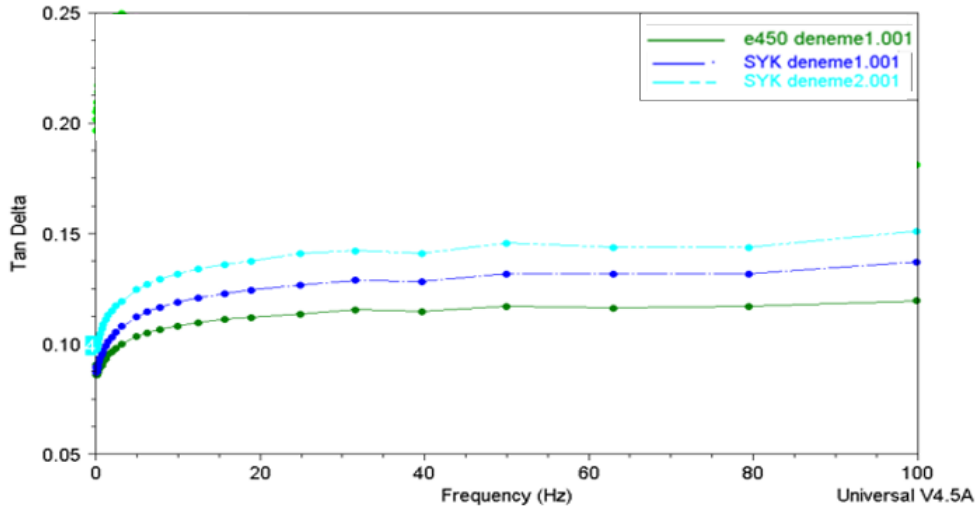
Hem değişken sıcaklık hem de değişken frekansta çalışan cihazın frekans aralığı 0-200 Hz iken, -150°C ila 600°C sıcaklıkları arasında çalışabilmekte, maksimum uygulanan kuvvet 18N' a kadar çıkabilmektedir [33].

İlk olarak değişken frekansta testler yapılmıştır. 10mm*10mm boyutunda 2,2 mm kalınlığında numuneler hazırlanmıştır. Bir test yaklaşık 75 dakika sürmektedir. Körük1 ve Körük2 numuneleri hazırlanmıştır. Körük2 için ikinci denemede (e450 deneme.2) açıkça hatalı sonuçlar görülmektedir, dikkate alınmamalıdır. Bu sonuçlar numunenin sınır koşullarında yaşanan sorunlardan kaynaklanmış, numune ince olması sebebi ile kayma sorunu yaşanmıştır.

SYK deneme1 ve deneme2 sonuçları Körük1'e ait, e450 deneme1 ve deneme2 ise Körük2 'ye aittir. 2 farklı hamurun sonuçları, şekil 3.12. ve 3.13.' te depo modülü ve kayıp faktörü ile gösterilmiştir.

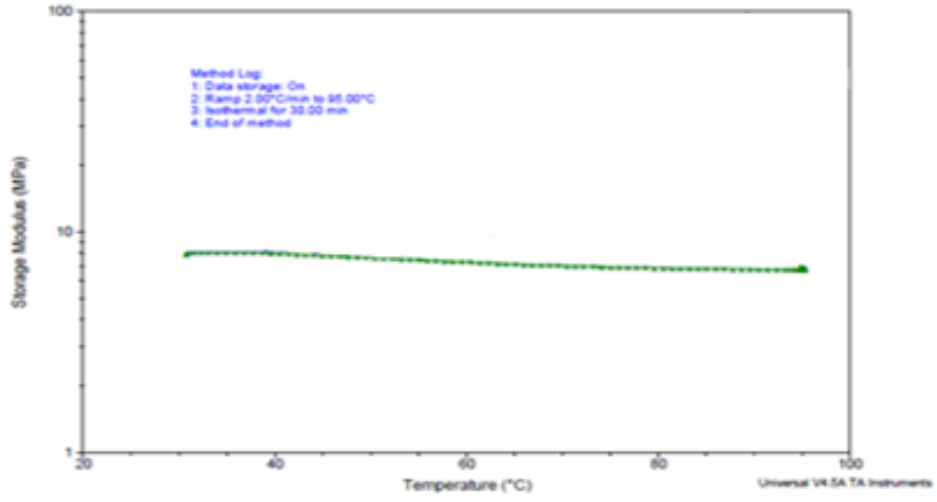


Şekil 3.12 : Frekansa bağlı K r k1(SYK) ve K r k2(e450) depo modülü(dinamik elastiklik modülü) sonuçları

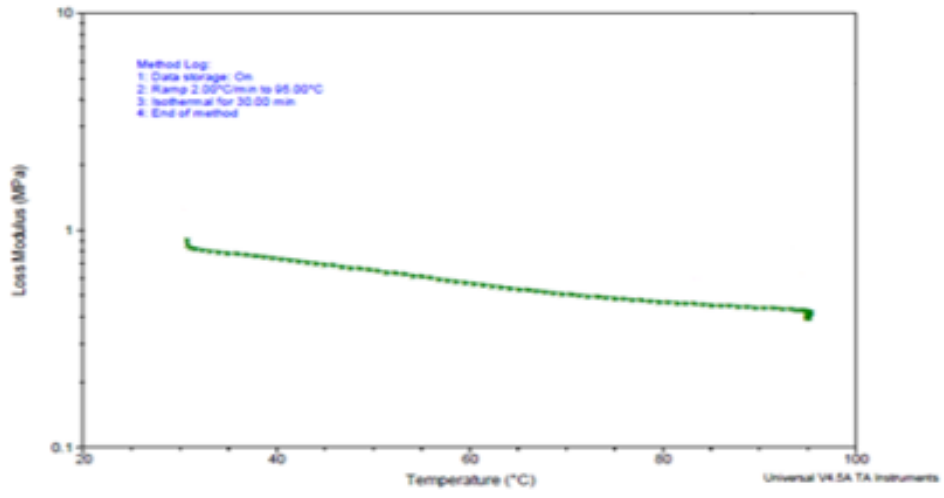


Şekil 3.13 : K r k1(SYK) ve K r k2(e450) kayıp faktörü sonuçları

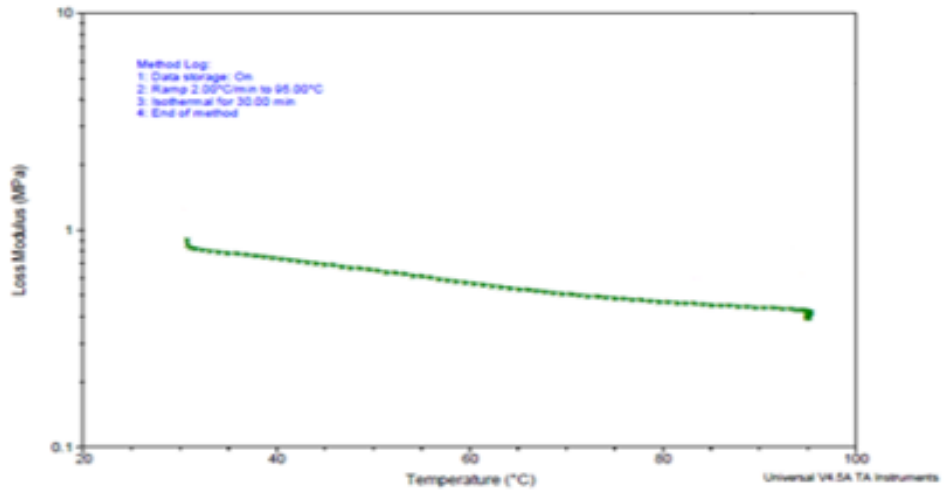
Bu test sonucunda elde edilen modüller dinamik elastiklik modülüne ait verilerdir. Aynı zamanda bu test değişken sıcaklıklar için K r k2 'de yapılmıştır. Bunun yanında bu grafiklerde  u bilgi önemlidir: Şekil 3.14.(c)'de verilen tandelta(kayıp faktörü) grafiği,  ekil 3.14.(b)'deki (E'') kayıp modülünün,  ekil 3.14' te verilen depo modülüne(E') oranlanması ile elde edilmiştir. Depo modülünün elde edilen sıcaklığa bağlı sonuçları ise burada görülebilir. Bu değerler ile ilgilenilen sıcaklıktaki depo modülü değerinin frekans analizi ile kar ıla tırılmasına olanak sa lar.



a)



b)



c)

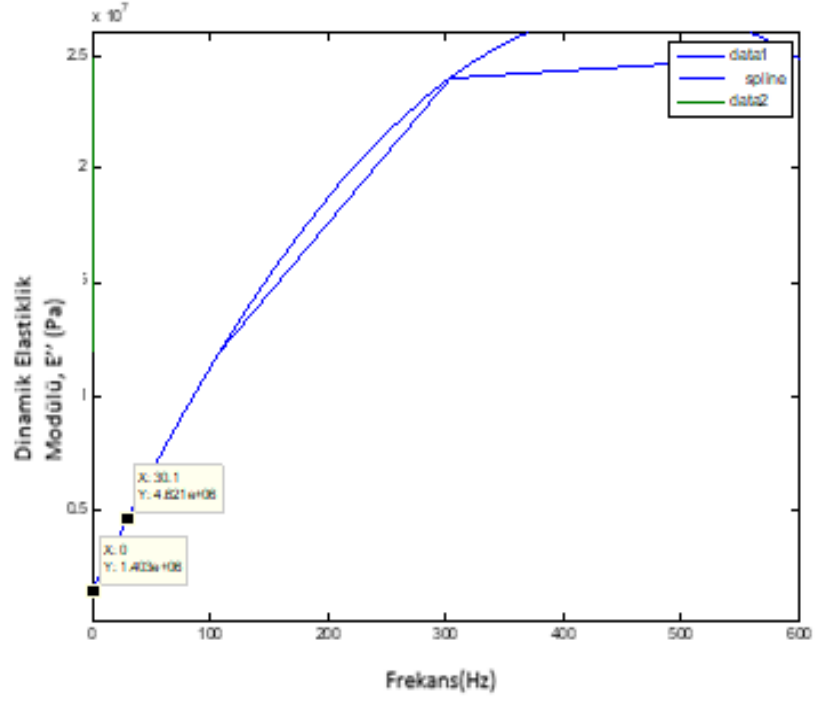
Şekil 3.14 : (a) Depo modülü (b) kayıp modülü (c) kayıp faktörü DMA değişken sıcaklık analizi Körük2 sonuçları

3.4 Yöntemlerin Değerlendirilmesi ve Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

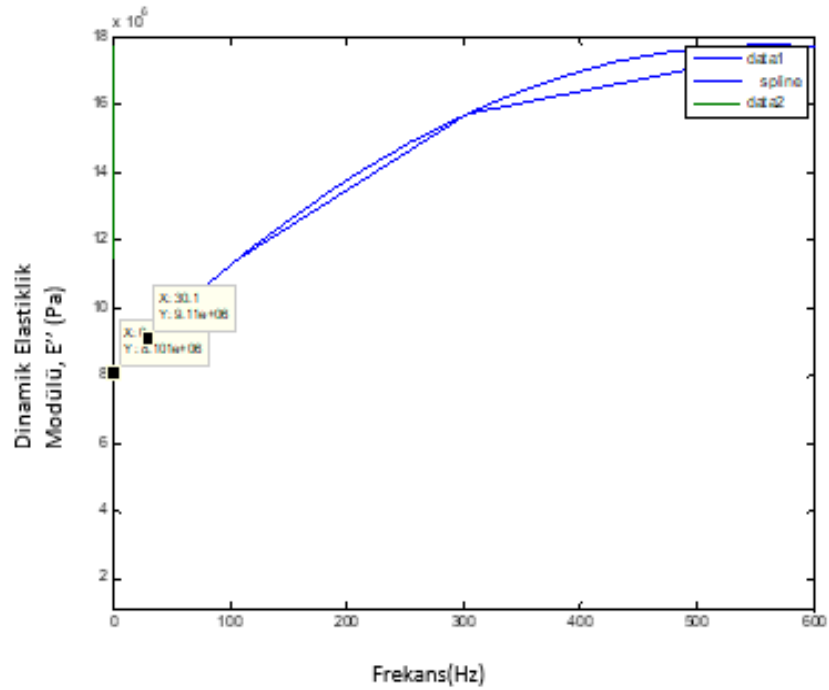
Özet olarak, EPDM' in dinamik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan testlerde iki yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerden üzerinde esas üzerinde durulan Oberst Çubuğu Yöntemi ve alternatif bir yöntem denenmesi için Dinamik Mekanik Analiz Yöntemi çalışmaları yapılmıştır.

Dinamik özellikleri belirlemeden önce statik bir analiz olan Çekme Testi standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testinde 0 Hz'teki özellikler görülmektedir. Malzemenin lineer olmayan karakteristiği, çekme eğrisinden elde edilen elastiklik modülünün değişkenliğinden görülmektedir. Burada çekme için standart bir veri kullanılamaz. Bu tip verilerde tanjant modülü verisi kullanılmaktadır. Tanjant modülü yaklaşımı eğrinin lineer olduğu kabulüne dayandığı için yine lineer olmayan karakteristik tarifi için uygun bir yöntem değildir [34] , [35].

