

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK ELEMANLI YAPILARDA MALZEME SÖNÜMÜ VE TEMAS
ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat Can TÜZEL

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK ELEMANLI YAPILARDA MALZEME SÖNÜMÜ VE TEMAS
ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Murat Can TÜZEL
(518071015)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518071015 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Murat Can TÜZEL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇOK ELEMENLİ YAPILARDA MALZEME SÖNÜMÜ VE TEMAS ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Metin GÜRGÖZE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Faruk BAYRAKTAR
Arçelik A.Ş.

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **14 Ocak 2014**

Anneme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca ve araştırmamın her aşamasında engin bilgisini, tecrübelerini, değerli zamanını ve sonsuz desteğini benden esirgemeyen çok değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kenan Yüce Şanlıtürk'e, Özellikle deneysel çalışmalar sırasında her ihtiyaç duyduğum anda tecrübelerini ve desteklerini esirgemeyen, görüş ve önerileriyle araştırmama katkı sağlayan çalışma arkadaşlarım Cihan Orhan ve Selçuk Çelikel'e, İmkanlarını sınırsız şekilde esirgmeden hizmetime sunan Ford-Otosan ailesine ve diğer çalışma arkadaşlarıma, Araştırmamın en yoğun zamanlarında verdiği destek ve gösterdiği sabırdan dolayı eşime, Son olarak hayatımın her döneminde varlıklarından her zaman destek aldığım, sevgi, hoşgörü ve sonsuz desteklerini esirgemedi bana sunan değerli annem ve sevgili ablama teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Aralık 2014

Murat Can TÜZEL
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş ve Problem.....	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE TEORİ	7
2.1 Giriş.....	7
2.2 Malzeme Sönümü.....	9
2.3 Kuru Sürtünme Modelleri ve Uygulama Alanları.....	13
2.4 Kuru Sürtünme Deneysel Çalışmaları.....	26
3. MALZEME SÖNÜMÜNÜN BELİRLENMESİ	41
3.1 Giriş.....	41
3.2 Sönüm Miktarının Belirlenmesi için Uygun Yöntemin Tespit Edilmesi	42
3.2.1 Sönüm testlerini etkileyebilecek parametreler	44
3.2.2 Uygun test metodunun belirlenmesi	48
3.3 Sonuçlar.....	53
4. MOTOR PARÇALARININ DİNAMİK MODELLENMESİ.....	55
4.1 Giriş.....	55
4.2 Deneysel Çalışmalar.....	57
4.2.1 Modal parametrelerin belirlenmesi (Doğal Frekans & Mod Şekli)	58
4.2.1.1 Motor bloğu.....	58
4.2.1.2 Ladder frame	66
4.2.1.3 Yağ karteri.....	72
4.2.2 Malzeme sönümünün belirlenmesi	77
4.2.2.1 Ladder frame	77
4.2.2.2 Yağ karteri.....	82
4.3 Sayısal Çalışmalar ve Sonuçların Karşılaştırılması	86
4.3.1 Modal parametrelerin belirlenmesi (Doğal Frekans & Mod Şekli)	86
4.3.1.1 Motor bloğu.....	87
4.3.1.2 Ladder frame	89
4.3.1.3 Yağ karteri.....	91
4.3.2 Deneysel olarak elde edilen malzeme sönümünün analizlerde kullanılması.....	93
4.3.2.1 Ladder frame	93
4.3.2.2 Yağ karteri.....	101

5. KURU SÜRTÜNMELİ TEMAS PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	107
5.1 Giriş	107
5.2 Kuru Sürtünme Test Düzeneği ve Ölçüm Zinciri.....	108
5.2.1 Giriş.....	108
5.2.2 Kuru sürtünme test düzeneği.....	110
5.2.3 Ölçüm zinciri.....	113
5.3 Kuru Sürtünme Testleri	117
5.3.1 Sarsıcı kuvvet frekansının belirlenmesi	118
5.3.2 Temas parametrelerinin elde edilmesi ve sonuçlar	125
6. GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER.....	147
6.1 Genel Değerlendirme.....	147
6.2 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler	149
KAYNAKLAR.....	151
ÖZGEÇMİŞ	155

KISALTMALAR

FTF : Frekans Tepki Fonksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 : Bazı mühendislik malzemelerine ait kayıp faktörü değerleri [7].	12
Çizelge 3.1 : 1. doğal frekans ve malzeme sönümü (sönüm oranı) değerleri.	44
Çizelge 3.2 : Modal çekiç ve ivmeölçer kullanılarak yapılan sönüm testine ait değerler.	49
Çizelge 3.3 : 40x40x500mm boyutlarındaki çelik malzeme, numune 1 üzerinden toplanan 21 adet frekans tepki fonksiyonundan elde edilen 1. doğal frekans ve malzeme sönümü değerleri.....	50
Çizelge 3.4 : Modal çekiç & Lazer titreşimölçer ve Modal çekiç & İvmeölçer kullanılarak yapılan sönüm testlerine ait değerler.	51
Çizelge 3.5 : Modal sarsıcı ve lazer titreşimölçer kullanılarak yapılan sönüm testine ait değerler.	53
Çizelge 4.1 : Ladder frame modal test sonucu elde edilen malzeme sönümü değerleri (Ölçüm noktası 39 ilk doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranı değerlerine göre normalize edilmiştir).	81
Çizelge 4.2 : Yağ karteri modal test sonucu elde edilen malzeme sönümü değerleri (Ölçüm noktası 40 ilk doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranı değerlerine göre normalize edilmiştir).	85
Çizelge 5.1 : 1 Nm ve 10 Nm cıvata sıkma momentleri için test düzeneği üzerinde yapılan modal test sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri.....	124
Çizelge 5.2 : Bir periyotluk verinin hesaplamalar için kullanılması.....	126
Çizelge 5.3 : Bir periyotluk verinin hesaplamalar için kullanılması.....	131

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : İki türbin kanadı arasına yerleştirilen sürtünme sönümleyicisinin şematik gösterimi [6].	2
Şekil 2.1 : Ani darbe şeklinde tahrik edilen bir yapının serbest titreşim cevabı [7].	9
Şekil 2.2 : Malzeme sönümü ölçülecek yapı üzerinden elde edilen frekans tepki fonksiyonu [7].	10
Şekil 2.3 : Sönüm oranı ve kayıp faktörü arasındaki ilişki [8].	11
Şekil 2.4 : (a) Coulomb kuru sürtünme modeli (b) Coulomb kuru sürtünme histeresis grafiği [10].	14
Şekil 2.5 : (a) Makro-kayma kuru sürtünme modeli (b) Makro-kayma kuru sürtünme histeresis grafiği [4].	15
Şekil 2.6 : (a) Sürtünme sönümleyici (makro-kayma modeli) ile türbin kanadının şematik görüntüsü [13] (b) Sürtünme sönümleyici (makro-kayma modeli) ile türbin kanadı için kullanılan model [12].	15
Şekil 2.7 : Kanat-disk ve kanat-kanat arasında yer alan sürtünme sönümleyici çeşitleri (makro-kayma şeklinde modellenmişler) [16].	16
Şekil 2.8 : İki boyutlu makro-kayma kuru sürtünme modeli [5].	16
Şekil 2.9 : Bir boyutlu mikro-kayma kuru sürtünme modeli [5].	17
Şekil 2.10 : Makro-kayma eleman sayısının mikro-kayma davranışın temsil edilmesi üzerine olan etkisi [5].	18
Şekil 2.11 : Burdekin, M. ve diğerleri tarafından mikro-kayma hareketleri karakterize etmek için önerilen yüzey modeli (N: temas halindeki çubukların sayısı) [19].	19
Şekil 2.12 : (a) Deneysel veri ile makro-kayma ve mikro-kayma modelin karşılaştırılması (b) Deneysel veri ile hibrid modelin karşılaştırılması [20].	
Şekil 2.13 : Makro-kayma ve mikro-kayma sürtünme modelleri için, sürtünme kuvvetini temsil eden eşdeğer direngenliğin reel ve imajiner kısımlarının bağlı deplasmana göre değişimi [4].	22
Şekil 2.14 : Bir boyutlu (1-D) sürtünme sönümleyici modeli [21].	23
Şekil 2.15 : (a) İki boyutlu (2-D) sürtünme sönümleyici modeli (b) 2-D hareket için lokal koordinat sistemi [5].	23
Şekil 2.16 : Çalışmada kullanılan dinamik sistem [22].	23
Şekil 2.17 : (a) İki boyutlu (2-D) makro-kayma kuru sürtünme modeli (b) İki boyutlu (2-D) mikro-kayma kuru sürtünme modeli [5].	24
Şekil 2.18 : Çalışmada kullanılan iki serbestlik dereceli sistem ve 2-D makro-kayma modeli [5].	24
Şekil 2.19 : 3-D hareketin gerçekleştiği temas dinamiği [24].	25
Şekil 2.20 : Sürtünme sönümleyinin platform üzerinde yaptığı deplasmanlar [6].	25
Şekil 2.21 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [27].	26
Şekil 2.22 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [28].	28
Şekil 2.23 : Çeşitli normal (P) / yatay kuvvet (T_m) için elde edilen histeresis grafikleri [28].	29
Şekil 2.24 : Çeşitli yatay kuvvet (T_m) değerleri için periyot ile enerji kaybının değişimi [28].	29
Şekil 2.25 : (a) Çeşitli malzemeler için yatay kuvvet ile enerji kaybı değişimi (b) Çeşitli malzemeler için normal kuvvet ile enerji kaybı değişimi [28].	30

Şekil 2.26 : (a) Yatay kuvvet – bağıl deplasman ilişkisi ve meydana gelen histeresis grafiği formları (b) Kritik mikro-kayma deplasmanı ve bütünsel kayma kuvvetinin normal kuvvet ile değişimi [28].	31
Şekil 2.27 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [20].	32
Şekil 2.28 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [10].	33
Şekil 2.29 : Kuru sürtünme yüzeyini oluşturan temas durumundaki parçalar [10].	33
Şekil 2.30 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [29].	34
Şekil 2.31 : Deneysel sonuçlar : Bağıl deplasman / yatay kuvvet ilişkisi [29].	34
Şekil 2.32 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [30].	35
Şekil 2.33 : Histeresis grafiğinin sönüm hesaplaması için kullanılması [30].	36
Şekil 2.34 : (a) ve (b) - Ölçüm sonuçları [30].	37
Şekil 2.35 : (a) ve (b) - Ölçüm sonucu elde edilen bağıl deplasman (m) - iletilen kuvvet (N) histeresis eğrileri [30].	37
Şekil 2.36 : Kuru sürtünme testleri test düzeneği [31].	38
Şekil 2.37 : Klasik histeresis eğrisi [31].	39
Şekil 2.38 : Ölçümlerin tekrarlanabilirliğini göstermek için yapılan denemelere ait sonuçlar [31].	40
Şekil 2.39 : Temas yüzeyini oluşturan parçaların değişkenliğini göstermek için yapılan denemelere ait sonuçlar [31].	40
Şekil 3.1 : Malzeme sönüm testlerinde kullanılan numuneler.	42
Şekil 3.2 : Malzeme sönümünün deneysel olarak elde edilmesi.	43
Şekil 3.3 : Malzeme sönüm testlerinde kullanılacak yeni numuneler.	45
Şekil 3.4 : Asılış şeklinin malzeme sönümü üzerindeki etkisi.	46
Şekil 3.5 : Asılış şeklinin eski ve yeni durumu.	46
Şekil 3.6 : Alüminyum malzeme ve 30x30x300mm boyutundaki test numunesine ait 1. mod şekli ve askı yerleri.	47
Şekil 3.7 : Modal test sırasında kullanılan modal çekiç ve ivmeölçer.	48
Şekil 3.8 : Modal test sırasında kullanılan modal çekiç ve lazer titreşimölçer.	51
Şekil 3.9 : Modal test sırasında kullanılan modal sarsıcı ve lazer titreşimölçer.	52
Şekil 3.10 : Modal sarsıcı ve lazer titreşimölçer kullanılarak yapılan sönüm testi düzeneği.	52
Şekil 3.11 : Alüminyum malzeme, 40x40x500mm ve 30x30x300mm numunelerin modal sarsıcı ile sarsılması.	53
Şekil 4.1 : Bu bölümde deneysel ve sayısal çalışmalarda kullanılan motor parçaları, sırasıyla Motor bloğu – Ladder frame – Yağ karteri.	57
Şekil 4.2 : Doğal frekans ve mod şekli elde etmek için yapılan modal test çalışmaları sırasında kullanılan modal çekiç ve ivmeölçer.	58
Şekil 4.3 : Modal test çalışması için motor bloğu üzerinde işaretlenen ölçüm noktaları.	59
Şekil 4.4 : Blok üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının bilgisayar ortamına aktarılması.	60
Şekil 4.5 : Motor bloğu üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının I-DEAS programı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılması ile elde edilen 3-D model.	61
Şekil 4.6 : Motor bloğunun modal test gerçekleştirilmek üzere askı frame'ine serbest-serbest koşullarda asılması.	61
Şekil 4.7 : Motor bloğunun sabit noktadan tahrik edilmesi ve 4 adet ivmeölçerin gezdirilmesi suretiyle modal testinin gerçekleştirilmesi.	62
Şekil 4.8 : Motor bloğunun daha kolay tahrik edilebilmesi amacıyla kullanılan ekstra kütle	62
Şekil 4.9 : Motor bloğu modal test düzeneği.	63