Oberst Çubuğu Yöntemi ile 0 Hz-800 Hz frekans aralığında malzemenin dinamik elastiklik modülü (E') ve kayıp faktörü(η) özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Burada hem yapıştırıcının etkisi ele alınmış hem de yöntemle ilgili veriler elde edilmiştir. Yöntemde yapıştırıcı olarak viskoz yapıda olan japon yapıştırıcısı veya epoksi bazlı yapıştırıcıların kullanımının, özellikle homojen olmayan yapıları nedeniyle kalınlık değişkenliği ve taşma, ayrılma gibi problemlere sebep olduğu görülmüştür. Bunun yerine homojen yapıdaki çift taraflı bant kullanılarak homojen kalınlık elde edilmiş ve dinamik elastiklik modülü değişken frekanslarda 2 farklı körük için elde edilmiştir. Çamaşır makinası çalışma devri 0-1600 dev/dakika veya yaklaşık 0-27 Hz aralığı şeklindedir. Hesaplanan ilk anlamlı mod değeri Körük1 ve Körük2 için de yaklaşık 108 Hz civarındadır. Bu nedenle 0-27 Hz aralığındaki elastik modülü değerlerini elde etmeye yönelik bir iterasyon yapılmıştır. Bu iterasyonu yapılabilir kabul etmenin nedeni, viskoelastik malzemelerin frekans dinamik direngenlik eğrisinde lastiksi bölgedeki dar bir frekans aralığında ve eğrinin lineerliğinin bozulmadığı bölgede bulunulmasıdır. Buna göre Körük1'de 0 Hz 30 Hz aralığında dinamik direngenlik Şekil 3.15' te görüldüğü üzere 1,4 MPa' dan 4,6 MPa değerine değerler alırken; Şekil 3.16'da görüldüğü üzere Körük2 0 Hz'den 30 Hz 'e kadar değerlendirildiğinde dinamik direngenlik 8MPa ile 9,1 MPa aralığındadır.



Şekil 3.15 : Körük1'in dinamik elastiklik modülü istenilen frekans aralığı verileri eldesi



Şekil 3.16 : Körük2'nin dinamik elastiklik modülü istenilen frekans aralığı verileri eldesi

Bu sonuçlara göre Oberst yönteminde dinamik elastiklik modülü aralığı belirlenmiştir. Sönümü belirlemek adına; kayıp faktörü değerleri incelendiğinde, değerlerin oldukça

yüksek çıktığı saptanmıştır. Buradaki değerler, sadece körük sönümü olarak değerlendirilmemelidir; çelik çubuğa göre eklenen sönüm hem çift taraflı bant hem de köründür. Çift taraflı yapıştırıcının sönüm değerine etkisi/katkısı bu çalışma kapsamında netleştirilemediği için Oberst testinden elde edilen sönüm oranı değerleri güvenilir değildir.

Dinamik Mekanik Analiz yönteminde ise hem frekansa bağlı hem de sıcaklığa bağlı ölçümler yapılmıştır. Bu yöntem hem sınır koşulları hem de körük kalınlığının ince olmasına bağlı kayma durumunda oluşabilecek hatalardan etkilenmektedir. Aynı zamanda dinamik kayma modülü, elastiklik modülüne çevrilirken de kabul koşulundan kaynaklı hatalar oluşmuştur. Bu nedenlerle, dinamik elastiklik modülünü belirlemede güvenilirliği çok yüksek değildir. Ancak, ölçüm yönteminde elde edilen değerler yalnızca köruğe ait değerlerdir. Bunun yanında, sıcaklığa bağlı yapılan Körük1'in analizinde ilgilenilen sıcaklığın da 30°C olması gerekir ki frekansa bağlı analizde de sabit sıcaklık bu değer kabul edilmiştir. Termal analizde 30°C ' de elde edilen sönüm değerleri de frekans analizindeki değerlerle örtüşmektedir. Bu değerler sönüm için kullanılabilir olarak değerlendirilmiştir. Buna göre sönüm aralığı Körük 1 için 0,09-0,14 sönüm,Körük2 için 0,08-0,11 sönüm değerleri 30°C sıcaklıkta ve 30 Hz'e kadar olan frekans aralığında kullanılabilir. Elde edilen bu değerler sonlu elemanlar analizinde girdi verileri olarak kullanılmıştır. Çizelge 3.24'te dinamik testlerden elde edilen sonuçlar için veriler toplanmıştır.

Çizelge 3.24 : Oberst ve DMA yöntemleri ile elde edilen Körük1 ve Körük2 için dinamik elastiklik modülü ve kayıp faktörü çizelgesi

Yöntem	0-30 Hz	E' (MPa)	η
Oberst	Körük1	1,4-4,6	-
	Körük2	8-9,1	-
DMA	Körük1	~3,5-4	0,09-0,14
	Körük2	~5-7	0,08-0,11

Çizelge 3.24 'teki bu veriler körük malzemesi EPDM için sonlu elemanlar çalışmalarında veri aralığı oluşturmaktadır.

4. KÖRÜK TEST DÜZENEGİ GELİŞTİRİLMESİ VE ÖLÇÜMLER

Gerçek körüğün test edilebilmesine yönelik olarak, bir körük test düzeneği kavramsal tasarım çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada esas amaç çamaşır makinası sınır şartlarını körüğe yansıtacak aynı zamanda da istenilen testlerin yapılmasına uygun bir düzenek elde etmektir. Bu nedenle, körük test düzeneği tasarımının yapılması sürecinde bazı sonlu elemanlar ve modal analiz çalışmaları ile desteklenen optimizasyonlar yapılmıştır. Optimizasyon çalışmasında bazı kısıtlar bulunmaktadır. Geometrik kısıtlar şu şekildedir:

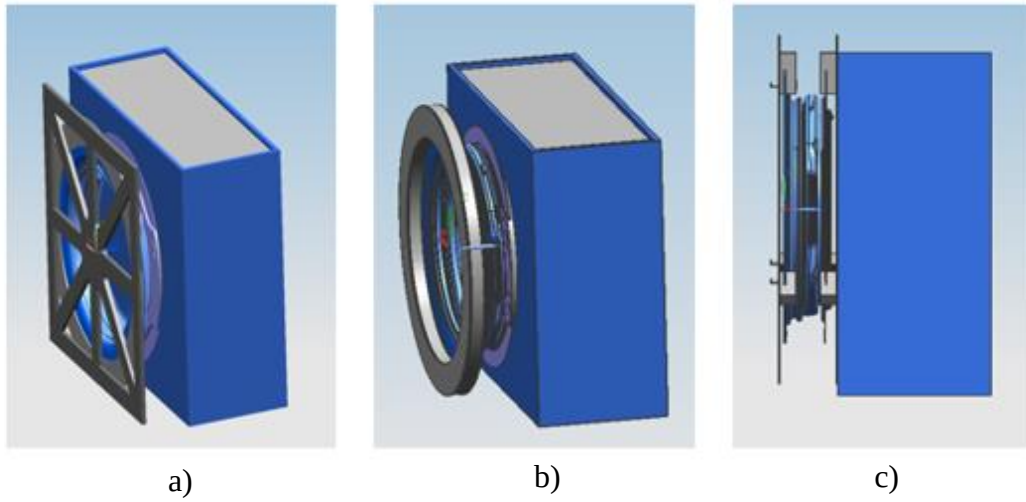
- Çamaşır makinesinin gövde kısmını temsil eden sabit bir yapının olması
- Tahrik grubunu temsil eden hareketin verileceği yapının olması
- Hem hareketli hem de hareketsiz kısımlarda körüğün takılabileceği geometrinin mevcut olması
- Tahrik verilecek yapıda planlanan testlere uygun geometrinin bulunması
- Belitilen geometrik kısıtların yanında aşağıdaki kısıtlar da dikkate alınmıştır;
- Düzeneğin sisteme ilave sönüm eklememesi
- Körük haricindeki sistemin sistemin tahrik frekansı aralığında direngen davranması
- Bağlantı yerlerinde esneme olmaması
- Körüğün istenilen deplasman seviyelerinde tahrik edilebilir olması
- Frekans seviyelerinin makinenin çalışma frekans aralığına ulaşabilmesi

Yukarıda belirtilen kısıtlara ilave olarak, tasarımın imalata da uygun olması gerekmektedir.

4.1 Körük Test Düzeneği Tasarım Çalışmaları

Ön tasarım çalışmalarında belirlenen ilk unsur körüğün takılacağı geometridir. Bu geometri kazan ön kapağında ve gövde ön duvarında bulunmaktadır. Test düzeneğinin

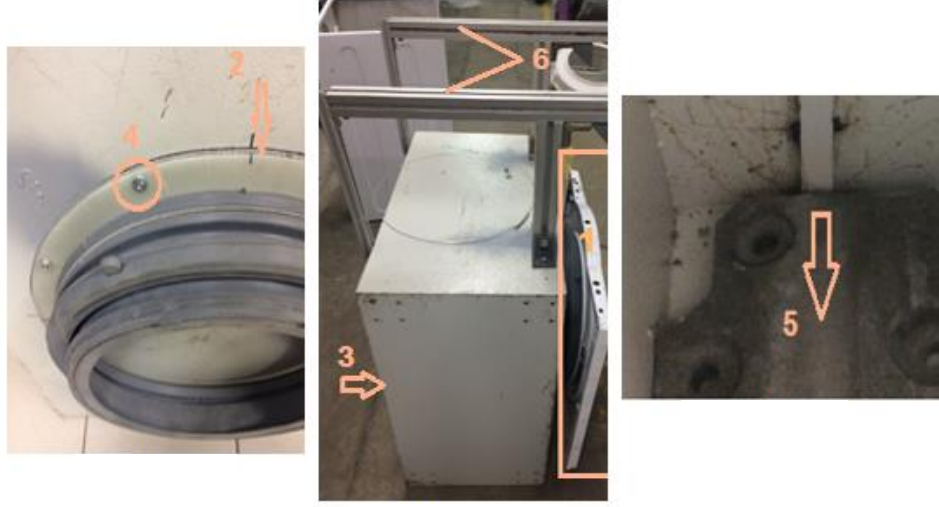
gerçek bağlantı koşullarını tam olarak yansıtması açısından, kazan ve tamburun körük bağlantı kesitlerinin direk kullanılması da seçenekler arasında değerlendirilmiştir. Şekil 4.1 Alternatif kavramsal tasarım çalışmaları yapılmış, nihai tasarım belirlenmiş ve iyileştirmeler yapılmıştır. Tasarım çalışmalarında, tahrik tarafı için kazandan kapak ön yüzeyi kesilmiştir. Daha sonra kapak ön yüzeyine tahrik frekanslarında rijit davranacak bir yapıya yine rijit bir şekilde bağlanması amaçlanmıştır. Bu nedenle tahrik oluşturulacak bu yapıya hem Şekil 4.1.(a)' da görülen türde dökümle elde edilecek profil, hem de hafif olması için içi boş bükme yapılı Şekil 4.2.(b)' deki gibi bir profil denenmiş arka tarafta ise gövde ön duvardan kesilen parça sabit bir yapıya çevresel cıvatalar ile bağlanmıştır. Ayrıca yine kesilen parçalardan tahrik tarafına şekil olarak geçme yapılı plakaya bağlı Şekil 4.3.(c)'deki gibi bir profil bağlanması için çalışma yapılmıştır.



Şekil 4.1 : (a) Alternatif tasarım1 (b) Alternatif tasarım2 (c) Alternatif tasarım3
CAD(bilgisayar destekli tasarım) gösterimi

Bu çalışmalarda ortaya konan tasarımlar, yeni üretim ve deneme süreçleri gerekmektedir ve sonuçta oluşabilecek profil alternatifleri istenilen frekans aralığını sağlamak adına yüksek kütlelerde çıkabilir. Bu çalışmalardan sonra burada tercih edilen düzenek tasarımı, maliyetlerin en aza indirgenmesi amaçlanarak, mevcut kaynakların azami ölçüde kullanılmasına dayanmaktadır.

Şekil 4.2.'de görülen nihai test düzeneğinde, gövde ön kapağı(1), kazan ön kapağı profili(2), sistemin sabitleneceği yapı(3), cıvatalar(8 adet)(4) ve denge taşları(5)(3 numaranın iç tarafında) kullanılmıştır. Bunun yanında kapak ve körük ağırlığının körük tarafından taşınmaması için askı sistemi hazırlamak üzere alüminyum profiller(6) sisteme eklenmiştir.



a)

b)

c)

Şekil 4.2 : Test düzeneği parçaları

Test düzeneğinde, körük haricindeki parça ve yapıların test edilecek frekanslarda rijit veya rijite yakın davranması gerekmektedir. Söz konusu kıvrılma bölgelerinde bu sebeple Şekil 4.3'te görüldüğü üzere ilave güçlendirilmeler yapılmıştır.



Şekil 4.3 : Kıvrılma bölgelerinde yapılan feder güçlendirmeleri

Sabitlemenin yapılacağı yapının iç yüzeyine(3), kazan geometrisinin bağlandığı yüzey herhangi bir esneme oluşmaması için profillerle(L profil) Şekil 4.4'te görüldüğü üzere kaynaklanmıştır. Bu yapının(3) sabitlenmesi için içine 54 kg denge taşı(4 adet)(5) konuldu ve testler için nihai tasarım oluşturuldu.