Şekil 4.10 : Motor bloğu modal test sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonları.....	63
Şekil 4.11 : Motor bloğu modal test sonucu elde edilen ilk 4 mod'a ait mod şekli ..	65
Şekil 4.12 : Modal test çalışması için ladder frame üzerinde işaretlenen ölçüm noktaları.....	66
Şekil 4.13 : Ladder frame üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının bilgisayar ortamına aktarılması.....	67
Şekil 4.14 : Ladder frame üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının I-DEAS programı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılması ile elde edilen 3D model.....	67
Şekil 4.15 : Ladder frame'in modal test gerçekleştirilmek üzere askı frame'ine serbest-serbest koşullarda asılması.....	68
Şekil 4.16 : Ladder frame'in modal çekiç gezidirilerek ve 2 adet ivmeölçerin sabit tutularak (50 ve 109 numaralı ölçüm noktaları) modal testinin gerçekleştirilmesi.....	68
Şekil 4.17 : Ladder frame modal test düzeneği.....	69
Şekil 4.18 : Ladder frame modal test sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonları.....	70
Şekil 4.19 : Ladder frame modal test sonucu elde edilen ilk 4 mod'a ait mod şekilleri.....	71
Şekil 4.20 : Modal test çalışması için yağ karteri üzerinde işaretlenen ölçüm noktaları.....	72
Şekil 4.21 : Yağ karteri üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının bilgisayar ortamına aktarılması.....	73
Şekil 4.22 : Yağ karteri üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının I-DEAS programı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılması ile elde edilen 3D model...	73
Şekil 4.23 : Yağ karteri'nin modal test gerçekleştirilmek üzere askı frame'ine serbest-serbest koşullarda asılması.....	74
Şekil 4.24 : Yağ karterinin modal çekiç gezidirilerek ve 2 adet ivmeölçerin sabit tutularak (54 ve 148 numaralı ölçüm noktaları) modal testinin gerçekleştirilmesi.....	74
Şekil 4.25 : Yağ karteri modal test sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonları..	75
Şekil 4.26 : Yağ karteri modal test sonucu elde edilen ilk 4 mod'a ait mod şekilleri.....	76
Şekil 4.27 : Sırasıyla doğal frekans & mod şekli elde etmek amacıyla yapılan ve malzeme sönümü elde etmek amacıyla yapılan modal testler sırasında ladder frame'in farklı asılış biçimleri.....	78
Şekil 4.28 : Ladder frame malzeme sönümü için gerçekleştirilen modal test düzeneği.....	79
Şekil 4.29 : Lazer titreşimölçer kullanılarak sistem cevabının elde edilmesi.....	79
Şekil 4.30 : Ladder frame malzeme sönümü modal test sonucu elde edilen 15 adet frekans tepki fonksiyonu.....	80
Şekil 4.31 : Ladder frame malzeme sönümü modal test ölçüm noktaları – sırasıyla 1, 7, 12, 36, 39, 44.....	82
Şekil 4.32 : Sırasıyla doğal frekans & mod şekli elde etmek amacıyla yapılan ve malzeme sönümü elde etmek amacıyla yapılan modal testler sırasında yağ karteri'nin farklı asılış biçimleri.....	83
Şekil 4.33 : Lazer titreşimölçer kullanılarak sistem cevabının elde edilmesi.....	83
Şekil 4.34 : Yağ karteri malzeme sönümü için gerçekleştirilen modal test düzeneği.....	84

Şekil 4.35 : Yağ karteri malzeme sönümü modal test sonucu elde edilen 9 adet frekans tepki fonksiyonu.	84
Şekil 4.36 : Ladder frame malzeme sönümü modal test ölçüm noktaları – sırasıyla 14, 40, 61, 70, 76, 106, 121, 160.	85
Şekil 4.37 : Malzeme bilgilerinin girildiği ekran (sırasıyla elastiside modülü – yoğunluk – poisson oranı).	87
Şekil 4.38 : Sayısal analiz ve deneysel olarak elde edilen doğal frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılması (Normalize edilmiş doğal frekanslar).	88
Şekil 4.39 : Malzeme bilgilerinin girildiği ekran (sırasıyla elastiside modülü – poisson oranı – yoğunluk).	89
Şekil 4.40 : Sayısal analiz ve deneysel olarak elde edilen doğal frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılması (Normalize edilmiş doğal frekanslar).	90
Şekil 4.41 : Malzeme bilgilerinin girildiği ekran (sırasıyla elastiside modülü – poisson oranı – yoğunluk).	91
Şekil 4.42 : Sayısal analiz ve deneysel olarak elde edilen doğal frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılması (Normalize edilmiş doğal frekanslar).	92
Şekil 4.43 : Sayısal analiz çalışmalarında kullanılacak malzeme sönümü değerlerinin hesaplandığı FTF noktaları.	94
Şekil 4.44 : Nasrtan programında TABDMP 1 ile frekansa bağlı olarak sönüm girilebilmesi.	95
Şekil 4.45 : TABDMP 1 kartı kullanılarak analize girilen sönüm oranı değerlerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF’na ait ilk doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranına göre normalize edilmiştir.).	95
Şekil 4.46 : Ladder frame parçası için deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF’na ait ilk doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).	96
Şekil 4.47 : Nasrtan programında MAT 1 ile sönüm girilebilmesi.	97
Şekil 4.48 : Deneysel olarak elde edilen 1. doğal frekansa karşılık gelen sönüm değerinin TABDMP 1 ve MAT 1 kartlarına girilmesi sonucu gerçekleştirilen analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF’na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).	97
Şekil 4.49 : MAT 1 kartı kullanılarak analize girilen empirik kayıp faktörü değerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF’na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen kayıp faktörüne göre normalize edilmiştir.).	98
Şekil 4.50 : Frekansdan bağımsız empirik kayıp faktörü değerinin MAT 1 kartı ile girildiği analiz sonucunun deneysel çalışma ile karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF’na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).	99
Şekil 4.51 : Deneysel çalışma sonucu frekansa bağlı olarak elde edilen sönüm oranı değerlerinin aritmetik ortalamasının kayıp faktörü şeklinde Nastran programına MAT 1 kartı ile girilmesi.	100
Şekil 4.52 : MAT 1 kartı kullanılarak analize girilen deneysel ortalama malzeme sönümü değerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF’na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen kayıp faktörüne göre normalize edilmiştir.).	100
Şekil 4.53 : Frekansdan bağımsız deneysel ortalama kayıp faktörü değerinin MAT 1 kartı ile girildiği analiz sonucunun deneysel çalışma ile	

karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF'na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).	101
Şekil 4.54 : Sayısal analiz çalışmalarında kullanılacak malzeme sönümü değerlerinin hesaplandığı FTF'nun elde edildiği ölçüm noktaları.	102
Şekil 4.55 : TABDMP 1 kartı kullanılarak analize girilen sönüm oranı değerlerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF'na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranına göre normalize edilmiştir.).	102
Şekil 4.56 : Deneysel olarak elde edilen frekansa bağlı sönüm değerlerinin kullanıldığı analiz sonucunun deneysel çalışma ile karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF'na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).	103
Şekil 4.57 : MAT 1 kartı kullanılarak analize girilen empirik kayıp faktörü değerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF'na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranına göre normalize edilmiştir.).	104
Şekil 4.58 : Frekansdan bağımsız empirik kayıp faktörü değerinin MAT 1 kartı ile girildiği analiz sonucunun deneysel çalışma ile karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF'na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).	105
Şekil 4.59 : MAT 1 kartı kullanılarak analize girilen deneysel ortalama malzeme sönümü değerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF'na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen kayıp faktörüne göre normalize edilmiştir.).	105
Şekil 4.60 : Frekansdan bağımsız deneysel ortalama kayıp faktörü değerinin MAT 1 kartı ile girildiği analiz sonucunun deneysel çalışma ile karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF'na ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).	106
Şekil 5.1 : Bu çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği.	110
Şekil 5.2 : Temas bölgesinin detaylı görüntüsü.	111
Şekil 5.3 : Sürtünme yüzeyini oluşturan A ve B parçalarının teknik resmi ve 3-D görüntüsü.	112
Şekil 5.4 : Kuru sürtünme test düzeneği ve ölçüm zinciri.	114
Şekil 5.5 : A ve B parçalarının bağlı olduğu rijit sistemler (Alt sistem 1 ve 2).	114
Şekil 5.6 : Kuru sürtünme test düzeneği üzerinde kullanılan sensör konumları.	117
Şekil 5.7 : Test düzeneğinin basit kütle-yay-kütle sistemi olarak gösterimi.	119
Şekil 5.8 : Test düzeneği üzerinde yapılan modal test çalışması için oluşturulan geometri.	120
Şekil 5.9 : Modal test çalışmasındaki tahrik noktaları.	120
Şekil 5.10 : 1 Nm civata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş gidip-gelme rijit kütle moduna ait mod şekli (1.2 Hz).	121
Şekil 5.11 : 1 Nm civata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş 1. eğilme moduna ait mod şekli (294 Hz).	122
Şekil 5.12 : 1 Nm civata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş burulma moduna ait mod şekli (415 Hz).	122
Şekil 5.13 : 1 Nm civata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş 2. eğilme moduna ait mod şekli (554 Hz).	122
Şekil 5.14 : 10 Nm civata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş 1. eğilme moduna ait mod şekli (360 Hz).	123

Şekil 5.15 : 10 Nm cıvata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş burulma moduna ait mod şekli (572 Hz).	124
Şekil 5.16 : 10 Nm cıvata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş 2. eğilme moduna ait mod şekli (697 Hz).	124
Şekil 5.17 : Deneysel verilerin, temas direngenliği ve kuru sürtünme sönümü değerlerinin elde edilmesi için gerekli ön hesaplamaların yapılması sırasında kullanımı.	125
Şekil 5.18 : Bağlı deplasman değerlerinin zamana göre değişimi.	127
Şekil 5.19 : Bağlı deplasman ve iletilen kuvvet değerlerinin zamana göre değişimi	127
Şekil 5.20 : $F_s=17.7\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.202\mu\text{m}$ için histeresis grafiği.	128
Şekil 5.21 : $F_s=17.7\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.202\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (İnterpolasyon yapılmış veri kullanılarak).	130
Şekil 5.22 : Temas parametrelerinin elde edilmesini özetleyen akış şeması.	132
Şekil 5.23 : $F_s=4.6\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=0.39\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.	133
Şekil 5.24 : $F_s=17.7\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.202\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.	134
Şekil 5.25 : $F_s=29.4\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.63\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.	134
Şekil 5.26 : $F_s=40.6\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.	134
Şekil 5.27 : $F_s=56.8\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.37\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.	135
Şekil 5.28 : $F_s=72.5\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.76\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.	135
Şekil 5.29 : 1 Nm cıvata sıkma momenti ve $f_s=940\text{Hz}$ için k_{re} değerlerinin bağlı deplasman ile değişimi.	136
Şekil 5.30 : $F_s=4.6\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=0.39\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).	136
Şekil 5.31 : $F_s=17.7\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.202\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).	137
Şekil 5.32 : $F_s=29.4\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.63\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).	137
Şekil 5.33 : $F_s=40.6\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.00\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).	138
Şekil 5.34 : $F_s=56.8\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.37\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).	138
Şekil 5.35 : $F_s=72.5\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.76\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).	139
Şekil 5.36 : 1 Nm cıvata sıkma momenti ve $f_s=940\text{Hz}$ için farklı bağlı deplasman değerlerinde elde edilen histeresis grafikleri.	139
Şekil 5.37 : $F_s=6.8\text{N}$, $f_s=1650\text{Hz}$ ve $\Delta d=0.094\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.	140
Şekil 5.38 : $F_s=13.5\text{N}$, $f_s=1650\text{Hz}$ ve $\Delta d=0.22\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.	140
Şekil 5.39 : $F_s=22.1\text{N}$, $f_s=1650\text{Hz}$ ve $\Delta d=0.35\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.	141
Şekil 5.40 : 10 Nm cıvata sıkma momenti ve $f_s=1650\text{Hz}$ için k_{re} değerlerinin bağlı deplasman ile değişimi.	141

Şekil 5.41 : İletilen kuvvet – bağıl deplasman yükleme eğrisi bölgeleri.	142
Şekil 5.42 : k_{re} değerlerinin cıvata sıkma momentine göre değişimi (Yaklaşık olarak aynı bağıl deplasman için).....	143
Şekil 5.43 : Histeresis eğrilerinin cıvata sıkma momentine göre değişimi (Yaklaşık olarak aynı bağıl deplasman için).....	143
Şekil 5.44 : $F_s=4.6N$, $f_s=940Hz$ ve $\Delta d=0.39\mu m$ için farklı periyotlara ait k_{im} değerleri.....	144
Şekil 5.45 : $F_s=29.4N$, $f_s=940Hz$ ve $\Delta d=1.63\mu m$ için farklı periyotlara ait k_{im} değerleri.....	145
Şekil 5.46 : $F_s=40.6N$, $f_s=940Hz$ ve $\Delta d=2.00\mu m$ için farklı periyotlara ait k_{im} değerleri.....	145
Şekil 5.47 : $F_s=56.8N$, $f_s=940Hz$ ve $\Delta d=2.37\mu m$ için farklı periyotlara ait k_{im} değerleri.....	145
Şekil 5.48 : $F_s=72.5N$, $f_s=940Hz$ ve $\Delta d=2.76\mu m$ için farklı periyotlara ait k_{im} değerleri.....	146
Şekil 5.49 : 1 Nm cıvata sıkma momenti ve $f_s=940Hz$ için k_{im} değerlerinin bağıl deplasman ile değişimi.	146

ÇOK ELEMANLI YAPILARDA MALZEME SÖNÜMÜ VE TEMAS ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

ÖZET

Özellikle makine endüstrisinde yapılan Ar-Ge çalışmalarında, yapıların veya makinelerin özellikle rezonans durumlarında sahip olacakları titreşim ve gürültü seviyelerinin prototip üretilmeden önce bilinmesi istenir. Ancak, çok elemanlı yapılarda oluşan temas yüzeylerinin davranışının tam olarak bilinmemesi ve bu sebeple modellenememesi, hassas analiz sonuçlarının elde edilememesine neden olmaktadır. Çok elemanlı yapılarda yapısal sönümün ana kaynağı, temas yüzeylerinde meydana gelen kuru sürtünme sönümüdür. Özellikle otomotiv alanında yapılan sayısal analiz çalışmalarında temas yüzeyleri modellenmemekte ve kuru sürtünme sönümünü temsil etmesi için empirik sönüm değerleri kullanılmaktadır. Kuru sürtünme sönümünün yanısıra yapıların sahip olduğu malzeme sönümü için de önceden belirlenmiş empirik sönüm değerleri kullanılmaktadır. Yapıların gerçekte sahip olduğu malzeme ve kuru sürtünme sönümü yerine empirik sönüm değerlerinin kullanıldığı analizler, titreşim genliği açısından hassas sonuçlar vermemektedirler. Temas yüzeylerinde meydana gelen direngenliğin doğru bir şekilde ölçülmesi ve modellenmesi ise analiz sonucunda doğal frekans değerlerinin daha hassas tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, malzeme sönümü ve çok elemanlı yapılarda karşılaşılan temas yüzeylerindeki temas parametreleri olan direngenlik ve sürtünme sönümünün deneysel olarak hassas bir şekilde ölçülmesine çalışılmıştır. Basit çubuklar üzerinde çeşitli modal test çalışmaları yapılarak malzeme sönümünün en hassas şekilde ölçülmesi için uygun yöntem belirlenmiş ve daha sonraki çalışmalarda bu yöntemin karmaşık motor parçaları üzerinde de başarıyla uygulanabildiği belirlenmiştir. Özellikle otomotiv sektöründe karşılaşılan cıvatalı bağlantılardaki temas yüzeylerinin gerçekçi bir şekilde temsil edilebildiği bir test düzeneğinin geliştirilebilmesi amacıyla literatürde yapılan benzer çalışmalar incelenmiştir. Literatürdeki benzer çalışmalar içerisinde, bu çalışmanın amacına en uygun test düzeneği temel alınarak geliştirilen ölçüm sistemi kullanılarak, temas direngenliği ve kuru sürtünme sönümünün ölçülmesine çalışılmıştır. Bu çalışmada, literatürde önerildiği gibi, nonlineer bir davranış gösteren sürtünme kuvveti genliğe bağlı eşdeğer bir direngenlik olarak kabul edilmiş, 1. Derece Harmonik Denge Metodu uygulanarak lineer hale getirilmiş ve temas parametreleri hesaplanmıştır. Temas direngenliğinin hassas bir şekilde ölçülebilmesine rağmen, bu çalışmada sunulan yöntemle, sürtünme sönümü için pratikte kullanılabilecek güvenilir sonuçların elde edilemediği anlaşılmıştır. Yapılan çalışmalar sırasındaki gözlemler ve elde edilen sonuçlardan yararlanılarak, ölçüm sisteminin avantaj ve dezavantajları belirlenmiş ve gelecekte yapılacak benzer çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

MEASUREMENT OF MATERIAL DAMPING AND CONTACT PROPERTIES OF MULTIBODY STRUCTURES

SUMMARY

One of the most significant problems in the machinery industry, especially turbomachinery and automotive, is to decrease the high resonant vibration levels and sometimes the noise caused by these vibrations. Knowledge of resonant noise and vibration levels of prototype parts prior to production is desirable in development studies of machinery industry. To some extent, computation of vibrational properties is possible via finite element models. Nearly all the components in automotive industry are in contact with each other and in general, these components have dry friction surfaces. Main source of the structural damping is the frictional damping - with a percent up to 90%- between the contact surfaces of the assembly. The other parameter acting on dynamics at the contact surface is the contact stiffness. Accurate measurement and liable modelling of contact stiffness enables accurate finite element analysis results in terms of natural frequencies. Today, especially in automotive field, the dry friction surface is generally not modelled in finite element analyses. Because of this, a significant level of structural damping and any of the contact stiffness is not included in the model. Most common practice on these FE analyses is to use simply an empirical generic value for dry friction damping. As a result of this, no exact correlation between the finite element analyses and the experimental studies on prototypes in terms of vibration levels and natural frequencies can be ensured.

Nonlinear nature of the contact dynamics and the lack of reliable experimental data are the main reasons of inexplicable behaviour of dry friction surfaces. Although there are many experimental studies on this topic in the literature, most of them do not include contact surfaces of bolted joints seen frequently in automotive industry. These studies provide only limited information for contact surfaces at the bolted joints used in automotive field and experimental studies suited for this kind of applications are required.

Main goal of this study is to experimentally obtain contact parameters of the dry friction surfaces of bolted joints seen in automotive studies. As seen from the literature, such experimental studies are rather rigorous. The most important point of this study is, ensuring the test rig to serve for ease of application in the industry.

Another goal of this study is to obtain accurate material damping experimentally. General approach in the automotive industry is to use a generic empirical value in modelled components for this property. The study also includes the comparison of empirical values taken from industry and experimental values obtained via modal testing.

This thesis investigates the material damping properties starting from simple geometric parts and continues to the generation of the properties on complex engine

components. First, the approach to be used in the study is chosen by modal testing applications on simple quadratic beams and parameters affecting the experiments are determined. These parameters are found to be air in the environment, hanging position of the structure, hanging locations on the structure and measurement equipments. General results obtained from this application showed that the measurement equipment should be non-contact type as much as possible.

After selection of the approach and equipment, the tests are performed on automotive parts with complex geometry in order to understand the applicability of the selected procedure. Results from this testing have verified the chosen procedure in the previous section is suitable for complex automotive components. Frequency response functions (FRF) and material damping values extracted from these FRF's are obtained from these tests. Following the experiments, finite elements analyses are performed using the experimental material damping values in the material definitions. In parallel, generic empiric values taken from industrial applications are also used in finite element analyses. These finite element analysis results are then compared to the real experimental FRF's. It is seen that the usage of experimental values have provided much accurate results with a percent of up to 99%. These results promote experimental values' usage in such applications.

Another conclusion from this result is that, in the future works, the error caused in bolted joint modelling applications would be coming only from the dry friction surface related parameters since the material damping has been accurately measured and fed into the analysis. This feedback may aid in the improvement of dry friction modelling studies in the future.

To create a realistic and liable test rig for coupling pieces used in automotive industry, an extensive literature survey is conducted for similar applications. Amongst those studies, most suitable one is chosen to be a starting point to this study and a test rig is created for contact stiffness and dry friction damping measurement. As mentioned above, this test rig is carefully designed for ease of application. The only requirements of this measurement rig are 3 uni-axial accelerometers to obtain relative displacement between coupled parts and transmitted force, a modal shaker for harmonic excitation and force transducers under the bolt to regulate the pressure on the contact surface. Relative displacement is important for hysteresis loop creation which will enable the determination of the contact parameters. In the light of the tests performed with this rig, it is concluded that the main 3 parameters important for sufficient relative displacement are; normal force on the bolt, tangential excitation force amplitude and tangential excitation force frequency.

As proposed in the literature, friction force, exhibiting a nonlinear character, is modelled as an amplitude dependent equivalent stiffness and then linearized with the aid of "First Order Harmonic Balance Method". The contact parameters are then calculated under this approach. Different tests are ran for varying relative displacements obtained by varying tangential excitation forces and normal forces. Contact parameters changes with respect to relative displacements are monitored throughout these tests. As expected, contact stiffness has shown a decreasing trend as the relative displacement increased. Although the contact stiffness is found to be highly accurately measured and obtained in line with the expectations based on the literature, the same reliability and accuracy has not been able to be shown for friction damping with the methods used in this study.

With observations and results obtained from the study, advantages and disadvantages of such test rigs and conclusions for future studies are identified. Main advantages can be given as ease of application of the rig, represent the bolted joints realistically and usage of interchangeable coupled parts establishing the contact surfaces. Main disadvantage is the limited minimum normal force which requires high tangential excitation force amplitudes and frequencies. Because of this, dynamic behaviour of the test rig under dynamic conditions is affected. This has resulted in incorrect contact surface parameter values extraction which has also eliminated the chance of macro slip behaviours of the contact surfaces.