Şekil 4.4 : (3) numaralı parçanın kaynak güçlendirmeleri

4.1.1 Körük Test Düzeneği Değerlendirilmesi

Bu düzenek, yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere, körüğün bir tarafının sabitlenmesine (ankastre), diğer tarafının ise tahrik edilerek sistemin titreşim yapmasına izin vermektedir. Körüğün tahrik edildiği kapağın ilgilenilen frekans aralığında rijit davranması, sadece körüğün sönüm özelliklerinin belirlenmesi açısından önemlidir. Öncelikle tahrikin verileceği federlerle güçlendirilmiş (1) numaralı olan parça kapakta Şekil 4.5'te görüldüğü üzere çekiç testi yapılmıştır, kapağın hangi frekansa kadar rijit kütle olarak davranacağı belirlenmiştir.

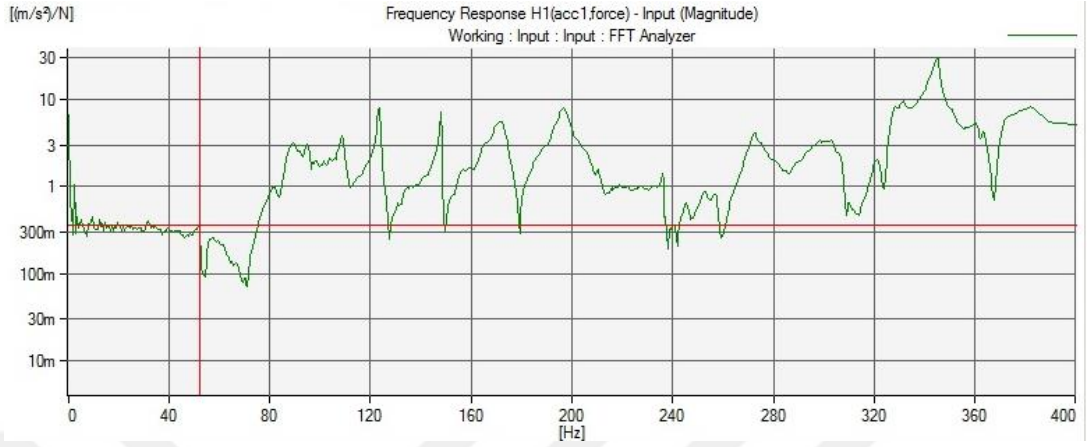


Şekil 4.5 : (1) numaralı parça olan kapakta çekiç testi yapılışı

Test yapılırken Brüel&Kjaer yazılımı PULSE kullanılmıştır, 4391 tipi ivmeölçer ve 8206 tipi çekiç donanımları da yine Brüel Kjaer'e aittir. Test sırasında sadece öteleme yönünde titreşim yaratmak için çekiçle vurulan ve ölçümün alındığı ivmeölçerin konumunun kapak yapısının kütle merkezinden geçen çigi üzerinde olmasına dikkat edilmiştir.

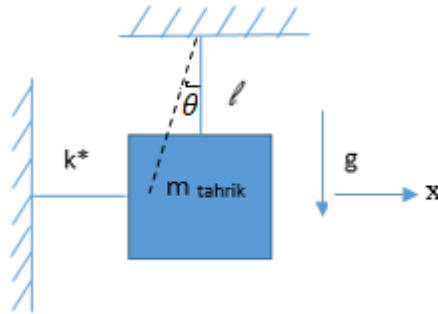
Elde edilen bu frekans cevabı verisine göre, kütlenin sabit kaldığı 1/m çizgisi yaklaşık 52Hz'e kadardır. Tahrik verilen yapının kütlesi 3,6 kg olduğundan söz konusu

frekansa kadar olan aralıktaki FTF'nin değeri de kapağın kütlesi ile uyumludur. Bu test düzeneğinde körüğün test edilebileceği en yüksek frekans Şekil 4.6.'da gösterildiği üzere belirlenmiştir.



Şekil 4.6 : (1) numaralı parçada FTF ölçümü

Bu düzenek tasarlandıktan sonra ortaya çıkan sistemin serbest cisim diyagramı Şekil 4.7'de görülmektedir:



Şekil 4.7 : Test düzeneği serbest cisim diyagramı

Küçük salınımlı harmonik titreşimler kabulü ile lineerleştirme yapılır ise $\sin\theta \approx \theta$ ve $\cos\theta \approx 1$ olmak üzere x yönündeki deplasmanda:

$$x = l\sin\theta \approx l\theta \quad (4.1)$$

Kabullerinden sonra harmonik kısımlar sadeleştirildiğinde:

olmak üzere,

$$J\ddot{\theta} + k^*l^2\theta + mgl\theta = 0 \quad (4.2)$$

denklemleri yazılır. Burada, l boyutu diğer boyutlara göre oldukça büyük olduğundan tahrik grubu için, $J = ml^2$ yaklaşımı kullanılabilir. Kütle 3,6 kg ve l boyu 0,285 m'dir. Doğal frekans hesabı yapılırsa;

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{l} + \frac{k^*}{m}} \quad (4.3)$$

eşitliği elde edilir. Bu denklem kullanılan ipin uzunluğunun doğal frekansa etkisinin de belirlenmesini sağlayacaktır. Eşitlikteki g/l terimi k^*/m terimine göre çok küçükse, ipin etkisi ihmal edilebilir kabul edilecektir. Burada g/l terimi 34,4 iken k^*/m terimi yaklaşık olarak 1860 değerindedir, yani g/l değeri ihmal edilebilir sonucuna varılmıştır.

4.1.2 Test Düzenneği Simülasyonu ve Sonlu Elemanlar Analizleri

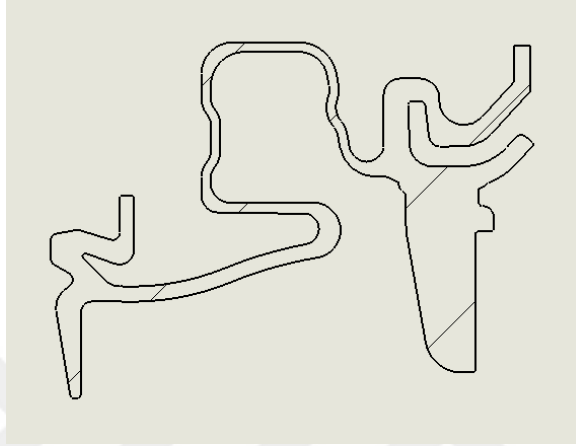
Test düzenneği fiziki olarak ortaya konulduktan sonra sonlu elemanlar ile test düzenneğinin modeli kurulmuştur. Modelin kurularak dinamik analizleri yapılması ve fiziksel test sonuçları ile karşılaştırılması, sayısal modelin doğrulanması doğrulanması amaçlanmıştır.

Şekil 4.8.'de görülen Körük2'nin katı modeli incelenerek sonlu elemanlar modelinde kullanılacak eleman tipi ve modelleme tipine karar verilmiştir. Körüğün katı modeli incelendiğinde körüğün hem dairesel hem de büyük oranda simetrik bir yapıya sahip olması modellemeyi kolaylaştırmaktadır. Değişen kalınlıktaki kesitlere sahip körük için orta kabuk yüzeyi oluşturularak, kabuk elemanların kullanılması sağlanmış sonlu elemanlar modeli kurulmuştur.



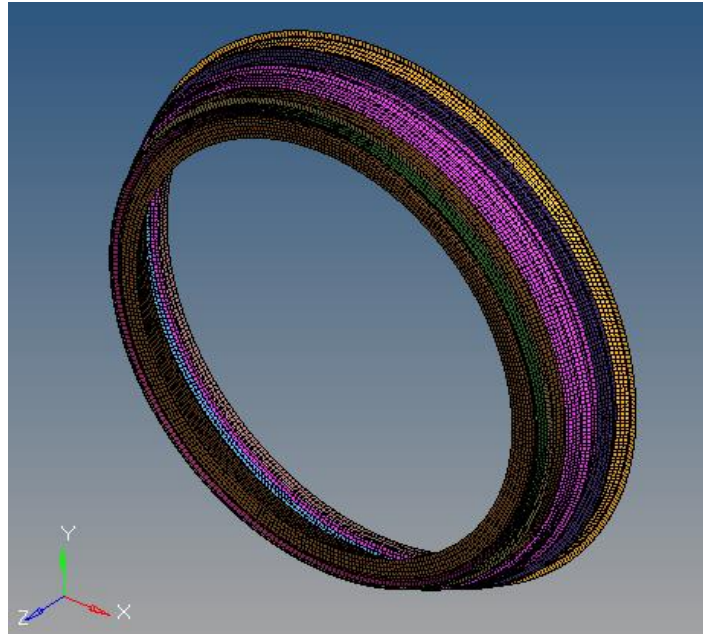
Şekil 4.8 : Körük2 Katı Modeli

Körüğün şekil 4.9.'da görüldüğü üzere katı model üzerinden kesit alınarak 2 boyutlu orta yüzeyi SolidWorks programı kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra ağ(mesh) modeli kurulmak üzere Hypermesh ortamına dosya aktarılmıştır. Ağ eleman boyutu olarak 3 mm seçilmiştir. Kabuk ağ eleman tipi olan quad4, 2 boyutlu bir elemandır. Katı modelde oluşturulan kesit üzerinden kalınlıklar ölçülerek Hypermesh ortamında kabuk model için kalınlık bilgileri oluşturulmuştur.



Şekil 4.9 : Körük2 kesit görünümü

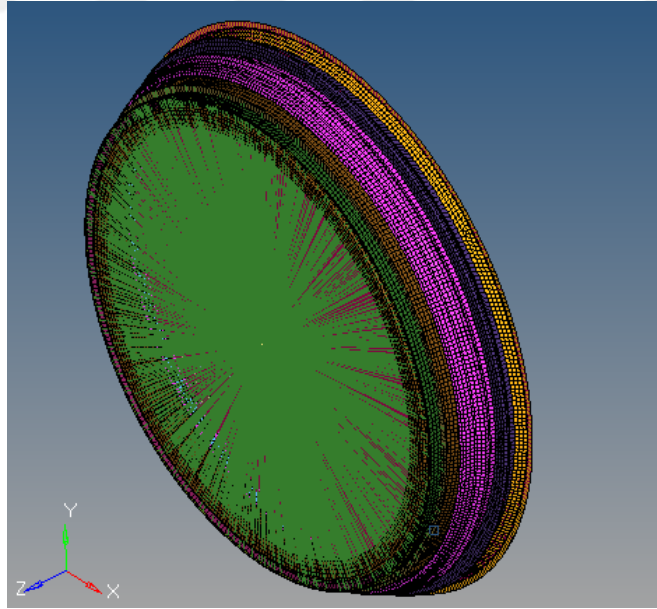
3 mm ile oluşturulan ağ model, Şekil 4.10.'da görüldüğü gibidir. Hypermesh yazılımında kabuk modellere atanan özellik PSHELL kartı ile modelin kalınlık bilgileri girilmiş olup her kalınlık değişimi olan bölge için ayrı bir kart tanımlanmıştır. Şekil 4.10.'da görülen her bir renk kalınlık farklılıklarını göstermektedir.



Şekil 4.10 : Körük2 ağ(mesh) modeli

Test ortamında ki sınır koşullarını sağlamak adına şekil xx.5'te görüldüğü gibi körüğün makina üzerinde temas ettiği noktalar RBE2(Rigid-Body) rijit elemanı kullanılarak sabitlenmiştir. RBE2 elemanında merkez noktası SPC(single point constraint) adlı sınır koşulu tanımlanarak 6 yönde serbestliği kısıtlanmıştır. Böylece körük bir yüzeyde sabitlenmiş olup diğer yüzeyde serbest fakat, Şekil 4.2.(b)'deki (1) numaralı komponentin asılı koşulu olması sağlanmıştır.

Test ortamında körüğün yerleştirildiği kapak ise CONM2(Concentrated Mass Element Connection) elemanı ile 1 boyutlu kütle elemanı olarak Şekil 4.10.'da görüldüğü üzere modellenmiştir. Bu kütle ise kapağın temas ettiği yüzeylere RBE3 rijit elemanı ile bağlanmıştır. Modelin son adım olarak, körük malzemesi MATT1 kartı ile lineer izotropik malzeme olarak tanımlanmıştır. EPDM malzeme değerleri Oberst testi ve dinamik mekanik analiz sonuçları dikkate alınarak belirlenmiştir. EPDM malzeme değerleri olarak 8 MPa elastiklik modülü, 0,45 Poisson oranı, 1230 kg/m³ yoğunluk, 0,10 yapısal sönüm değerleri atanmıştır. Model kurulduktan sonra modal analiz ve frekans cevabı analizi yapılmıştır. Şekil 4.10'da gösterimi verilen dinamik kuvvet kapağın asılı olduğu yani CONM2 elemanı ve RBE3 elemanının merkezinden olmak üzere uygulanmıştır.