For future studies, using controlled dead weights to create contact surface pressure can help to derive more reliable results. The experimental contact parameters and material damping values obtained in this study can also be used in future finite elements modelling of dry friction surfaces in industrial applications.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Problem

Yapıların özellikle rezonans durumlarındaki yüksek titreşimleri ve bazen bunun yol açtığı istenmeyen gürültü seviyelerini düşürmek başta uçak ve otomotiv olmak üzere bütün makine endüstrisinin önemli problemlerinden biridir. Bunun sağlanması için bilinen çözümler;

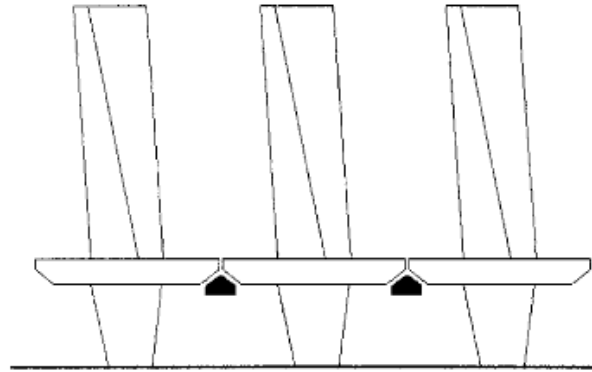
- (i) Özellikle rezonans durumlarındaki titreşimlerin genliklerinin düşürülmesi için, sistemin yüksek sönüm karakteristiği sağlayacak şekilde dizayn edilmesi
- (ii) Sistemin doğal frekanslarının, sistemin çalışma frekans aralığı dışına çıkarılacak şekilde yeniden dizayn edilmesi
- (iii) Çok uygulanabilir olmasa da, tahrik frekanslarının, sistemin doğal frekansları ile çakışmayacak şekilde belirlenmesi

Tasarım ve Ar-Ge çalışmalarında prototip üretilmeden önce sayısal modeller üzerinde gerçekleştirilen analizler yardımıyla, yapının doğal frekansları ve rezonans durumlarında sahip olacağı titreşim seviyeleri önceden görülebilmektedir. Havacılık ve otomotiv sektöründe kullanılan yapılarda veya makinelerde yer alan parçaların hemen hemen hepsi bir diğeri ile temas halindedir ve genellikle aralarında kuru sürtünme yüzeyleri mevcuttur. Birbirlerine montajlanmış yapıların oluşturduğu bir sistemde, yapısal sönümünün ana kaynağı temas yüzeylerindeki sürtünme sönümüdür [1]. Bir diğer çalışmada [2], temas yüzeylerinde meydana gelen sönümün özellikle düşük malzeme sönümüne sahip yapılarda önemli olduğu ve toplam yapısal sönümün %90'ının temas yüzeylerinde meydana gelen sönüm olduğu belirtilmiştir. Temas yüzeylerinde etkili olan bir diğer parametre ise temas direngenliğidir. Temas yüzeylerinden kaynaklanan direngenliğin doğru olarak ölçülmesi ve sayısal analiz çalışmalarında modellenebilmesi, analiz sonucunda doğal frekans değerlerinin daha hassas tahmin edilebilmesini sağlar. Günümüzde prototip üretilmeden önce titreşim seviyelerinin belirlenmesi istenen yapıların sayısal modelleri oluşturulurken, yapıyı oluşturan parçaların yarattığı kuru sürtünme yüzeyleri modellenememekte ve bu

durumda yapısal sönümün önemli bir kısmı ile temas yüzeylerinin sahip olduğu direngenlik gerçekçi olarak sayısal modelin içinde yer alamamaktadır. Yapıyı oluşturan parçaların malzeme sönümleri ve yukarıda bahsedilen kuru sürtünme sönümleri için önceden belirlenmiş empirik sönüm değerleri analize girilmektedir. Direngenlik değeri olarak da, deneysel çalışma sonucu elde edilen değerler kullanılmadığından, bu durumda yapılan analizler ile prototip üretildikten sonra gerçek durumda yapılan deneysel çalışmalar arasında titreşim genliği ve doğal frekans bakımından bir uyum elde edilememektedir.

Birçok mühendislik uygulamasında, parçanın kendisinin sahip olduğu malzeme sönümü, yapısal titreşimleri mantıklı seviyelerde tutmak için yeterli olmamaktadır. Gerekli ek sönüm miktarını sağlamak için yüksek sönüm alaşımlarının kullanımı gibi yöntemler, hem pahalı hem de sıcaklık veya frekans hassasiyetine sahip olabilmektedirler. Bir yapıdaki toplam sönümün %90 oranının temas bölgesinden sağlanması, temas bölgelerinin yeteri kadar sönüm vermesi için optimize edilmesi ve yapıya sönüm eklemek için kullanılması gereken pahalı yöntemlerin elenmesine neden olmaktadır [3]. Ancak bir çok sebepten [4] dolayı, kuru sürtünme yüzeylerinin davranışları tam olarak anlaşılamamıştır. Örneğin turbo makine kanat tasarımcılarının karşı karşıya olduğu en önemli problemlerden biri, temas yüzeylerinin titreşim genlikleri üzerine olan etkisini tahmin edebilmek ve rezonans titreşimlerini azaltmak için bu yüzeyleri optimize etmektir [5].

Kuru sürtünme yüzeylerinin davranışının anlaşılamamasının en önemli sebepleri arasında, temas dinamiğinin lineer olmayan davranışı ile beraber güvenilir deneysel verinin eksikliği de vardır [4].



Şekil 1.1 : İki türbin kanadı arasına yerleştirilen sürtünme sönümleyicisinin şematik gösterimi [6].

Literatürde yapılan çalışmaların birçoğu turbomakine endüstrisinde sıkça kullanılan sürtünme sönümleyicilerinin oluşturduğu temas durumuyla ilgilenmektedir. Şekil 1.1’den görüldüğü üzere, sürtünme sönümleyicileri cıvatalı veya herhangi bir diğer bağlantı şekliyle bağlanmayıp, santrifüj kuvvetlerin etkisiyle yüklenen yapılardır. Yapılan deneysel çalışmalarda da gerçeğine uygun şekilde bu tip bağlantılar kullanılmaktadır. Ancak otomotiv endüstrisinde ise, kuru sürtünmenin meydana geldiği temas durumlarının çok büyük bir kısmı cıvatalı bağlantı olmaktadır. Yapılan diğer deneysel çalışmaların sonuçları, cıvatalı bağlantılardaki kuru sürtünme yüzeylerinin modellenmesi için bir seçenek sunsa da, otomotiv alanında da aslına uygun bağlantıların kullanıldığı deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Günümüzde, özellikle mühendislik alanında, deneysel çalışmaların mümkün olduğu kadar az yapılması, hem zaman hem de ekonomik açıdan istenen bir durumdur. Örneğin otomotiv sektöründe gürültü ve titreşim alanında sıfırdan üretilecek bir ürünün prototip’i üretilmeden önce, tüm titreşim ve gürültü değerlerinin, sayısal modelleme ve analiz yapılarak elde edilmesi istenmektedir. Deneysel çalışmaların ise sadece belirli adımlarda modelin doğruluğunu anlayabilmek için yapılması arzu edilmektedir. Ancak günümüzde, otomotiv sektöründe, montaj halindeki bir yapının sayısal modeli kurulurken, kuru sürtünme yüzeyleri modellenememekte ve iki parça birbirine rijit olarak bağlanmaktadır. Bunun anlamı, iki parça arasındaki temas direngenliği sonsuzdur ve iki parça arasında bağıl hareket yani enerjinin dışa atımı diğer bir deyişle sönüm gerçekleşmemektedir. Gerçekte ise Bölüm 2’de verildiği gibi, titreşim durumunda olan her temas bölgesinde bir miktar sönüm mevcuttur ve ölçülebilen bir direngenlik değeri vardır. Temas bölgelerinin nonlineer davranışından dolayı bu kuru sürtünme yüzeylerinin sayısal modellerinin oluşturulması zordur ve bu durum sağlıklı deneysel çalışmaların yapılmasını gerektirir.

Bu çalışmanın esas amacı, otomotiv sektöründe karşımıza çıkan cıvatalı bağlantılardaki kuru sürtünme yüzeylerinin modellenme çalışmalarına yardımcı olabilecek temas parametrelerinin deneysel olarak elde edilmesidir. Literatürdeki çalışmalardan anlaşılabileceği üzere bu tip deneysel çalışmalar oldukça zahmetlidir. Buradaki en önemli husus, geliştirilecek test düzeneğinin gerçek piyasa koşullarında

uygulanabilir olması ve bu sebeple literatürde yer alan çalışmaların aksine temas parametrelerinin daha basit bir şekilde elde edilebilmesidir.

Montaj halindeki motor parçalarının temas yüzeylerinin modellenmesi çalışmalarında karşımıza çıkan sorunların sadece kuru sürtünme yüzeylerinin modellenmesinden kaynaklandığının düşünülebilmesi için sayısal modelleme sırasında malzeme sönümü, elastik modülü ve yoğunluk gibi malzeme özelliklerinin gerçek değerlerinin kullanılması gerekmektedir. Böylece montaj halindeki yapıların analiz ve test sonuçları korele olmadığında, sorunun zaten zor olduğu bilinen temas modellenmesinden kaynaklandığı anlaşılabılır ve böylece modelin geliştirilebilmesi için doğru geri bildirim alınmış olunur. Bu sebeple elde edilmesi en zor malzeme bilgisi olan malzeme sönümünün deneysel bir yolla hassas bir şekilde elde edilmesi çalışmanın bir diğer amacıdır. Malzeme sönümünün hassas bir şekilde deneysel olarak elde edilmesinden sonra, frekans ile değişimi, analiz ortamına girdi olarak nasıl sağlanacağı ve otomotiv sektöründe kullanılan empirik malzeme sönümü değerleriyle karşılaştırılması incelenecek diğer konulardır.

Tezin ilk bölümünde, kısaca mevcut durumdan bahsedilerek problem ortaya konmuş, bu çalışmanın amacı ve kapsamı verilmiştir.

İkinci bölümde, kuru sürtünme yüzeylerinde meydana gelen kayma hareketleri ve bu hareketleri temsil edebilen modellerden bahsedilmiştir. Temas dinamiğinin anlaşılabilmesi veya bu modellerin uygulandıktan sonra doğruluklarının anlaşılabilmesi için literatürde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Son olarak, sönüm çeşitleri ve malzeme sönümü konusunda teorik bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde, basit çubuk parçaların malzeme sönümleri deneysel olarak ölçülmeye çalışılmış, malzeme sönümünün ölçülmesi sırasında ölçümlere etki eden parametreler belirlenmiş ve en hassas sonuçların elde edilebildiği ölçüm yöntemi belirlenmiştir.

Dördüncü bölümde ise, üçüncü bölümde elde edilen uygun ölçüm yöntemi ve diğer sonuçların, otomotiv sektöründe kullanılan karmaşık makine parçaları üzerinde uygulanabilir olup olmadığını görmek için, gerçek otomotiv parçaları üzerinde sönüm testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sönüm değerlerinin analiz ortamına girdi olarak nasıl dahil edileceği irdelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen sönüm

değerleri ile otomotiv sektöründe kullanılan empirik sönüm değerlerinin kullanıldığı analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ancak tüm bunların öncesinde titreşim genliği gibi hassas bir konu ile ilgilenmeden önce parçaların modal testleri yapılarak sayısal modelin doğruluğu doğal frekans ve mod şekli açısından deneysel sonuçlar ile korele edilmiştir. Böylece gelecek çalışmalarda yapılması planlanan otomotiv parçalarının kuru sürtünme yüzeylerinin de dahil olduğu sayısal modelleme çalışmaları için otomotiv parçalarının güvenilir sayısal modelleri oluşturulmuştur.

Çalışmanın beşinci bölümünde, otomotiv sektöründe karşılaşılan cıvatalı bağlantılardaki kuru sürtünme yüzeylerinin modellenmesi çalışmalarında kullanılmak üzere, gerekli temas parametrelerinin (temas direngenliği ve kuru sürtünme sönümü) deneysel olarak elde edilmesi amacıyla, literatürde yapılan benzer çalışmalar taranarak gerçekçi fakat alternatif test düzeneklerine göre daha pratik bir test düzeneği geliştirilmiştir. Testlerin gerçekleştirilmesi için dikkat edilmesi gereken noktalar ve ölçüm zincirinden bahsedilmiştir. Elde edilen sonuçlar sunulup, irdelenmiş ve kullanılan test düzeneği ile ölçüm sisteminin avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir.