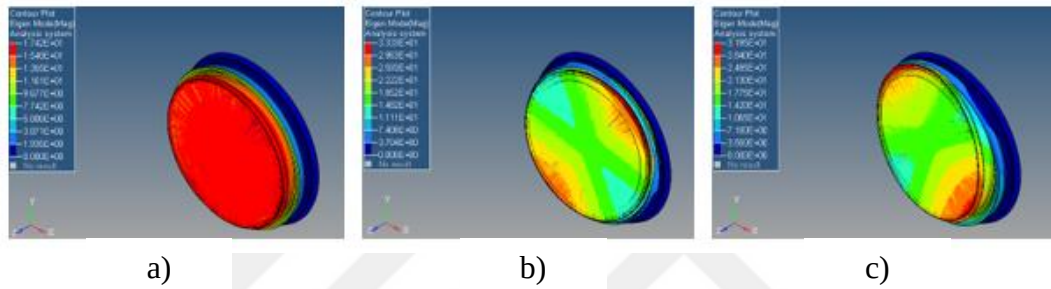


Şekil 4.11 : CONM2 kütle elemanının ve modelin gösterimi

Yine frekans cevabı bu noktadan ölçülmüş olup noktasal frekans cevabı fonksiyonu(FTF) elde edilmiştir. Analiz 0,25 Hz çözünürlük ile 200 Hz'e kadar

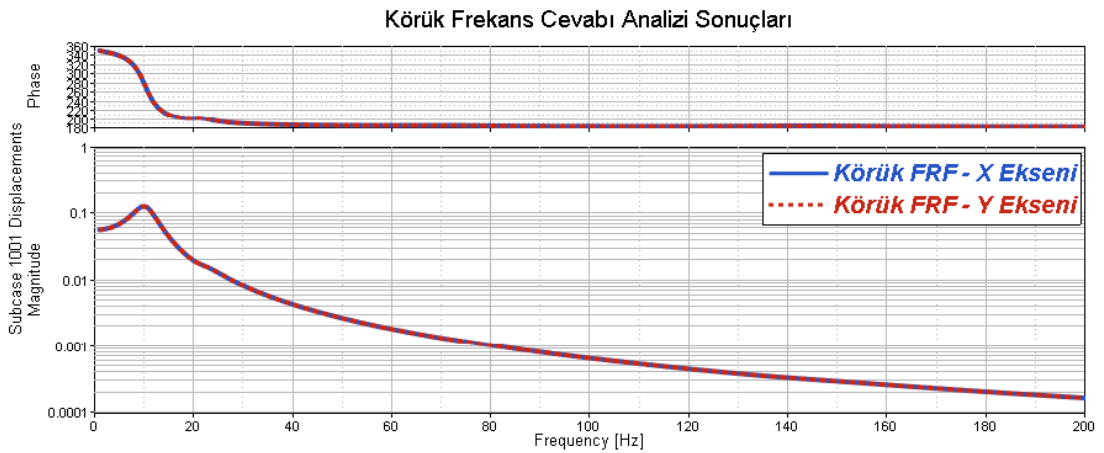
yapılmıştır. Modal analiz ile de 200 Hz'e kadar yapının mod şekilleri ve doğal frekanslar elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde ilk 3 moddan 2 si beklendiği üzere simetrik modlardır. İlk mod ise beklendiği üzere eksenel mod şekli olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 4.12.'de ilk 3 mod şekli verilmiştir. Analiz sonucunda X ve Y eksenlerinde ölçüm alındığı için z yönündeki mod şekli ihmal edilecektir. Çıkan sonuçlarda görülen ise yapının simetrikliği X ve Y yönündeki modların aynı çıkmasına sebep olmuştur. Z yönünde bulunan ilk mod şekil 4.12.(a)'da görüldüğü üzere 4.5 Hz, 2. ve 3. modlar ise Şekil 4.12.(b) ve Şekil 4.12.(c)'de görüldüğü üzere 10 Hz'e denk gelmektedir.



Şekil 4.12 : (a) z yönü ilk modu 4,5 Hz (b) x yönü ilk modu 10 Hz (c) y yönü ilk modu 10 Hz gösterimleri

Modal analiz sonrası yapılan frekans cevabı analizlerinde ise X ve Y yönündeki dinamik direngenliğin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için ise 10 Hz'teki doğal frekansa karşılık gelen dinamik direngenlik hesaplanacaktır. Şekil 4.13.'te görüldüğü üzere frekans cevabı analizi sonuçları yer almaktadır. X ile Y eksenlerindeki cevapları aynıdır. Bu sonuç beklenildiği gibidir ve grafikte ilk tepe X yönündeki ve Y yönündeki ilk doğal frekansa karşılık gelmektedir.

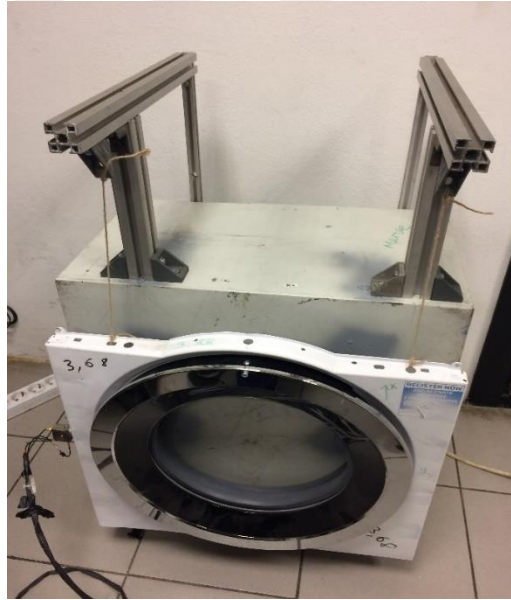


Şekil 4.13 : Köruk2 için Frekans cevabı analiz sonuçları

Analizde kullanılan değerlerden özellikle sönüm ve dinamik elastiklik modülü değerleri Oberst Testi ve DMA’ dan elde edilen sonuçlar denenerek testle uygun aralıkta olacak şekilde seçilmiştir. Bu şekilde sonlu elemanlar modelinde eğer lineer kabulü yapılırsa kullanılması gereken sönüm ve elastiklik modülü değerleri de belirlenmiştir. Aşağıdaki bölümde, körüğün dinamik özelliklerinin test düzeneğinden elde edilen veriler kullanılarak nasıl belirlendiği açıklanmıştır.

4.2 Test Düzeneği Ölçümleri

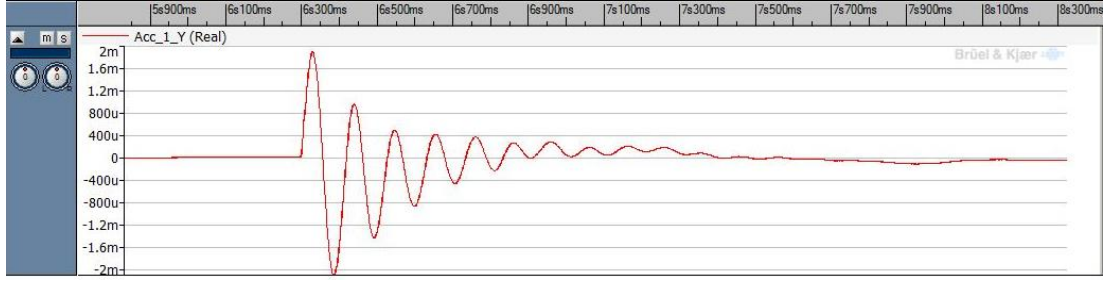
Bu bölümde körüğün direngenlik ve sönüm özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Logaritmik azalma yöntemi ile sistemin sönüm oranı belirlenmiştir. Şekil 4.14.’te yapılan testte tahrik verilen kapak yapısına titreşim sensörünün ölçüm yönünde vurulmuş x ve y yönlerinde sönüm özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Testin bu bölümünden itibaren ölçüm yapılan körük Körük2’dir, Körük1 geometrik kısıtlar nedeniyle incelenmemiştir. Bunun yanında ürünlerde Körük2 hamuru ve geometrisi daha yaygındır. Bu testlerden elde edilen sonuçların kullanılması ile çoklu cisim modeline körüğün dahil edilebilmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 4.14 : Körük2 düzeneğinde ölçüm gösterimi

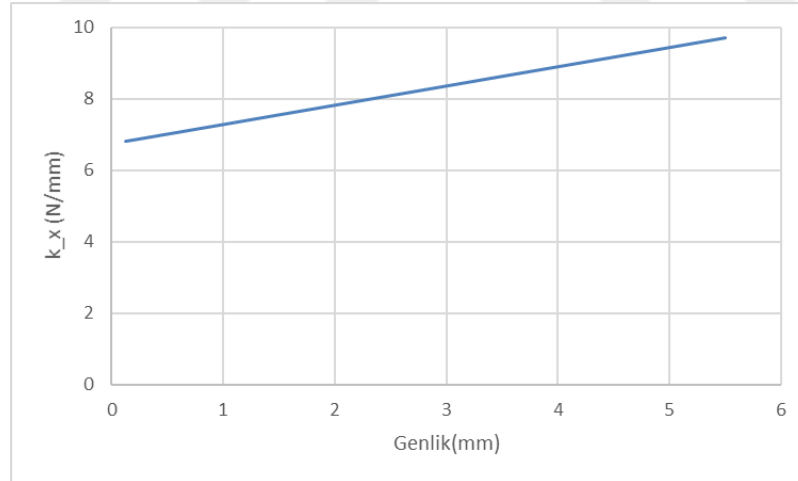
x ve y yönlerindeki testler, sistemde tahrik yönünü değiştirmek yerine körüğün 90° çevrilerek test edilmesi yaklaşımı ile yapılmıştır. Testte Brüel&Kjaer yazılımı

PULSE, deplasman sensörü olarak da Brüel&Kjaer 4391 kullanılmıştır. Çıkan eğrilerden y yönünde örnek olarak Şekil 4.15.'te verilmiştir:

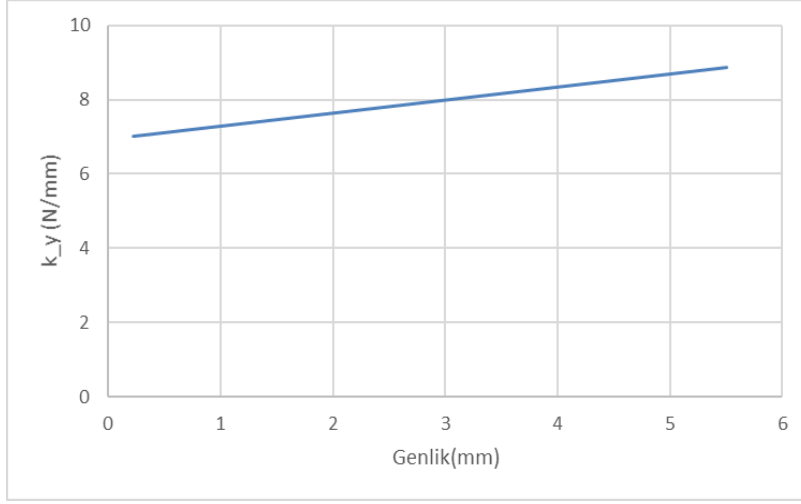


Şekil 4.15 : PULSE yazılımından elde edilen zamana bağlı genlik örneği

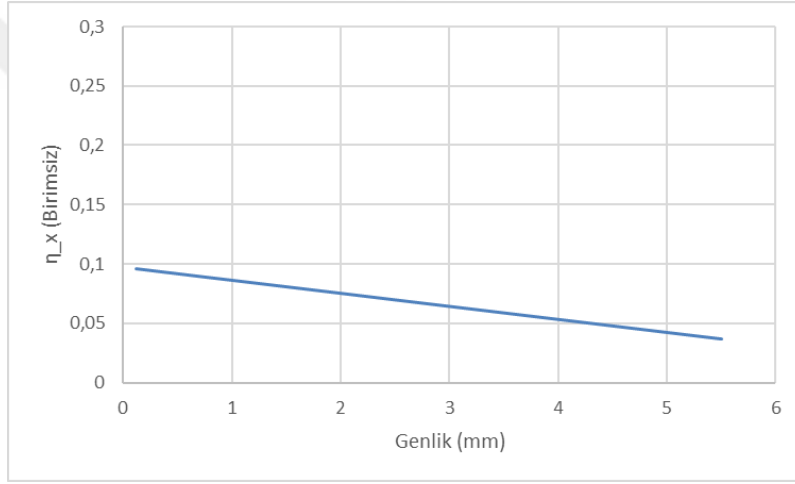
Burada geçici rejimdeki bir ölçümün sönüm karakteristiğinin belirlenmesi için logaritmik azalma(logarithmic decrement) yöntemi kullanılarak, x ve y yönünde sönümle ilgili değerler belirlenmiştir. Maksimum pozitif veya minimum negatif tepe genlik verileri toplanmış, logaritmik azalma teorisine göre hesaplamalar yapılmıştır. Tekrarlı testlerden ilk doğal frekans yaklaşık 9 Hz olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan diğer verilere göre grafikler elde edilmiştir. Şekil 4.16.'da x yönü için Şekil 4.17.'de y yönü için genlik-direngeçenlik eğrileri verilmiştir; Şekil 4.18.'de x yönü ve Şekil 4.19.'da y yönü genlik-sönüm grafikleri, tekrarlı yapılan testler sonucu edilmiştir.



Şekil 4.16 : X yönü direngeçenlik eğrisi



Şekil 4.17 : Y yönü direngenlik eğrisi



Şekil 4.18 : X yönü kayıp faktörü eğrisi



Şekil 4.19 : Y yönü kayıp faktörü eğrisi

Test sonuçlarından elde edilen noktalara ait lineer eğriler uydurularak elde edilen grafikler verilmiştir. Logaritmik azalma yöntemi kullanılması dikkat edilen en

önemli husus kapağın ilgilenilen frekans aralığında rijit davranması, böylece sönüm verisinin direkt olarak körüğe ait olmasının garanti edilmesidir. Direngenlik hesapları doğal frekans ve kapak kütlesi kullanılarak belirlenmiştir.

Körük test düzeneğinden elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirilmiş ve körük için çoklu cisim modeline tanımlamak üzere direngenlik ve sönüm özelliklerinin üzerine aralıkları belirlenmiştir. Test verilerinden bir eğrinin uydurulması ile direngenlik değerleri elde edildiğinden, bunların modele konulduğunda belirli bir bantta doğrulama adına irdelenmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile yapılan malzeme testlerinin ve logaritmik azalma yöntemi ile elde edilen sonuçların güvenilirliği kontrol edilmiştir. Belirlenen değerlerin makina dinamiğine etkisi belirlenirken kullanılacak aralığının doğruluğu saptanmıştır. Lineer olmayan yapıdaki bir körüğü lineer kabulü yaparak yüksek hassasiyette, doğru bir biçimde modellemek mümkün olmamakla birlikte, deneysel olarak belirlenmiş parametrelerin kullanılması kabul edilebilir sonuçlar üretebilmektedir.



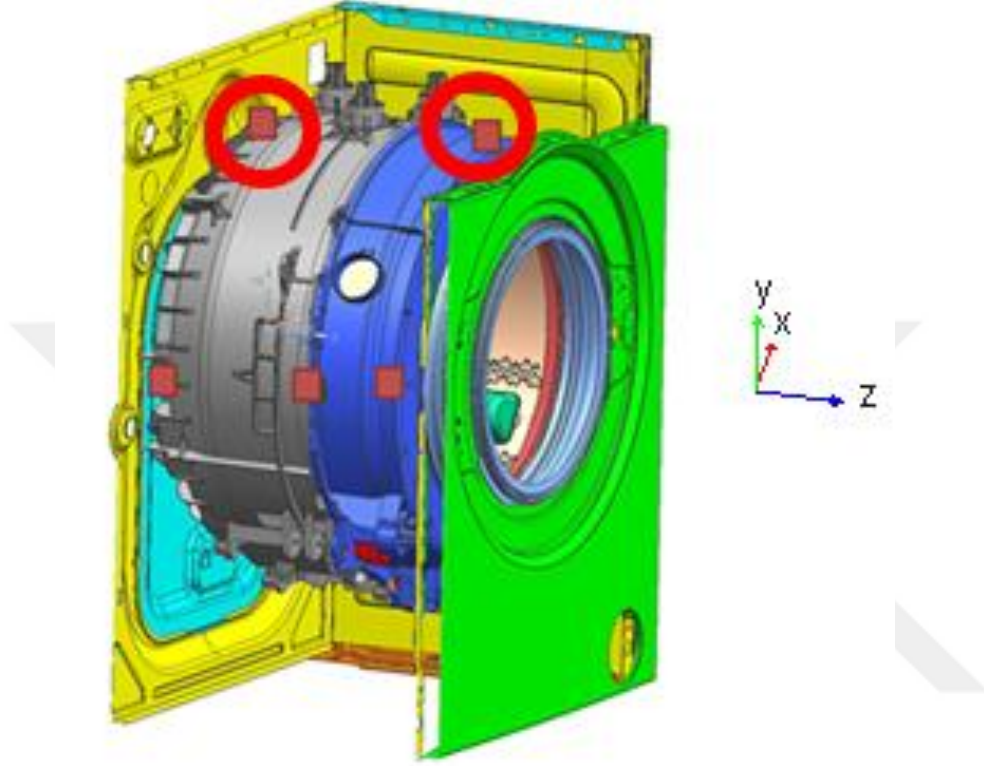
5. KÖRÜĞÜN ÇAMAŞIR MAKİNESİ DİNAMİĞİNE ETKİLERİ

Bu bölümde körüğün, çamaşır makinesinin tahrik grubu dinamiğine etkileri incelenmiştir. Körüğün sisteme etkisinin nasıl olduğunu belirlemek amacıyla, titreşim testi ve çoklu cisim dinamiği modeli kurmak, burada temel olarak yapılan ve sunulan çalışmalardır. Çoklu cisim dinamiği modelini doğrulama amaçlı yapılan test sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır. Tahrik grubu deplasmanlarına körüğün etkisinin belirlenmesi adına, ölçümlerde körüklü ve körüksüz durum incelenmiştir. Testler, analizlerin doğrulanması ve hata oranlarının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Çamaşır makinesinin çoklu cisim dinamiği modeli MSC Adams programında kurulmuş ve çözdürülmüştür. Belirlenen noktalarda hem dinamik modelden titreşim genlikleri tahmin edilmiş, hem de test verileri yine aynı noktalardan ölçülmüştür. Burada, dinamik modele körüğün dinamik özelliklerini dahil edebilmek ve tahrik grubunda oluşan titreşim genliklerini güvenilir bir model oluşturarak, analiz yolu ile belirleyebilmek amaçlanmıştır. İlgilenilen frekans aralığı rezonans bölgesi ve sonrasındaki düzenli rejimdeki(sıkma devrindeki) deplasmanlardır. Makinanın sıkmaya kalkış aşamasındaki motor profili hız değerleri için kullanılmıştır. Burada yapılan çalışmada, Körük2 'nin kullanıldığı, üretim adeti en yüksek makinelerden birinin tahrik grubu modellenmiştir.

5.1 Körüklü ve Körüksüz Titreşim Ölçümleri

Belirlenen körüğün(Körük2) kullanıldığı makine titreşim için deplasman ölçüm noktaları belirlenmiştir. Titreşim ölçümü yapılan bu noktalara karşılık gelen serbestlik derecelerindeki titreşimler, MSC Adams modeli kullanılarak da tahmin edilmiştir. Testlerde ve analizlerde körüklü ve körüksüz durumda Şekil 5.1.'de kırmızı çerçeveye alınmış noktalardan, kazan grubu üzerinden alınmıştır. Bu noktalar maksimum deplasmanların beklendiği ve makinanın gövdeye çarpma riskinin irdelenmesi için önemli olan noktalardır. Deplasmanlar x(makinanın yatay eksen) ve y(makinanın dikey eksen) yönlerinde ölçülmüştür. Çamaşır makinesi z yönünde genellikle daha düşük deplasmanlar sergilemektedir. Test verileri analizleri doğrulama ve korelasyon

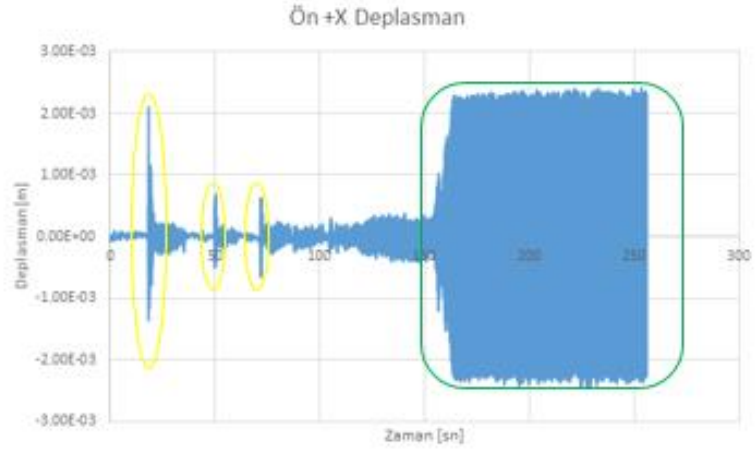
kurma amaçlı kullanılacaktır. Testte ve analiz koşullarında tambur orta noktasına 350 g dengesiz yük yerleştirilmiştir. Burada sunulan titreşim testlerinde, logaritmik azalma testinde kullanılan ölçüm sistemleri kullanılmıştır. Bu sistemden elde edilen ivme verileri yazılım(PULSE) aracılığı ile deplasmana dönüştürülmüştür.



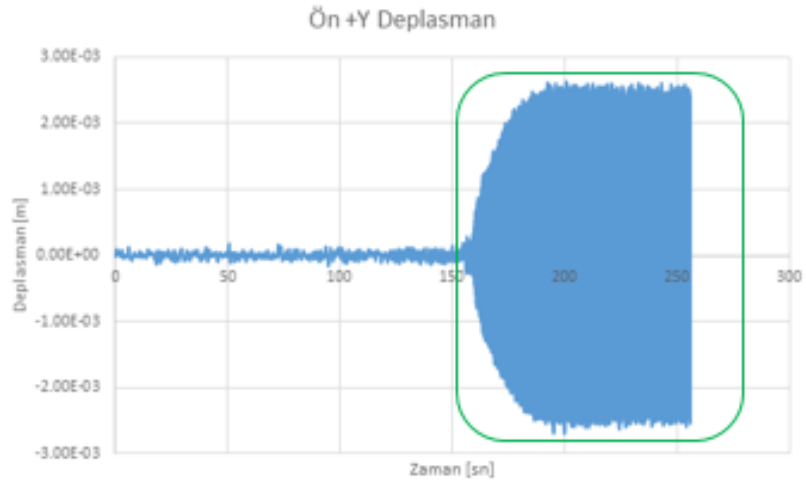
Şekil 5.1 : Çamaşır makinesi CAD modeli üzerinden ölçüm noktalarının gösterimi

5.1.1 Körüksüz Titreşim Ölçümleri

Bu bölümde makinanın körüğü sökülerek deplasman ölçüm testi yapılmıştır. Başlangıçta kurulan MSC Adams modelinin, körüksüz durumda yapılan testler için doğrulanması amaçlı, öncelikli olarak tahrik grubunda belirlenen noktalardan deplasman ölçümleri alınmıştır. Sırasıyla Şekil 5.2., Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'te görüldüğü üzere, deplasmanları x yönünde kalkış algoritmasındaki ivmelenmelerde(sarı daire bölgeleri), y deplasmanları sıkma devrinde(yeşil kutu içindeki bölgeler) ve z deplasmanları ise düşük ama z yönündeki rezonans geçişinde(kırmızı daire bölgesi) yüksek değerlerdedir. Bu durum makinanın test esnasındaki davranışı gözlemlendiğinde beklenen bir durumdur.



Şekil 5.2 : Körüksüz kazan ön x zamana bağlı deplasman verisi



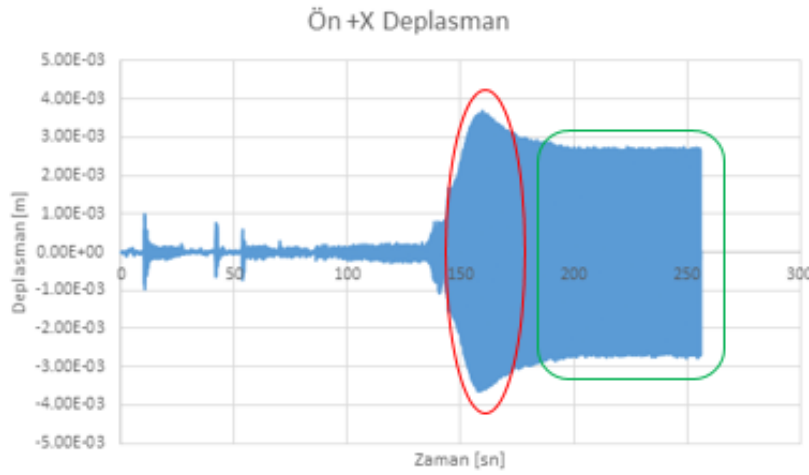
Şekil 5.3 : Körüksüz kazan ön y zamana bağlı deplasman verisi



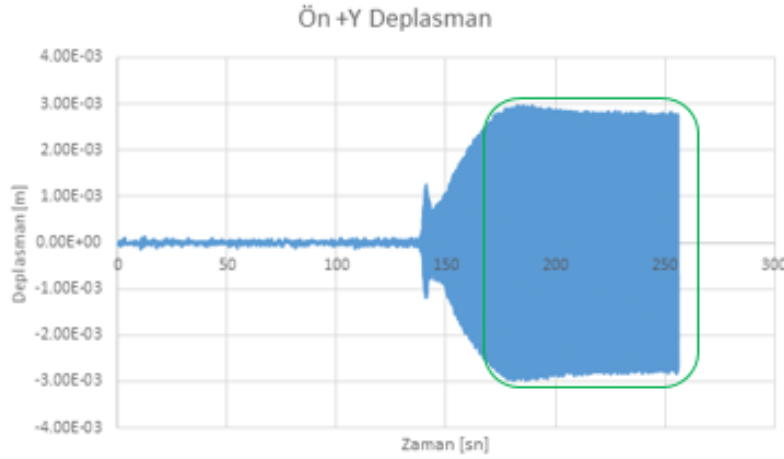
Şekil 5.4 : Körüksüz kazan ön z zamana bağlı deplasman verisi

5.1.2 Körüklü Titreşim Ölçümleri

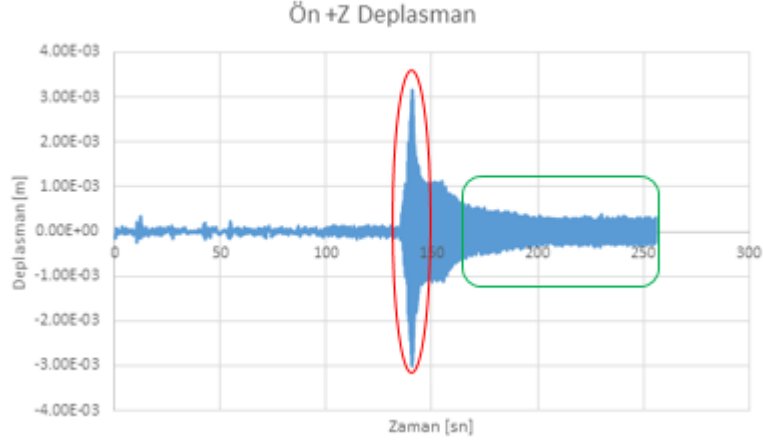
Bu aşamada, körüğü sökülen makineye körük tekrar takılarak test yapılmış ve veriler toplanmıştır. Deplasman ölçümleri önceden belirtilen noktalardan alınmıştır. Şekil 5.5., Şekil 5.6. ve Şekil 5.7.'de sırasıyla x, y ve z yönündeki veriler incelendiğinde, x yönünde rezonans ve ivmelenme durumunda deplasmanlar artmış, y yönünde sıkma kalkışında yine maksimum deplasmanlar oluşmuş, z yönünde ise körüksüz duruma benzer olarak bir tepe yapmış ve bunun dışında düşük deplasmanlar görülmüştür.