Çalışmanın son bölümünde ise, yapılan çalışma hakkında genel değerlendirmeler yapılmış, kullanılan test düzeneği ile ölçüm sisteminin avantaj ve dezavantajları ortaya konmuştur. Son olarak, gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE TEORİ

2.1 Giriş

Birbirlerine montajlanmış yapıların oluşturduğu bir sistemde, yapısal sönümün ana kaynağı, çoğu zaman temas yüzeyindeki sürtünme sönümüdür [1]. Sadece malzemenin kendisi tarafından sağlanan yapısal sönüm genellikle yetersizdir, ancak bu yapısal sönüm, montajlanmış pek çok yapıda bulunduğu gibi, birbirlerine göre bağıl olarak hareket eden temas yüzeyleri arasında meydana gelen enerji atımı ile oluşan sönüm tarafından önemli ölçüde arttırılabilir. Temas yüzeylerinde meydana gelen sönüm, özellikle düşük malzeme sönümüne sahip yapılarda önemlidir ve toplam yapısal sönümün %90'ı temas yüzeylerinde meydana gelen sönüm olabilmektedir. Dolayısı ile, yüksek sönüm kaynağı olmaları ve yapıların birçoğundan istenen düşük gürültü ve titreşim seviyeleri, sürtünme sönümüne olan ilgiyi arttırmıştır. Fakat temas yüzeyleri arasında gerekli olan küçük bağıl hareketlerin korozyon, direngenlikte meydana gelen kayıp ve zorlayıcı dizayn ile analiz problemlerine neden olmasından dolayı kuru sürtünme yüzeyleri nadiren verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yüzden, bu zorlukların üstesinden gelebilmek ve temas yüzeylerindeki sürtünme sönümü ile onun uygulamalarını anlamak için araştırmacılar tarafından önemli derecede çaba sarfedilmektedir [2].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu konuda yapılan çalışmaların sadece kuru sürtünme yüzeylerinin titreşim genliklerini ne şekilde etkilediğini anlamak için yapılmadığı görülmüştür. Örneğin turbo makine kanat tasarımcılarının karşı karşıya olduğu en önemli problemlerden biri, temas yüzeylerinin titreşim genlikleri üzerine olan etkisini tahmin edebilmek ve rezonans titreşimlerini azaltmak için bu yüzeyleri optimize etmektir. Temas yüzeylerinin optimize edilmesi çalışmalarına örnek olarak, gaz türbinlerinde kuru sürtünme konseptinin tipik bir uygulaması olan sürtünme sönümleyici gösterilebilir (Şekil 1.1). Sürtünme sönümleyici, iki türbin kanadı arasına konumlanan ve hareket anında santrifüj kuvvet tarafından yüklenen küçük bir

parça metal olarak tanımlanabilir. Bu sönümleyilerin temel tasarım kriteri, titreşim genliğini maksimum şekilde azaltacak optimum sönümleyici kütlesinin belirlenmesidir. Eğer sönümleyici kütlesi küçük olursa, sürtünme kuvveti yeterli miktarda enerjiyi ısıya çevirecek kadar büyük olmayacak, eğer kütle büyük olursa, sönümleyicinin bağıl hareketi yani ısıya çevrilen titreşim enerjisinin miktarı sınırlı olacaktır. Her iki durumda da sürtünme sönümleyici verimsiz olacaktır. Bu iki durum arasında optimum kütle belirlenmelidir [3].

Kuru sürtünme yüzeylerinin anlaşılması ve sürtünme sönümleyicilerin optimize edilebilmesi için önemli derecede çaba sarfedilmesine rağmen, problem aşağıda belirtilen sebeplerden dolayı henüz tam olarak çözülememiştir [4];

- (i) Temas yüzeyleri için uygun matematik modelin eksikliği
- (ii) Temas dinamiğinin lineer olmayan davranışı
- (iii) Sayısal doğrulama için kullanılacak güvenilir deneysel verinin eksikliği
- (iv) Büyük sistemler ile ilgilenilirken gerekli hesaplama yükü

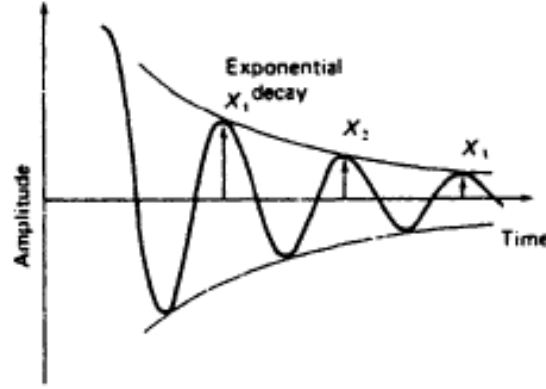
Bu çalışmanın asıl amacı, otomotiv sektöründe karşılaşılan cıvatalı temas bölgelerindeki kuru sürtünme yüzeylerinin modellenme çalışmalarına yardımcı olabilmesi amacıyla, temas parametrelerinin deneysel olarak elde edilmesi ve otomotiv parçalarının malzeme sönümlerinin hassas bir şekilde deneysel olarak ölçülmesidir. Bu sebeple, ilk olarak yapıların sahip olduğu malzeme sönümü ve ölçüm yöntemleri hakkında genel bilgi edinilmeye çalışılmış, daha sonra temas bölgelerindeki kuru sürtünme yüzeylerinde meydana gelen kayma hareketleri incelenmiş ve temas yüzeylerinde meydana gelen bu hareketlerin ne şekilde modellenmeye çalışıldığı araştırılmıştır. Bu araştırma sırasında konunun uygulama alanları da ortaya çıkmıştır. Son olarak, çalışmanın asıl konusunu oluşturan, temas parametrelerinin ölçülmesi amacıyla gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar konusunda bilgi edinilmesi için şimdiye kadar yapılan çalışmalar arasından bu çalışmaya yararlı olabilecekleri seçilmiş ve ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.2 Malzeme Sönümü

Titreşim halindeki bir yapıdan atılan enerji sönüm olarak isimlendirilir. Burada atılan enerji terimi ile anlatılmak istenen, yapıdaki mekanik enerjinin, enerjinin başka bir formuna genellikle de ısı enerjisine dönüşümüdür. Yapının sahip olduğu sönüm miktarının yüksekliği, yapıdaki titreşim ve dolayısı ile gürültü seviyelerinin azalması anlamına gelmektedir. Bu sebeple, yapının sahip olduğu sönüm miktarının ölçülebilmesi, yapının titreşim açısından karakterinin ortaya konması açısından önemlidir. Zaman ve frekans tabanında uygulanabilen çeşitli sönüm ölçüm yöntemleri mevcuttur. Bunlardan en önemlileri aşağıda açıklanmıştır;

Logaritmik azalma metodu

Zaman tabanında en çok kullanılan yöntem olan bu ölçüm metodunda, malzeme sönümü ölçülecek olan yapı ani darbe şeklinde tahrik edilerek, elde edilen zaman tabanındaki titreşim cevabı kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de ani darbe şeklinde tahrik edilen bir yapının serbest titreşim cevabı görülmektedir.



Şekil 2.1 : Ani darbe şeklinde tahrik edilen bir yapının serbest titreşim cevabı [7].

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{X_1}{X_n} \right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.1)$$

Küçük sönüm değerlerine sahip yapılar için ise;

$$\delta = 2\pi\zeta \quad (2.2)$$

Burada, δ : logaritmik azalma katsayısı ve ζ : sönüm oranıdır.

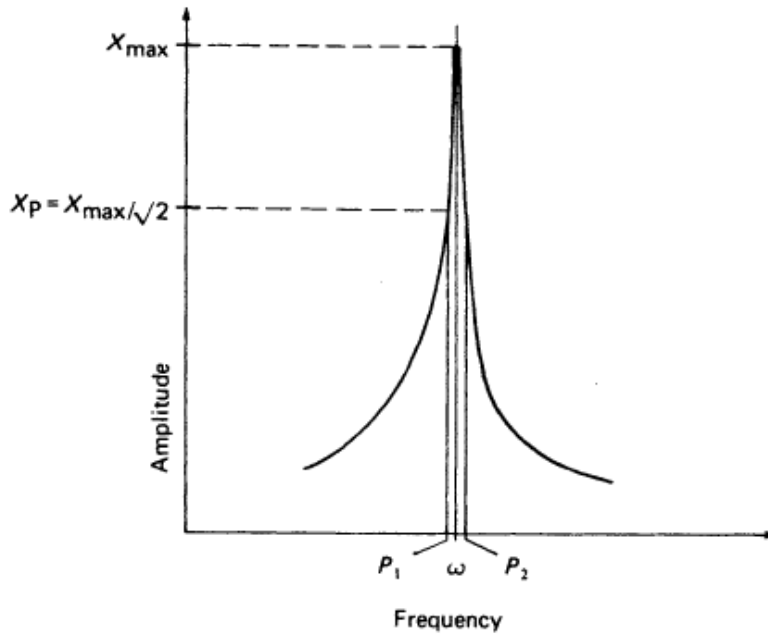
Ancak bu yöntem ile sadece ana mod'a ait sönüm değeri elde edilebilmektedir. Diğer mod'lar ana mod'a göre çok daha hızlı sönümlendiği için sadece ana modun serbest titreşim cevabı baskın olmakta ve bu şekilde de sadece ana mod'a ait sönüm değeri hesaplanabilmektedir.

Bant genişliği metodu

Frekans tabanında en çok kullanılan yöntem olan bu ölçüm metodunda, malzeme sönümü ölçülecek yapı, sönüm değerinin ölçülmesinin planlandığı doğal frekans değerlerini içeren frekans aralığında tahrik edilir. Şekil 2.2'dekine benzer şekilde elde edilen frekans tepki fonksiyonu kullanılarak, aşağıdaki denklem yardımıyla sönüm oranı hesaplanır

$$\frac{P_2 - P_1}{\omega} = \frac{\Delta\omega}{\omega} = 2\zeta \quad (2.3)$$

Şekil 2.2'de görülen frekans tepki fonksiyonunun tepe noktasındaki maksimum genliği ($X_{\max}$) belirlendikten sonra, $X_{\max}/(2^{1/2})$ genlik değerine karşılık gelen frekans noktaları (P_1 ve P_2) bulunur.



Şekil 2.2 : Malzeme sönümü ölçülecek yapı üzerinden elde edilen frekans tepki fonksiyonu [7].

Logaritmik azalma metoduna göre bant genişliği metodu, özellikle farklı doğal frekanslarda malzeme sönümünün hesaplanmasını içeren bu çalışma için kısmen daha kullanışlıdır. Ancak bu çalışma kapsamında malzeme sönümünün elde edilmesi

için yapılacak modal test çalışmaları, LMS firmasına ait test lab yazılımı kullanılarak yapılacaktır. Bu sebeple, modal test sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonlarından malzeme sönümünün elde edilebilmesi için yukarıda bahsedilen yöntemler yerine test lab yazılımı içerisinde gömülü olarak bulunan polymax yazılımının kullanılması tercih edilmiştir. Böylece modal test ve sönüm hesabının tek bir paket program kullanılarak gerçekleştirilmesi ve tüm ölçüm ile hesaplamaların piyasada gerçekleştirilebilecek şekilde pratik ve uygulanabilir olması amaçlanmıştır.

Sönüm değerinin belirtilmesi için literatürde farklı tanımlar mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılan iki tanesi sönüm oranı ve kayıp faktörüdür. Kayıp faktörü aşağıdaki bağıntı ile elde edilir;

$$\eta = \frac{E_D}{2\pi E_T} \quad (2.4)$$

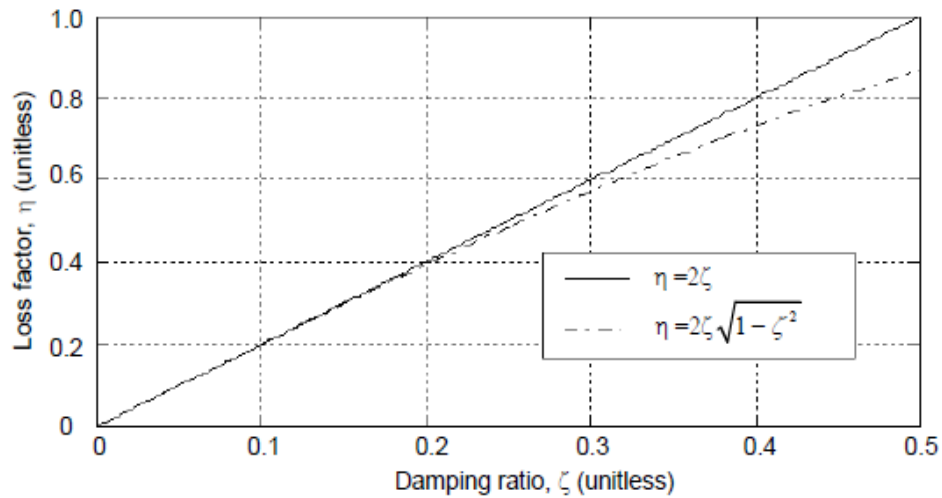
Burada, E_D : Bir periyot boyunca atılan enerji, E_T : Depolanan toplam mekanik enerjidir.

η : kayıp faktörü ve ζ : sönüm oranı olmak üzere aralarındaki ilişki aşağıdaki gibidir;

$$\eta = 2\zeta\sqrt{1-\zeta^2} \quad (2.5)$$

Şekil 2.3'den görüldüğü üzere $0 \leq \eta \leq 0.3$ aralığında kayıp faktörü ile sönüm oranı arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\eta = 2\zeta \quad (2.6)$$



Şekil 2.3 : Sönüm oranı ve kayıp faktörü arasındaki ilişki [8].