Şekil 5.5 : Körüklü kazan ön x yönü zamana bağlı deplasman verisi



Şekil 5.6 : Körüklü kazan ön y yönü zamana bağlı deplasman verisi



Şekil 5.7 : Körüklü kazan ön z yönü zamana bağlı deplasman verisi

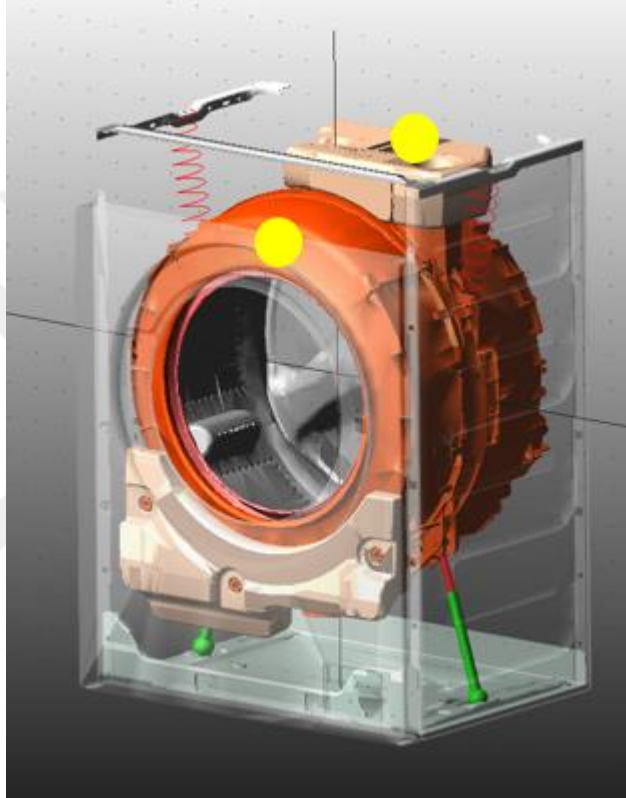
Körüklü ve körüksüz ölçüm sonuçlarına göre, körük makinaya takıldıktan sonra tahrik grubu rezonans ve sıkma durumlarının ikisinde de daha fazla deplasman yapmıştır. Yani körüğün takılması, makinanın deplasmanlarını olumsuz yönde etkilemiştir ki bu körüğün sıkma evresinde ilave direngenlik yaratması nedeni ile beklenen bir durumdur. Buna karşın x deplasmanlarındaki kalkış ivmelenmelerindeki değerler düşüş göstermektedir ki bu frekanslarda(düşük devirlerde), körüğün sönüm özelliğinin etkendir.

5.2 MSC ADAMS ile Körüksüz ve Körüklü Tahrik Grubu Titreşimlerinin Belirlenmesi

Önceden belirtildiği üzere, güvenilir bir çamaşır makinesi çoklu cisim modelinin kurulması çalışması bu bölümde detaylandırılmıştır. Makinanın titreşimlerinin tahmin edilmesi ve istenilen farklı noktalardan çıktı alınması MSC Adams programı ile mümkündür. Çoklu cisim modelinde çamaşır makinesi tahrik grubu elemanları; tambur, kazan, tambur kanatları, flanş, mil, burç, keçe, rulmanlar, rulman yuvası, kasnak, denge kütleleri, yay ve amortisörlerle gövdeye bağlanmıştır. Gövde ise yere sabitlenmiştir. Tahrik grubunun modellenmesi rijit parçalar kabulü ile yapılmıştır. Yaylar çeki ve amortisörler kuru sürtünmeli olarak modele dahil edilmiştir. Geometrisi belirlenen parçaların malzeme bilgileri tanımlanmış, atalet değerlerini ise program kendi hesaplamıştır. Motor adımları, mile tanımlanan dönen bağlantı tipine(revolute joint) hareketi tanımlanmasıyla yapılmıştır. Gövde ile tahrik grubu arasında diğer bir bağlantı eleman ise körüktür. Körük, analizlerde ‘yay-sönüm’ elemanı olarak modellenmiş ve bu elemana direngenlik(k) ve sönüm(c) değerleri, önceki bölümlerde

elde edilen değerler esas alınarak tanımlanmıştır. Körüklü ve körüksüz analiz koşullarında dengesiz yük miktarının, test ile uyumlu olarak, 350 gram ve tambur orta noktasında olduğu kabul edilmiştir.

Şekil 5.8.'de sarı ile gösterilen noktalar MSC Adams modelinin test ile uyumlu ölüm noktalarıdır. Bu noktalara lokal koordinat sistemi(Marker) eklenerek deplasman verileri toplanmıştır. Bu model, makinanın istenilen baŗka noktalarından da tahmin edilen sonuçların elde edilmesine izin vermektedir.



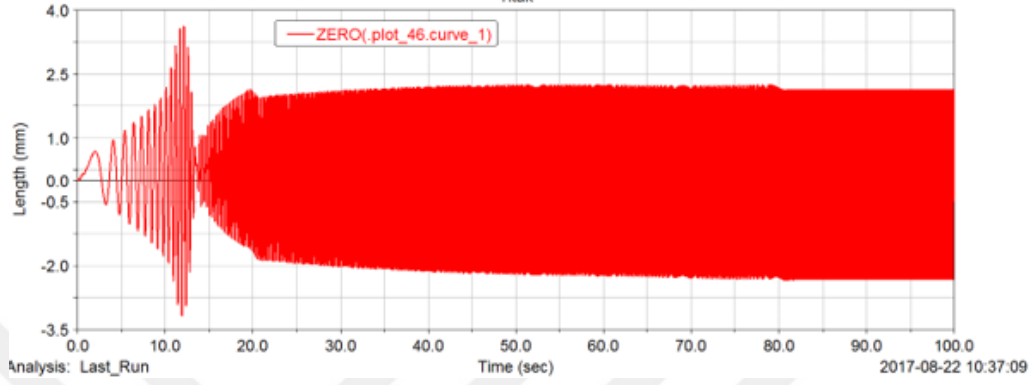
Şekil 5.8 : MSC Adams modelinde ölüm noktalarının gösterimi

5.2.1 MSC ADAMS ile Körüksüz Titreŗim Sonuçları

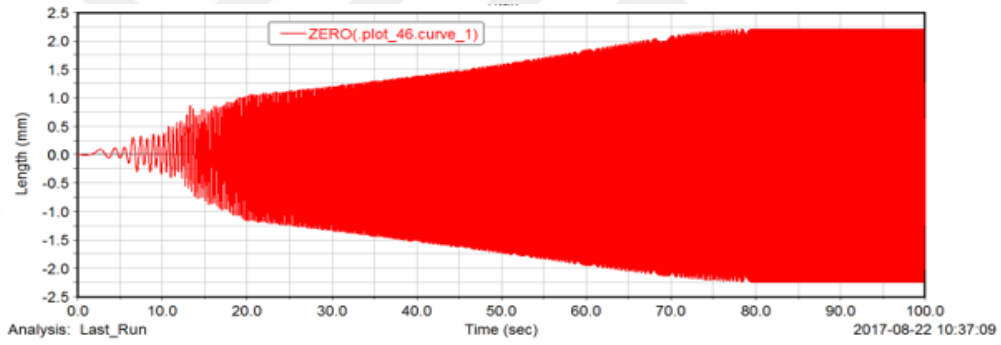
Adams modeline körük dıŗında modelde bulunan tüm elemanlar eklenmiŗ ve analiz yapılmıştır. Test verisi ile karŗılaŗtırılması gereken kısım son sıkma kalkışıdır(Testteki ~130. saniye sonrasına denk gelen süre). Bunun sebebi rezonans davranıŗının sıkma kalkıŗı öncesi görülmesi ve ayrıca sıkmada yüksek deplasmanların tayinidir. Testlerde  l m yapılan aynı noktalardan deplasmanlar toplanmıştır.

Şekil 5.9.'da körüksüz  n noktadan x deplasmanları elde edilmiŗ, rezonans ve sıkma devrinin deplasmanları görülmektedir. Bu Adams verisi test verisi ile sıkma evresinde uyuŗmakta, ancak rezonans sadece Adams sonuçlarında görülmektedir. Bunun nedeni

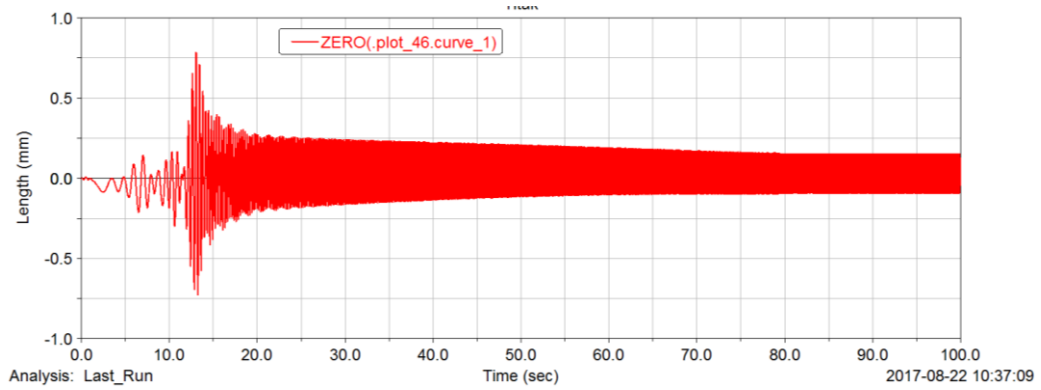
sistemde gerçeğe uygun bir sönüm oranının bulunmamasıdır. Şekil 5.10.'da körüksüz ön noktadan y deplasmanları elde edilmiş, rezonans davranışı hem test hem Adams' ta görülmemiş; sıkma deplasmanları test ve Adams' ta oldukça yakındır. Şekil 5.11'de görülen körüksüz z deplasmanları sıkma devrinde yakinken, rezonanstaki farklılıklar görülmektedir ki bu da bu yöndeki rijit elemanların gerçekteki sönüm etkisidir.



Şekil 5.9 : Körüksüz Adams ön x yönü deplasman verileri



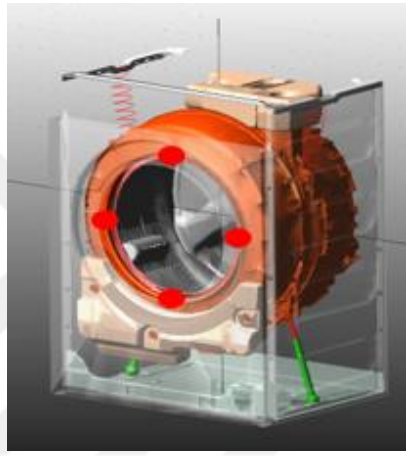
Şekil 5.10 : Körüksüz Adams ön y yönü deplasman verileri



Şekil 5.11 : Körüksüz Adams ön z yönü deplasman verileri

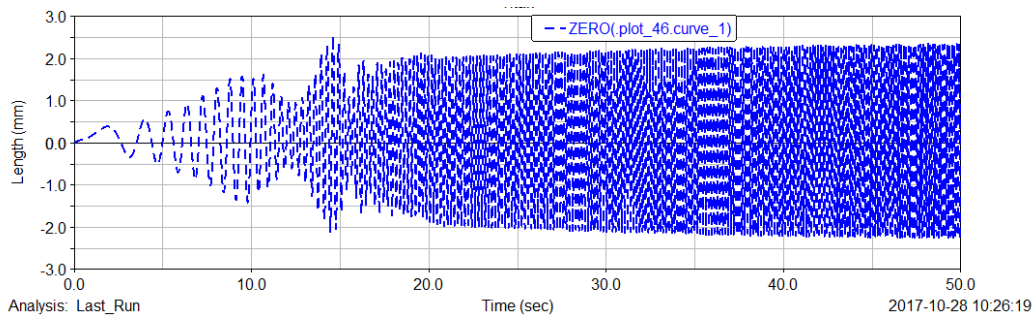
5.2.2 MSC ADAMS ile Körüklü Deplasman Sonuçları

Logaritmik azalma yöntemi ile hesaplanan sönüm oranı değeri viskoz sönüm katsayısına dönüştürülerek, direngenlik verileri ile beraber MSC Adams programına körüğün modellenecek olan özellikleri olarak tanımlanmıştır. Körük, modele geometrik olarak değil; x ve y yönlerinde çalışan(önceki bölümlerdeki koordinat eksenini geçerlidir) bir yay-sönüm elemanı olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.12’de kırmızı ile gösterilen bölgelerde körük, yay ve sönüm elemanları olarak 4 elemana(kazan kapağı çevresinde 90 derece açı ile) bölünmüştür. Gerekli veriler modele eklendikten sonra; analiz koşturulmuştur.