Sönüm meydana getiren kaynaklar literatürde çeşitli şekillerde ayrıntılı olarak sınıflandırılmaktadırlar. Aşağıdaki gibi yapılan basit bir sınıflandırma ise sönümün hangi kaynaklardan meydana gelebileceği konusunda açıklayıcı olabilir;

- Doğal olan sönüm kaynakları
 - Malzeme sönümü
 - Sürtünme sönümü
 - Diğerleri (Akışkan kaynaklı vb.)
- Sonradan eklenebilen sönüm kaynakları

Tüm malzemeler kendi iç yapılarındaki deformasyonlardan dolayı belirli bir miktarda sönüm özelliğine sahiptirler. Geleneksel yapısal malzemeler genellikle küçük sönüm değerlerine sahiptirler ve sönüm açısından önem arzetmezler. Ancak yüksek sönüm alaşımları olarak bilinen bazı özel malzemeler ise oldukça yüksek miktarda sönüm özelliği sergilerler ve bu amaçla kullanılmaktadırlar. Malzemelerin sönüm değerlerinin sıcaklık, uygulanan gerilme ve uygulanan ısı işlem gibi birçok parametreye bağlı olduğu bilinmesine rağmen, malzemelerin sahip oldukları sönüm değerleri yaklaşık olarak ölçülebilmektedir. Çizelge 2.1’de bazı mühendislik malzemelerine ait kayıp faktörü değerleri görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Bazı mühendislik malzemelerine ait kayıp faktörü değerleri [7].

Material	Loss factor
Aluminium – pure	0.00002–0.002
Aluminium alloy – dural	0.0004–0.001
Steel	0.001–0.008
Lead	0.008–0.014
Cast iron	0.003–0.03
Manganese copper alloy	0.05–0.1
Rubber – natural	0.1–0.3
Rubber – hard	1.0
Glass	0.0006–0.002
Concrete	0.01–0.06

Yapıların sahip olduğu malzeme sönümün çok düşük olması sebebiyle, gerçek yapılarda meydana gelen sönümün çoğu yapısal temas yüzeyleri arasında meydana gelir. Düşük malzeme sönümüne sahip malzemelerden yapılmış birkaç parçanın cıvata, somun veya perçin ile birleştirilmesi durumunda oluşacak sürtünmeli temas

alanlarından kaynaklanan sönüm değeri, genellikle malzeme sönümünden daha yüksek olmaktadır. Ancak sürtünme durumunda gerçekleşen sönüm mekanizmasının oldukça kompleks olmasından dolayı bu konuda yeterince çaba harcanmamıştır.

Çizelge 2.1'den özellikle alüminyum ve alaşımları ile çelik malzemesinin sönüm değerlerinin oldukça küçük olduğu görülmektedir. Bu malzemelerden yapılmış bir parçanın su içerisinde titreşim yapması durumunda, suyun sağlayacağı sönüm bu malzemelerin iç sönümünden çok daha fazla olacaktır. Ayrıca düşük yoğunluklu malzemelerden yapılmış, hafif olan ve düşük malzeme sönümüne sahip yapılarda özellikle yüksek genlikli titreşim durumu mevcut ise hava tarafından sağlanan sönüm oldukça önemli olmaktadır. Böylece su ve hava gibi akışkanlar ile temas durumu nedeniyle meydana gelen sönüm değerlerinin de toplam yapısal sönüm içerisinde önemli bir yer kapladığı açıktır.

Yapının sahip olduğu iç sönümün yeterli olmadığı durumlarda, yapıya titreşim sönümleyici eklenmesi veya yapının tamamının yada bir kısmının yüksek sönüm özelliğine sahip malzemelerden üretilmesi yoluyla sönüm özelliği artırılabilir. Yüksek sönüm özelliği göstermeleri amacıyla geliştirilen özel alaşım malzemeleri bu amaçla kullanılmaktadırlar. Sönüm açısından kazanç sağlamalarına rağmen direngenlik, gerilme, işlenebilirlik ve maliyet açısından gerekli özellikleri göstermemeleri nedeniyle kullanımları genellikle uygun olmayıp, çoğunlukla uzay ve havacılık alanında yararlı olabilmektedirler. Yine kompozit malzemeler de uygun malzemelerden ve uygun şekillerde üretildiklerinde yüksek sönüm özelliği gösterebilirler. Viskoelastik sönüm pek çok polimer malzemede meydana gelmekte ve bu iç sönüm makine ile yapılarda titreşim kontrolü için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat sıcaklık ve frekans, sönüm karakteristikleri üzerinde oldukça etkilidir. Polimer malzemeler sahip oldukları rijitlik eksikliğinin giderilmesi için genellikle metal gibi rijit malzemeler ile beraber katmanlar şeklinde kullanılırlar.

2.3 Kuru Sürtünme Modelleri ve Uygulama Alanları

Literatürde yapılan araştırmadan sonra, kuru sürtünme sönümü çalışmalarının basitçe aşağıdaki gibi sınıflandırılması durumunda konunun daha rahat anlaşılacağı düşünüldü;

- Coulomb kuru sürtünme modeli
- Makro-kayma kuru sürtünme modeli
- Mikro-kayma kuru sürtünme modeli

ve

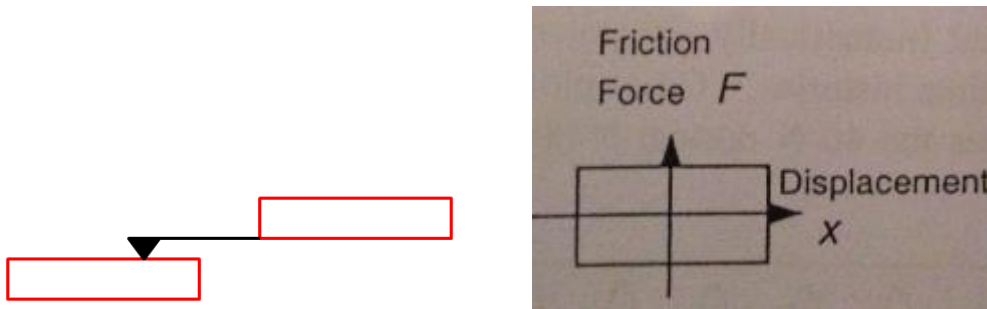
- 1 boyutlu kayma hareketi
- 2 boyutlu kayma hareketi
- 3 boyutlu kayma hareketi

En basit temas modeli Coulomb kuru sürtünme modeli olarak bilinir: sürtünme kuvveti kritik limit değeri aşmadan, temas noktaları birbirlerine göre hareket etmezler. Den Hartog (1931), Coulomb sürtünme modelini kullanarak, yapıların dinamik davranışı konusunda çalışan en eski araştırmacılardan biriydi [5]. Coulomb sürtünme modelini ifade eden matematiksel gösterim aşağıdaki gibidir;

$$F = \begin{cases} -N\mu & \text{eğer } v > 0 \\ P & \text{eğer } v = 0 \\ N\mu & \text{eğer } v < 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

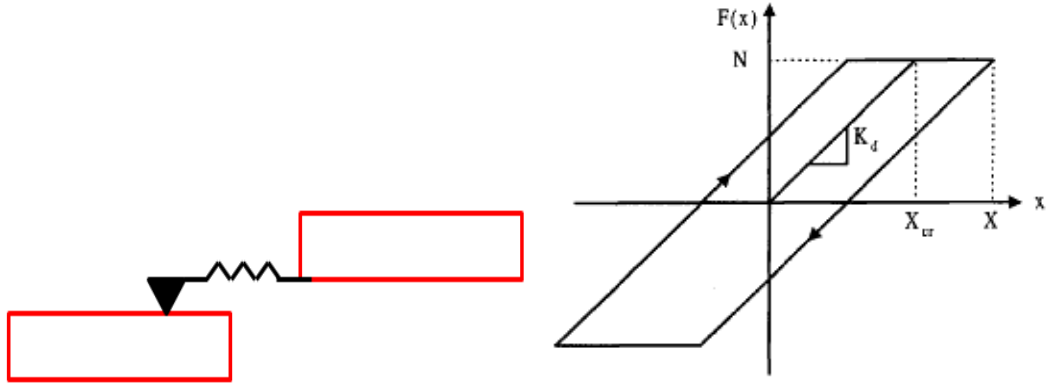
Burada F - sürtünme kuvveti, N – normal kuvvet, μ - sürtünme katsayısı, v – bağlı hareket, P büyüklüğü $N\mu$ değerinden küçük olan yatay dış kuvvettir.

Ferri, A.A ve Bindemann A.C [9], Coulomb kuru sürtünme modelini kullanarak çeşitli konfigürasyonlarda sürtünmeli destek noktalarına sahip esnek kirişlerin sönüm karakteristikleri hakkında çalışmıştır.

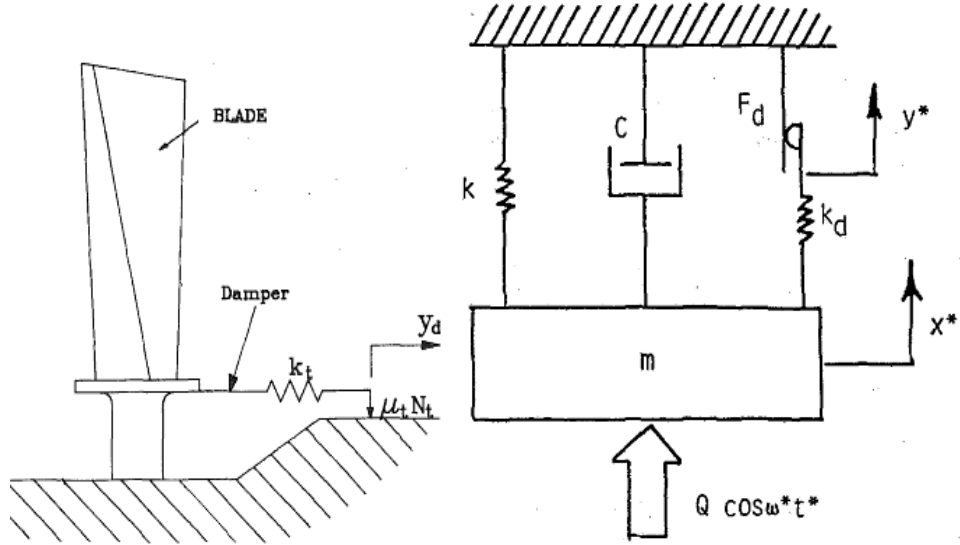


Şekil 2.4 : (a) Coulomb kuru sürtünme modeli (b) Coulomb kuru sürtünme histeresis grafiği [10].

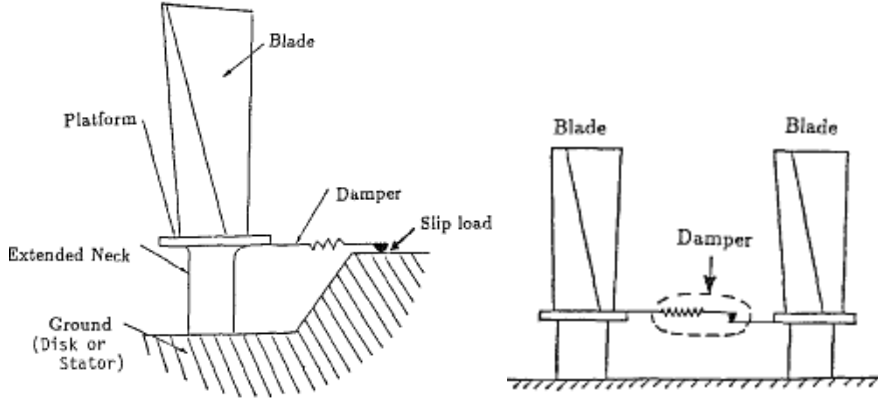
Coulomb kuru sürtünme elemanının bir yay eklenmesi sonucu iyileştirilmesiyle elde edilen model makro-kayma modeli olarak adlandırılır. Bu model kullanılarak, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de de bazı örneklerin görüldüğü üzere pek çok çalışma yapılmıştır [11-16], [5].



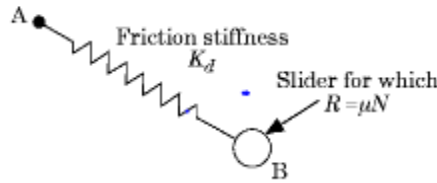
Şekil 2.5 : (a) Makro-kayma kuru sürtünme modeli (b) Makro-kayma kuru sürtünme histeresis grafiği [4].



Şekil 2.6 : (a) Sürtünme sönümleyici (makro-kayma modeli) ile türbin kanadının şematik görüntüsü [13] (b) Sürtünme sönümleyici (makro-kayma modeli) ile türbin kanadı için kullanılan model [12].



Şekil 2.7 : Kanat-disk ve kanat-kanat arasında yer alan sürtünme sönümleyici çeşitleri (makro-kayma şeklinde modellenmişler) [16].



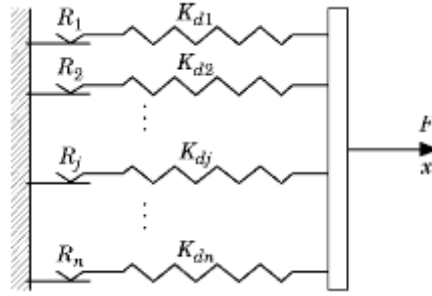
Şekil 2.8 : İki boyutlu makro-kayma kuru sürtünme modeli [5].

Şanlıtürk, K. Y. ve diğerleri [5], kuru sürtünme yüzeylerinin iki boyutlu davranışını modellemek için yaptıkları çalışmada, iki boyutlu makro-kayma kuru sürtünme elemanını anlaşılır bir şekilde açıklamışlardır; Şekil 2.8’de görülen A ve B noktaları, başlangıçta çakışık olan temas halindeki iki noktayı temsil etmektedir. Eğer B noktasına uygulanan kuvvet, kritik değer (μN)’den küçük olursa, B noktası hareket etmeyecektir. Ancak A noktası B noktasından uzaklaşırsa ve B noktasına gelen kuvvet kritik değeri aşarsa, B noktası A noktasına doğru hareket edecektir ve sürtünme kuvveti bu değerde sabit kalacaktır. Yani A ve B noktası arasındaki mesafe, kritik değer ($\mu N/K_d$)’den küçük kaldığı sürece, B noktası hareket etmeyecektir. Eğer A noktası B noktasından uzaklaşıp ve aralarındaki mesafe kritik değeri aşarsa, B noktası A noktasına doğru hareket edecektir.

Temas durumunda olan yüzeylerdeki pürüzlülük nedeniyle temas yüzeyinin bir kısmı kayarken, geri kalan kısmı kayma olmadan, yapışmış olarak durmaktadır. Bu durumu modellemek için kullanılan elemanlar, mikro-kayma kuru sürtünme modeli olarak adlandırılır. Sadece bütünsel kayma yapan bir temas durumuna göre, kısmi kayma

hareketinin de (sürtünme yüzeyindeki pürüzlülüklerin bir kısmının kaydığı, geri kalanının kaymadığı temas durumu) yer aldığı bir kuru sürtünme durumu, rezonans genliklerini önemli ölçüde düşürmektedir [17]. Şanlıtürk, K. Y. ve diğerleri [5], kuru sürtünme yüzeylerinin iki boyutlu davranışını modellemek için yaptıkları çalışmada, ilk önce bir boyutlu mikro-kayma kuru sürtünme elemanını anlaşılır bir şekilde açıklamışlardır; Şekil 2.9’da görüldüğü üzere paralel bağlı makro-kayma elemanları mikro-kayma kuru sürtünme modelini oluşturur. Eğer paralel bağlı makro-kayma elemanlarının her biri, temas alanının belli bir bölgesini temsil ediyor şeklinde düşünülürse, temas alanının bazı bölgeleri elastik rejimde olması nedeniyle uygulanan kuvvet’i taşıyabilirken geri kalan kısmı kaymaktadır.

$$F(x) = \sum_{j=1}^{n'} R_j + (\sum_{j=n'+1}^n K_{dj})x \quad (2.8)$$



Şekil 2.9 : Bir boyutlu mikro-kayma kuru sürtünme modeli [5].

Mikro-kayma eleman için kuvvet – deplasman arasındaki ilişki yukarıdaki gibi yazılabilir. Denklem’in ilk parçası, 1 – n’ tüm kayan elemanları temsil ederken, ikinci parçası, n’+1 – n elastik olarak davranan yani izafi hareket yapmayan elemanları temsil etmektedir. Bu durumda efektif direngenlik, verilen x deplasmanında kaymayan elemanların oluşturduğu toplam direngenlik kadardır. Böylece Şekil 2.9’a bakıldığında da anlaşılabileceği üzere, x deplasmanı arttıkça kayan elemanların sayısı artmakta ve efektif direngenlik düşmektedir. Şekil 2.10’da ise mikro-kayma durumunu modelleyebilmek için kullanılan makro-kayma elemanı sayısının mikro-kayma davranışı temsil etmesi konusundaki etkisi görülmektedir. Makro-kayma eleman sayısı arttıkça, mikro-kayma davranışın daha hassas bir şekilde temsil edilebildiği görülmektedir.

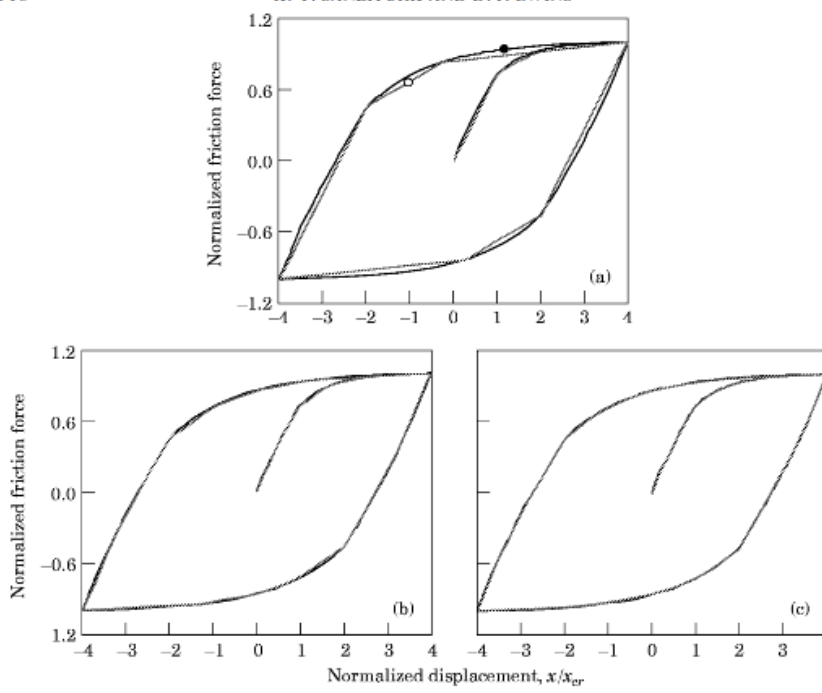


Figure 8. Correct (—●—) and approximate (---○---) loading curves and hysteresis loops (number of macro-slip elements: (a) 3; (b) 7; (c) 10).

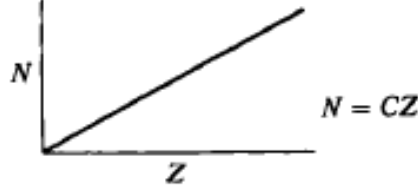
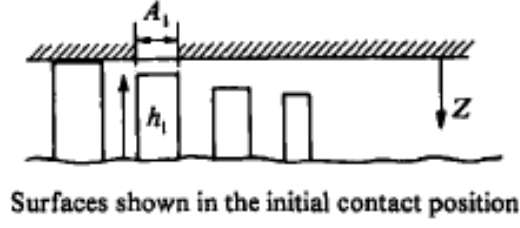
Şekil 2.10 : Makro-kayma eleman sayısının mikro-kayma davranışın temsil edilmesi üzerine olan etkisi [5].

Rogers, P. F. ve Boothroyd, G. [18] tarafından yapılan çalışmada, deneysel olarak elde edilen histeresis grafikler, aşağıda verilen denklem kullanılarak sayısal olarak yeniden türetilmiştir;

$$F = F_s \left(1 - e^{\frac{-Kx}{F_s}} \right) \quad (2.9)$$

Burada F – yatay kuvvet, F_s – bütünsel kayma durumundaki yatay kuvvet, x – deplasman, K – izafi hareket sıfır iken kuvvet/deplasman grafiğindeki eğimdir.

Burdekin, M. ve diğerleri [19], yatay ve normal doğrultularda kuvvetlerin etkisi altında olan temas yüzeylerinde meydana gelen mikro-kayma hareketlerini açıklayabilmek için, basit bir yüzey modeli önermişlerdir. Bu model, temas durumunun elastik rejimde olduğunu kabul eder.



Şekil 2.11 : Burdekin, M. ve diğerleri tarafından mikro-kayma hareketleri karakterize etmek için önerilen yüzey modeli (N: temas halindeki çubukların sayısı) [19].

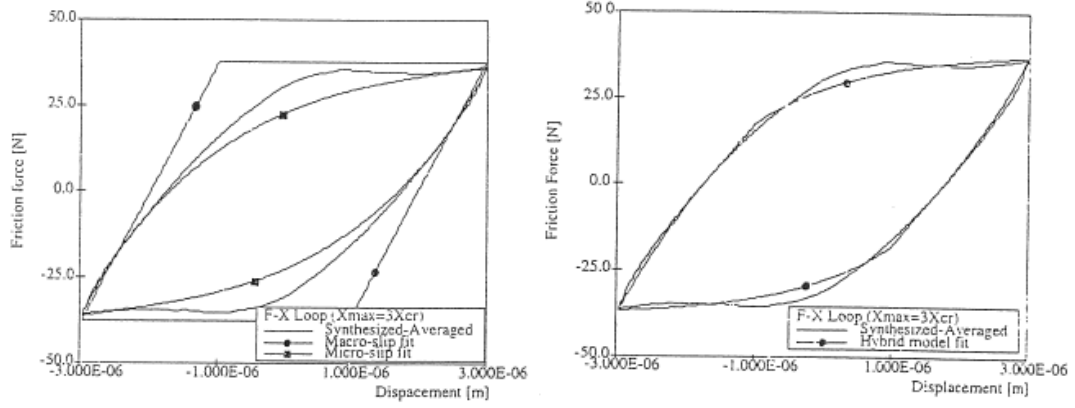
Şekil 2.11’den görülebileceği üzere, bu çalışmada mikro-kayma hareketlere neden olan yüzey pürüzlülükleri, eşit direngelik değerlerine sahip bir dizi prizmatik çubuk olarak olarak temsil edilmiştir ve temas halindeki prizmatik çubukların sayısı, iki yüzeyin birbirlerine yaklaşmasıyla beraber lineer olarak artmaktadır. Böylece yapılan çalışmada, normal yük uygulandıktan sonra, temas halinde olan yani normal yük’ü taşıyan çubuk sayısı belirlenmiş ve her bir çubuk tarafından taşınan normal kuvvet ile orantılı olarak, her bir çubuğun elastik rejimden çıkacağı kritik kuvvet belirlenmiştir. Bu durumda yatay kuvvet uygulandığında aktif yay gibi davranmaya devam edecek veya elastik rejimden çıkarak kaymaya başlayacak çubukların sayısı belirlenerek, mikro-kayma hareketler için yatay kuvvet karakteristiği belirlenmiştir.