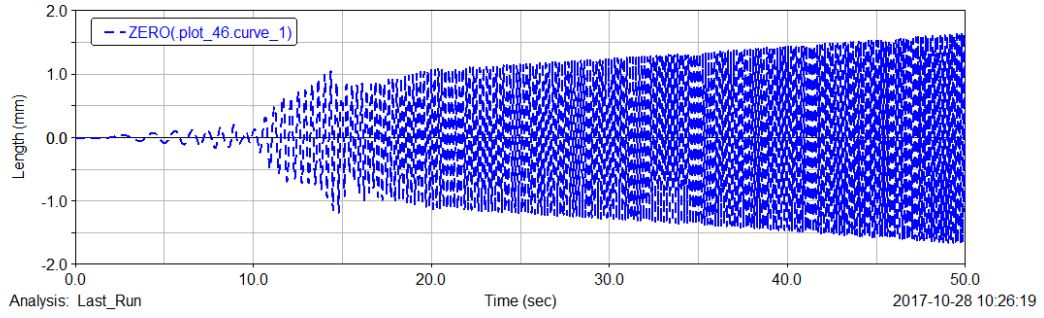


Şekil 5.12 : Adams’ta körük tanımlaması için belirlenen yay-sönüm noktaları

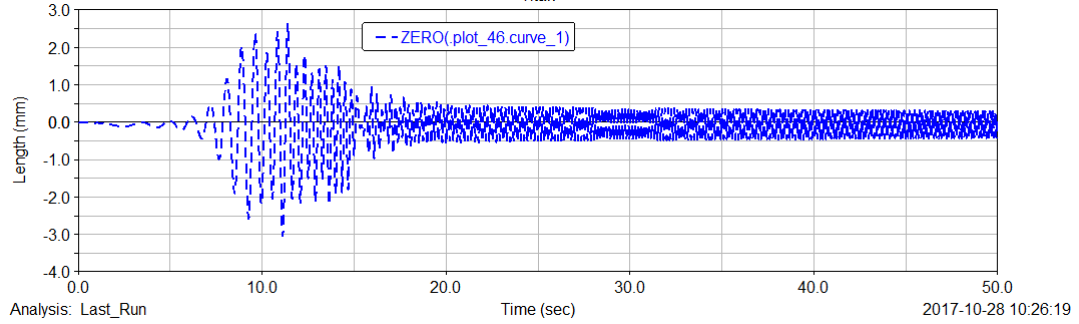
Şekil 5.13.’te Adams programından toplanan kazan ön deplasmanları x yönünde sıkma ve rezonans davranışları ; Şekil 5.14.’te y yönünde sıkma kalkışı ve sıkma , Şekil 5.15.’te z yönünde ise rezonans ve sıkma evreleri görülmektedir. Bu modelde elde edilen veriler test verileri ile bir sonraki bölümde karşılaştırılmıştır. Buna göre körük ile ilgili logaritmik azalma ile elde edilen verilerin güvenilirliği de değerlendirilmiştir.



Şekil 5.13 : Adams körüklü kazan ön x yönünde deplasman verileri



Şekil 5.14 : Adams körüklü kazan ön y yönünde deplasman verileri



Şekil 5.15 : Adams körüklü kazan ön z yönünde deplasman verileri

5.3 MSC Adams ve Test Verilerinin Analizi

Körüklü ve körüksüz deplasman sonuçları önce test, daha sonra MSC Adams programında değerlendirilmiştir. Buna göre elde edilen özet veri Çizelge 5.1’de sunulmuştur:

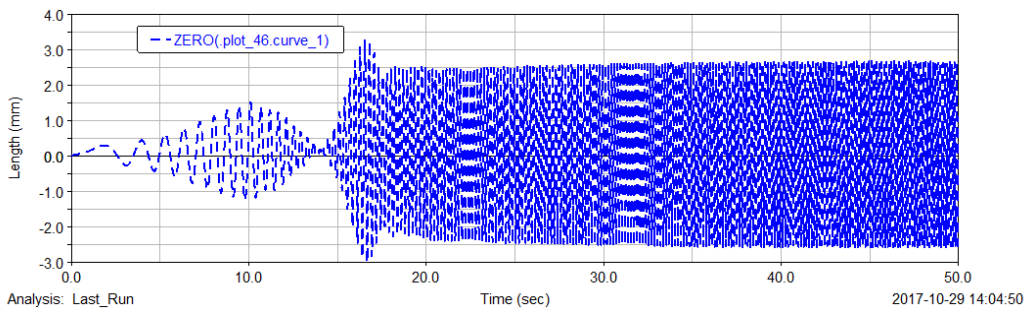
Çizelge 5.1 : Körüklü ve körüksüz test ve Adams sonuçları

Test- Körüksüz	Deplasman(mm)		Adams- Körüksüz	Deplasman(mm)	
	Rezonans	Sıkma		Rezonans	Sıkma
Ön	x	-	Ön	x	3,6
	y	-		y	-
	z	1,4		z	0,8
Arka	x	-	Arka	x	3,1
	y	-		y	-
	z	1,4		z	1,2
Test- Körüklü	Deplasman(mm)		Adams- Körüklü	Deplasman(mm)	
	Rezonans	Sıkma		Rezonans	Sıkma
Ön	x	3,8	Ön	x	2,6
	y	-		y	-
	z	3,1		z	2,6
Arka	x	2,9	Arka	x	3,6
	y	-		y	-
	z	3,9		z	3,3

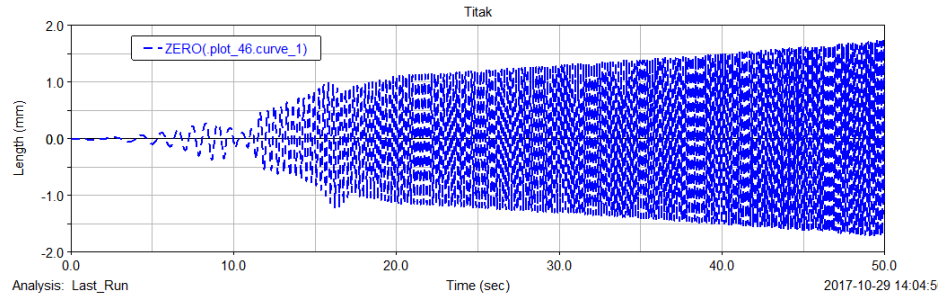
Çizelge 5.1’de verilen karşılaştırma sonuçları ile amaçlanan korelasyon ve iyileştirme çalışmaları için bir zemin hazırlanmıştır. Çizelge verilerinde ilk olarak körüksüz deplasmanlar değerlendirilse; sıkma adımındaki deplasmanların korelasyonunun oldukça iyi olduğu görülmektedir. Rezonans durumunda körüksüz deplasmanlar değerlendirildiğinde ise bazı farklılıklar gözlemlenmektedir; rezonans davranışı Adams modelinde görülürken, test modelinde görülmemiştir. Burada sönüm parametresinin çok etken olduğu bilinmektedir(Model tamamen rijit).

Bunun yanında körüklü makinanın deplasmanları değerlendirilirse; programa verilen test sonucu elde edilen değerlerle ilgili bir korelasyon çalışması yapılması gerekliliği ortadadır. Korelasyon çalışması yapılırken belirli bir aralıkta direngenlik ve sönüm değerleri denemeleri yapılmıştır. x yönü rezonans değerleri ve y yönü sıkma adımları için tekrarlı çözümler yapılmıştır. Körük için z yönünde herhangi bir değer girilmemiştir, z yönünde körük oldukça esnektir. Dolayısıyla z yönünde elde edilen korelasyonu körükten bağımsız olarak değerlendirmek gerekir. Körüklü durum korelasyonunda denemeler, logaritmik azalma sonuçlarından elde edilen değerlerin %20 oranında pozitif ve negatif aralıkta modelde denenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

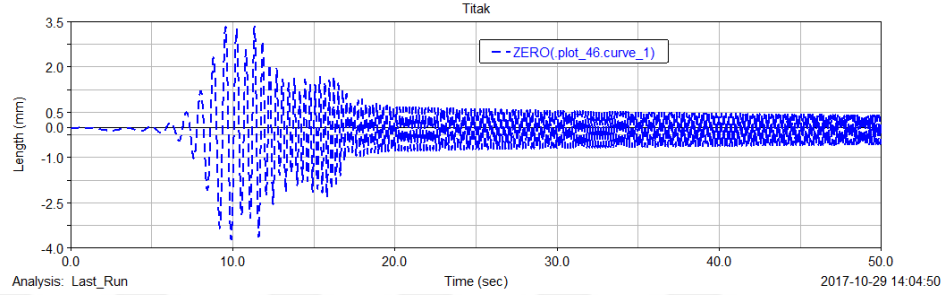
Şekil 5.16.’da x yönünde rezonansın ve sıkma adımının görüldüğü, başlangıçtaki körüklü test sonuçları ile oldukça korelasyonu yüksek bir sonuç yakalanmıştır. Şekil 5.17.’ de y yönündeki korelasyon çalışmaları sonucu görülürken; bu yöndeki sonuçlarda istenilen yakınsamaya ulaşılamamıştır. Şekil 5.18.’de verilen z yönü ise testlerden bağımsız değerlendirilmelidir.



Şekil 5.16 : Körüklü korelasyon yapılmış modelin x yönündeki deplasman sonuçları



Şekil 5.17 : Körüklü korelasyon yapılmış modelin y yönündeki deplasman sonuçları



Şekil 5.18 : Körüklü korelasyon yapılmış modelin z yönündeki deplasman sonuçları

Bunun dışında yapılan denemeler ‘optimum körük’ çalışması şeklinde gerçekleşmiş, fakat bunun sonucunda körüğün rezonans bölümünde beklendiği üzere yüksek sönümlü ve olabildiğince yumuşak bir körük olması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Ancak, olabildiğince esnek bir körüğün yüksek miktarda sönüm sağlaması beklenmez (körük üzerinde taşıdığı gerinim enerjisinin bir miktarını ısıya dönüştürebilir. Bu konuda, hamur tipi değişikliği, yani madde kaynaklı değişim, maliyetler gereği daha sonra düşünülmesi gerekirken; tasarımıla ilgili çalışmalar öncelikli değerlendirilmelidir.

Özet olarak hata oranı görülmesi açısından Tablo 5.2’de özetlenen değerlendirme yapılmıştır. Buna göre x yönündeki problem iterasyon aralıkları ile çözülsede (hata oranı ~%15), y yönünde hata oranı korunmuştur.

Çizelge 5.2 : Test ve Korelasyon yapılmış Adams modeli verileri

Test-Körüklü		Deplasman(mm)		Adams-Körüklü-İter.		Deplasman(mm)	
		Rezonans	Sıkma			Rezonans	Sıkma
Ön	x	3,8	2,8	Ön	x	3,3	2,7
	y	yok	2,9		y	yok	1,7
	z	3,1	0,5		z	3,3	0,5
Arka	x	2,9	2,3	Arka	x	4	2,4
	y	yok	2,5		y	yok	1,4
	z	3,9	0,6		z	4	0,6



6. GENEL DEĞERLENDİRME

6.1 Değerlendirme

Bu tez çalışmasında, çamaşır makinası tahrik grubunun bir bileşeni olan körüğün dinamik özelliklerinin belirlenmesi ve makinanın dinamiği etkisi üzerine araştırma yapılmıştır. Çalışmanın başlangıcında, bu konu ile ilgili gereksinimler belirlenmiş ve bu konuda kapsamlı bir literatür araştırması yapılmıştır. Literatür çalışması sonucunda, körük veya benzer viskoelastik malzemeler üzerine yapılan çalışmaların bulunduğunu, fakat bu çalışmaların amaçlanan tez çalışması yönünde eksik kaldığı görülmüştür. Bu nedenle, körük ve körük malzemesi üzerine teorik bilgiler derlenmiş, sistem modellenmesi üzerine teorik çalışmalar yapılmıştır. Test sistemleri hakkında bilgi toplanmış ve kullanılacak teorik veriler, test yöntemleri ve modelleme çalışmaları biçimlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında, ilk olarak malzeme özelliklerinin belirlenmesi adına statik bir test olan çekme testi standartlara uygun olarak yapılmış, daha sonra dinamik bir test yöntemi olarak, ASTM 756-05 standardında bulunan Oberst Testi ile çalışmalar yürütülmüştür. Bu test çalışmasında farklı iki türdeki körük numunesi test edilmiş; veriler ICATS programında işlenmiş, teorik hesaplamalar yapılmış, son olarak dinamik elastiklik modülü ve kayıp faktörü değerleri frekansa bağlı elde edilmiştir. Körük ile çubuk arasındaki yapışma problemi irdelenmiş, yapıştırıcının test sonuçlarına etkisi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çalışma sonucunda çift taraflı bant kullanılmasına karar verilmiş ve bu koşullarda körük malzemesinin özellikleri belirlenmiştir. Malzeme özelliklerini belirlemek, aynı zamanda da Oberst yöntemi ile karşılaştırma yapmak adına Dinamik Mekanik Analiz(DMA) yöntemi ile de iki körük numunesinin dinamik elastiklik modülü ve kayıp faktörü değerleri elde edilmiştir. Bu testlerden elde edilenler derlenerek, dinamik elastiklik modülü ve sönüm için bir aralık belirlenmiş; bu veriler kullanılarak sonlu elemanlar çalışmaları yapılmıştır.

Sonlu elemanlar çalışmasında körüğün modlarının tahmini için, planlanan test düzeneğini yansıtan bir modelleme ve analiz çalışması Hypermesh ve Optistruct

yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Bu modellemede kabuk elemanlar kullanılmış ve körük kesiti (makinanın kabul edilen x ve y yönlerinde) simetrik olduğu kabulü yapılarak modellenmiş ve FTF'ler elde edilmiştir. Daha sonra planlanan test düzeneği imal edilmiş ve test düzeneğinde körük ölçümüne etki etmemesi için tasarimsal iyileştirme çalışmaları(kaynak ve feder ekleme) yapılmıştır. Tasarlanan test düzeneğinin en büyük avantajı, tahrik verilen yapının hafif olması ve test düzeneğinin kolayca serbest titreşimler sergileyebilmesidir. Logaritmik azalma yöntemi ile körüğün özelliklerinin elde edilmesi adına zamana bağlı genlik eğrilerinin analizleri yapılmış ve genliğe bağlı dinamik direngenlik ve kayıp faktörü eğrileri elde edilmiştir. Bundan sonraki aşamada çamaşır makinesi modeli kurmak ve bu modele körüğü de dahil etme hedefli çalışmalar yapılmıştır.

Çamaşır makinesi modeli oluşturmadan önce bu modeli karşılaştıracak veri, çamaşır makinesi tahrik grubunun titreşim testi ile elde edilmiştir. Bu aşamada körüklü ve körüksüz durumda tahrik grubu üzerinde yapılan titreşim testlerinin etkileri değerlendirilse, en önemli husus sıkma devrinde körüğün ilave direngenlik yaratarak genlikleri arttırmasıdır. Çamaşır makinesinin modeli MSC Adams programında kurulmuştur. Bu modelin güvenilir bir şekilde kurulması çalışmanın temel amaçlarından biri olduğundan, körük modeli eklenmeden öncesinde de birçok iterasyon ve test çalışması yapılmıştır. Test verileri göz önünde bulundurulmadan, tez çalışması sonucu elde edilen verilerin körük parametreleri olarak düzenlenmesiyle de sonuçların rezonans bölgesinde hata oranı yaklaşık %25-%45 aralığında iken ve sıkma adımında hata oranı %14-%38 aralığındadır. Yapılan analizlerde körüksüz ve körüklü durum incelendiğinde, x yönü sıkma evresinde model teste uygun tahminler yapmış; bunun yanında y yönünde teste uygun karakteristikler görülürken deplasmanlarda beklenen sonucu tahmin edememiştir. Körüğün modele eklenmesi ile yapılan analizler direkt olarak test verisi ile örtüşmemektedir. x ve z yönünde korelasyon sağlanırken, y yönünde sistem davranışı(rezonans ve sıkma) beklenilen durumda iken deplasmanlarda aynı yakınsama görülememektedir. Bunun sebepleri şu şekilde belirtilebilir: modelde dengesiz kütle tam ortada ve noktasalken, gerçek testte kütle belirli bir alana yayılıdır, körük direngenlik ve sönüm değerleri lineerleştirilmesi logaritmik azalma testinde belirli bölümlerde kullanılmıştır ki bu bölgelerde lineer olmayan davranış mümkündür, son olarak çamaşır makinesi modellemesine gövde dahil edilmemiştir. Çamaşır makinesinin tahrik grubu sıkma kalkışı ve sıkma devrinde

rijit davranmaktadır, fakat bu bölümde gövde esnek cisim olarak davranmaktadır. Modelde körük bir taraftan kazana bağlanmış, diğer tarafından körük ‘yere’(ground) sabitlenmiştir. Burada teste uygun olması adına körüğe girilen değerler esnek bir gövdenin verilerine de sahip olacaktır. Daha sonraki iyileştirmeler ile bu hata oranı x yönünde azaltılmış fakat y yönünde aynı iyileştirme sağlanamamıştır. Bu da y yönü verileri ile ilgili bir hata olabileceğine işaret etmektedir. Körüksüz durumda bu hatanın görülmemesi körük parametrelerindeki ve sınır koşullarındaki problemi doğrulamıştır.

6.2 İlerde Yapılabilecek Çalışmalar

Tez kapsamındaki çalışmalar sırasında, ileride yapılabilecek çalışmalar için fikirler ortaya çıkmıştır. Bunlar özetle aşağıda listelenmiştir:

- EPDM malzemeye sahip körüğün, malzeme testi yapılarak, malzeme modelinin çıkarılması ve lineer olmayan sonlu elemanlar analizlerine veri oluşturulması
- Çamaşır makinesi körüğü sertliğinin tolerans aralığının(43 ± 4 Shore A), körüğün dinamik karakteristiğine etkilerinin belirlenmesi.
- Oberst yönteminde yapıştırıcı alternatifleri testlerinin çoklanması ve en güvenilir ölçüm yapılacak yapıştırıcının belirlenmesi.
- Dinamik Mekanik Analiz yönteminde daha kalın bir malzeme numunesi kullanılarak ölçümlerde oluşabilecek hatalardan kaçınıldığında, sonuçlar üzerinde etkinin gözlemlenmesi.
- Oberst Testi ve Dinamik Mekanik Analiz yöntemine alternatif bir dinamik analiz ve karakterizasyon yöntemi geliştirilmesi.
- Sonlu elemanlar yöntemi için oluşturulan kabuk modelin x ve y yönlerinde simetrik değil, ihmal edilen geometrik farklılıkları içerir olması.
- Lineer olmayan bir sonlu elemanlar körük modeli kurulması(hem malzeme hem de kontak mekanizması yönünden).
- Körük test düzeneği yapısına alternatif tasarım çalışması yapılması.

- Körük test düzeneğine sadece x ve y yönünde ayrı ayrı tahrik verilmesi yerine aynı anda hem x hem y yönünde faz farkı yaratılmaksızın ve yaratılarak tahrik verilmesi ile gereken ölçüm ve analizlerin yapılması.
- Körük testinin makine üzerinden de yapılabilmesi için yöntem veya yöntemler geliştirilmesi.
- Gövde grubunun esnek sonlu elemanlar modelinin kurulması ve Adams modeline dahil edilmesi.
- Körüğün Adams modeline yay ve sönüm elemanı olarak değil, geometrisi ve malzeme kartıyla birlikte dahil edilmesi.
- Körüğün hamur ve tasarım kriterlerinin dinamik açıdan optimizasyonu.

KAYNAKLAR

- [1] **Lauren Manufacturing Company.** (2017). Lauren Manufacturing - EPDM 2017.Available:
<https://www.lauren.com/solutions/materials/rubber/epdm/>.
- [2] **Jones, D. I.** (2001). *Handbook of Viscoelastic Vibration Damping*, Arizona: John Wiley&Sons, Ltd.
- [3] **Darlow, M. & Zorzi, E.** (1981). *Mechanical Design Handbook for Elastomers*, New York: NASA.
- [4] **Levent, M. E.** (2003). *Viskoelastik elemanların lineer olmayan dinamik özelliklerinin titreşim testleri ile belirlenmesi* (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] **Varol, İ.** (2008). *Viskoelastik elemanların dinamik özelliklerinin titreşim testleri ile belirlenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [6] **Körük, H.** (2013). *Identification, Modelling and Optimisation of structures with passive damping treatments*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [7] **Özer, M. S.** (2014). *Viskoelastik malzemelerin karakterizasyonu ve viskoelastik malzemeli yapıların modellenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [8] **Uysal, Ö.** (2014). *Çamaşır makinası dinamik davranışının modellenmesi ve dinamik bileşenlerin testi*. (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [9] **Ollson, A. K.** (2007). *Finite element procedures in modelling the dynamic properties of rubber*. (Doktora tezi) Structural Mechanics, Lund University.
- [10] **Rao, M. D., Gruenberg, S. & Griffiths, D.** (2001). Measurement of dynamic parameters of automotive exhaust hangers. *SAE Technical Paper* 2001-01-1446, 2001.
- [11] **Şanlıtürk, K. Y. & Körük, H.** (2010). On Measuring Dynamic Properties of Damping Materials Using Oberst Beam Method. *10th Biennial*

- [12] **Lin, T. R., Farag, N. H., & Pan, J.** (2005). Evaluation of frequency dependent rubber mount stiffness an damping by impact test. *Applied Acoustics*, cilt 66, no. 7, pp. 829-844, 2005.
- [13] **Felhos, D., Xu, D., Schlarb, A. K., Varadi, K. & Goda, T.** (2008). Viscoelastic characterization of an EPDM rubber and finite element simulation of its dry rolling friction. *eXPRESS Polymer Letters*, cilt 2, no. 3, pp. 157-164, 2008.
- [14] **Palfi, L. & Varadi, K.** (2010). Characterization and implementation of the viscoelastic properties of an EPDM rubber into FEA for energy loss prediction. *Periodica Polytechnica*, cilt 54, no. 1, pp. 35-40, 2010.
- [15] **Lin, F. & Rao, M. D.** (2010). Vibration analysis of a multiple-layered viscoelastic structure using the biot damping model. *AIAA Journal*, cilt 48, no. 3, pp. 624-634, 2010.
- [16] **Feng, Y. & Graf, H. J.** (2004). Epdm Compounds for Dynamic Applications. Patent no. EP1444295 A1, 11-08-2004.
- [17] **Ewins, D. J.** (1998). *Modal testing*. London: Wiley Sons, Inc.
- [18] **Inman, D. J.** (2008). *Engineering vibration*, 3rd Edition, Pearson.
- [19] **Beards, C. F.** (1996) *Structural vibration: analysis and damping*, London: Arnold.
- [20] **Rao, S. S.** (2000) *Mechanical vibrations*, Addison Wesley.
- [21] **Nashif, A. D., Jones, D. I. G. & Henderson, J. P.** (1985). *Vibration damping*. New York: John Wiley & Sons.
- [22] **Dym, C. L. ve Shames, I. H.** (2013). *Solid mechanics*. Springer.
- [23] **Rapra Technology Ltd.** (1998). *Synthetic elastomers sourcebook*. CRC Press.
- [24] **Ravishankar, P. S.** (2012). Treatise on EPDM. *Rubber and Chemistry Technology*, cilt 85, no. 3, pp. 327-349.
- [25] **Brown, R.** (2006). *Physical testing of rubber*. Springer.
- [26] **Briscoe, B. J. & Sebastian, K. S.** (1993). An Analysis of the Durometer Indentation. *Rubber and Chemistry Technology*, cilt 66, no. 5, pp. 827-836.

- [27] **Chawla, K. & Meyers, M. A.** (1999). *Mechanical behaviors of materials*, Cambridge.
- [28] **Url-1** <<http://www.matweb.com>> Erişim tarihi: 06.06.2017.
- [29] **American Standard for Testing and Material (ASTM)** (2010). *Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials*. Retrieved from <https://www.astm.org/Standards/E756.htm>.
- [30] **Url-2** *Wikipedia.org*. Erişim tarihi 07.08.2017 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oberst_apparatus.jpg
- [31] **Url-3** *Wikipedia.org* Erişim tarihi: 23.05.2017 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oberst_apparatus.jpg
- [32] **Henkel Adhesives Türkiye** (2017). Erişim tarihi: 11.11.2017, http://www.henkel-adhesives.info.tr/urun-arama-4319.htm?nodeid=8797711859713&msdsLanguage=TR_TR&selectedTab=technical
- [33] **TA Instruments**, (2017). erişim tarihi: 11.11.2017 from: <http://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/dma.pdf>
- [34] **Clarkson University**. Erişim tarihi: 11.11.2017 <http://people.clarkson.edu/~isuni/Chap-7.pdf>
- [35] **Vincent, J. F.** (1990). *Structural biomaterials*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Merve EMEKSİZ
Doğum Tarihi ve Yeri : 23.05.1991 / TRABZON
E-posta : merve.emeksiz@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016 yılında TEI TUSAŞ A.Ş. 'de tasarım mühendisi olarak çalıştı.
- 2016-2017 ARÇELİK A.Ş. 'de yapısal tasarım mühendisi olarak çalıştı.
- 2017- FORD OTOSAN A.Ş.'de ürün geliştirme mühendisi olarak çalışıyor.