Coulomb kuru sürtünme modeli ile beraber temas yüzeylerinde meydana kayma hareketlerinin modellenmesi için en çok bilinen elemanlar makro-kayma ve mikro-kayma modelleri olsa da, Şanlıtürk, K. Y. ve diğerleri [20] klasik mikro-kayma ve makro-kayma modellerinin bir kombinasyonu olan hibrid matematik modeli önermişlerdir. Model basitçe makro-kayma ve mikro-kayma modellerinin yükleme eğrilerinin lineer kombinasyonu olarak açıklanabilir;

$$F_{hyb}(x) = \left(e^{-\beta \frac{x}{x_{crt}}} \right) F_{mic}(x) + \left(1 - e^{-\beta \frac{x}{x_{crt}}} \right) F_{mac}(x) \quad (2.10)$$

$F_{hyb}(x)$	: Hibrid model için yükleme eğrisi
$F_{mic}(x)$	: Mikro-kayma model için yükleme eğrisi : $\mu N(1-e^{-\gamma x})$
$F_{mac}(x)$	: Makro-kayma model için yükleme eğrisi : $K_d x$ eğer $x < x_{crt}$ μN eğer $x \geq x_{crt}$
K_d	: Temas direngenliği
N	: Normal kuvvet
x	: Bağıl deplasman
x_{crt}	: Makro-kayma model için kritik deplasman
β	: Deneysel verilerden elde edilen katsayı
γ	: Mikro-kayma parametresi
μ	: Sürtünme katsayısı
$\left(e^{-\beta \frac{x}{x_{crt}}}\right)$	: Mikro-kayma ağırlığı
$\left(1 - e^{-\beta \frac{x}{x_{crt}}}\right)$	: Makro-kayma ağırlığı

Makro-kayma parametreleri; K_d (sıfır deplasman anındaki temas direngenliği) ve μN (limit sürtünme kuvveti) deneysel olarak elde edilen yükleme eğrisinden kolayca elde edilebilir. Mikro-kayma parametreleri ise yine deneysel olarak elde edilen yükleme eğrisinden hesaplanabilir; ($\gamma=K_d/\mu N$). Böylece $F_{mic}(x)$ ve $F_{mac}(x)$ tamamen bilinmektedir. Hibrid modeli tanımlamak için elde edilmesi gereken tek parametre olan β ise deneysel veriden elde edilir. Dikkat edilirse $\beta=0$ olduğunda hibrid model mikro-kayma model olarak davranır, büyük β değerlerinde ise makro-kayma model olarak davranır. Şekil 2.12 (a) incelendiğinde, ölçülen verinin makro-kayma veya mikro-kayma model ile modellenemediği görülmektedir. Özellikle bağıl deplasmanın mikro-kayma bölgeden, bütünsel kayma bölgesine geçtiği sırada ölçülen veri ile makro-kayma ve mikro-kayma model arasında önemli farklar olduğu görülmektedir. Şekil 2.12 (b) hibrid model'in ölçülen veriyi en iyi temsil eden model olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.12 : (a) Deneysel veri ile makro-kayma ve mikro-kayma modelin karşılaştırılması (b) Deneysel veri ile hibrid modelin karşılaştırılması [20].

Şanlıtürk, K. Y. ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [4], sürtünmeli sönümleyicilerin analizinde, sürtünmeden kaynaklanan sönümleme ve optimizasyonu için frekans alanında bir yaklaşım önerilmektedir. Bu yaklaşım, lineer olmayan sürtünmeli sönümleyicileri, genliğe bağımlı eşdeğer kompleks bir yay olarak kabul etmektedir. Böylece nonlineer bir davranış gösteren sürtünme kuvveti, lineerleştirilmiş genliğe bağımlı kompleks direngenlik olarak elde edilmiştir. Sürtünme elemanının non-lineer kuvvet-deplasman ilişkisi;

$$F = F(x) \quad (2.11)$$

Harmonik titreşim;

$$x = X \cos \omega t = X \cos \theta \quad (2.12)$$

olduğu varsayılmaktadır. Sürtünme elemanının lineerleştirilmiş direngenlik katsayısı (2.13)'teki gibi yazılabilir;

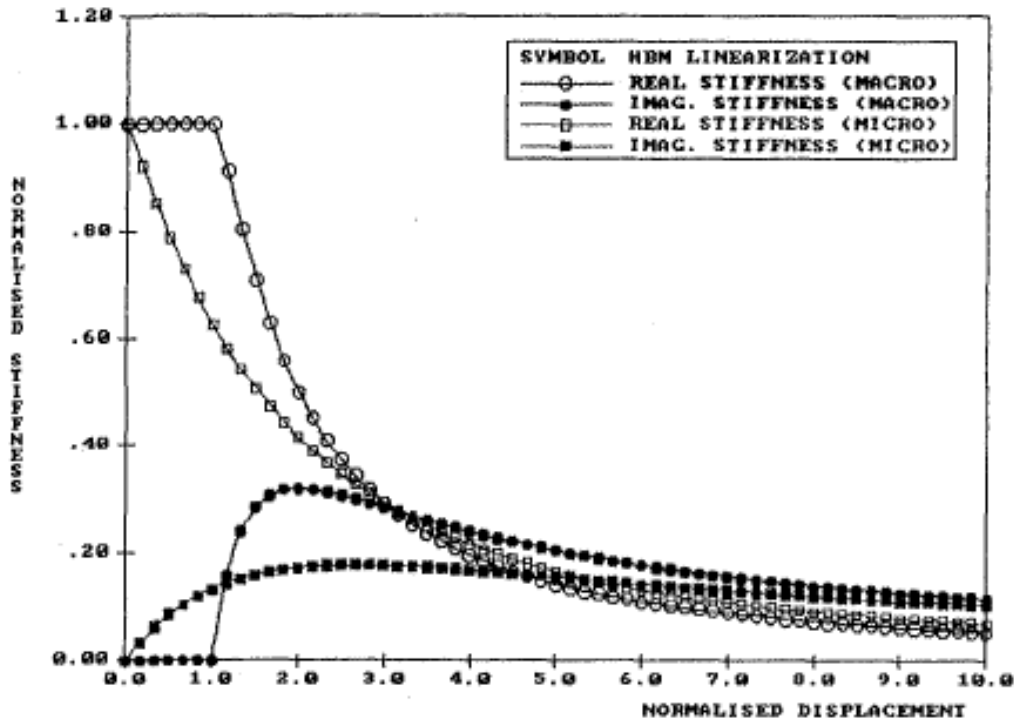
$$k_{eq}^* = k_{eq}^r(X) + k_{eq}^{im}(X) \quad (2.13)$$

Burada $k_{eq}^r(X)$ ve $k_{eq}^{im}(X)$ sırasıyla eşdeğer direngenliğin reel ve imajiner kısımlarıdır. Sürtünme kuvvetinin ilk harmonik bileşeninin eşdeğer direngenlik cinsinden hesaplanması amacıyla birinci derece harmonik denge metodu uygulanırsa;

$$k_{eq}^r(X) = \frac{1}{\pi X} \int_0^{2\pi} F(X \cos \theta) \cos \theta d\theta \quad (2.14)$$

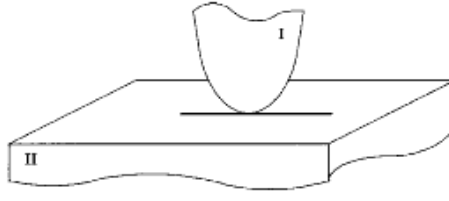
$$k_{eq}^i(X) = \frac{-1}{\pi X} \int_0^{2\pi} F(X \cos \theta) \sin \theta d\theta \quad (2.15)$$

Makro-kayma ve mikro-kayma model kullanılması sonucu eşdeğer direngenliğin reel ve imajiner parçalarının temas yüzeyleri arasındaki bağıl deplasmana göre değişimi Şekil 2.13’de verilmiştir. Şekil 2.13’den görülebildiği üzere yatay ve dikey eksenler için normalize edilmiş değerler verilmiştir. Eşdeğer direngenliğin reel parçası yay kuvvetini yani depolanan enerjiyi temsil etmektedir. İmajiner kısım ise sönüm kuvvetini yani temas yüzeyinde ısı enerjisine dönüşen enerjiyi temsil etmektedir. Beklenildiği üzere mikro-kayma modeli tüm deplasmanlarda imajiner kısma sahip iken, makro-kayma modeli sadece kritik deplasman geçildikten sonra yani temas yüzeyleri birbirleri üzerinde bütünsel şekilde kaymaya başladıktan sonra imajiner kısma sahiptir.



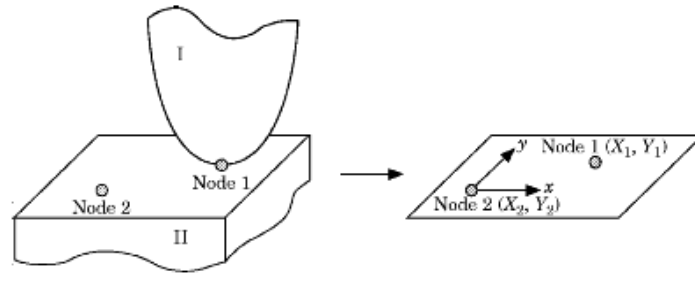
Şekil 2.13 : Makro-kayma ve mikro-kayma sürtünme modelleri için, sürtünme kuvvetini temsil eden eşdeğer direngenliğin reel ve imajiner kısımlarının bağıl deplasmana göre değişimi [4].

Kuru sürtünme yüzeyleri konusunda yapılan araştırmaların çoğunluğu temas hareketinin bir boyutlu (1-D) olduğu durumlar hakkındadır. Hareketin bir boyutlu olması; Şekil 2.14’de gösterildiği gibi temas noktasının düz bir çizgi boyunca ileri geri hareket etmesidir.



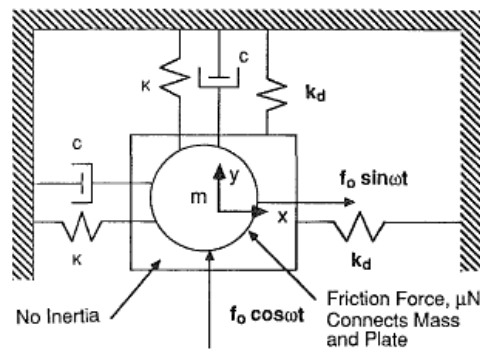
Şekil 2.14 : Bir boyutlu (1-D) sürtünme sönümleyici modeli [21].

Daha önce de söylenildiği üzere, kuru sürtünme yüzeyleri hakkındaki çalışmaların çoğunluğunu temas hareketlerinin bir boyutlu hareketi için yapılan çalışmalar oluştursada, örneğin turbomakine uygulamalarında bu kabul her zaman geçerli değildir [5]. Şekil 2.15’de iki boyutlu sürtünme sönümleyici modeli ve 2-D hareket için lokal koordinat sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.15 : (a) İki boyutlu (2-D) sürtünme sönümleyici modeli (b) 2-D hareket için lokal koordinat sistemi [5].

Griffin, J. H. ve Menq, C.H. [22], kuru sürtünme yüzeyinde meydana gelen iki boyutlu hareketin dairesel olma durumunu çalışmışlardır. Söz konusu çalışma, temel olarak 1980 yılında Griffin, J. H. [15] tarafından gerçekleştirilen çalışmanın iki boyutlu versiyonudur. Şekil 2.16'dan görülebileceği üzere makro-kayma elemanı kullanılmıştır.

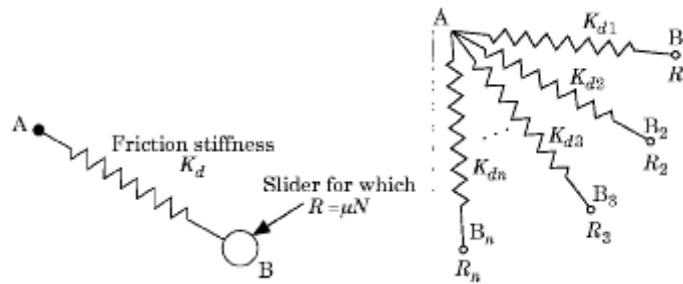


Şekil 2.16 : Çalışmada kullanılan dinamik sistem [22].

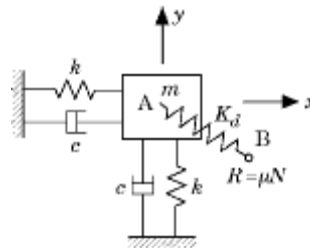
Çalışma [22] sonucu, dairesel hareket ile lineer hareket sonuçları karşılaştırılmış ve dairesel hareket etmeyle, yani diğer bir yönde de sistemin tahrik edilmesiyle, titreşim genliklerinde lineer harekete göre düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise, dairesel harekette, lineer hareketin her periyodunda gözlemlenen kayma-yapışma durumu yerine, devamlı kayma hareketi meydana gelmesidir. Yapılan çalışma ile, tek boyut ve iki boyutta gerçekleşen hareketlerin birbirlerinden oldukça farklı olduğu gösterilmiştir.

Daha sonra Menq, C. H. ve diğerleri [23], temas noktalarının eliptik olarak hareket etmesi durumunda iki boyutlu hareketi çalışmışlardır.

Şanlıtürk, K. Y. ve diğerleri [5] tarafından 1995 yılında yapılan çalışma, Menq, C. H. ve diğerleri [23] tarafından yapılan çalışmanın devamı niteliğindedir. Bu çalışma, diğer çalışmanın [23] aksine, hem makro-kayma, hem de mikro-kayma modelleri kullanılarak yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir. Çalışmada kullanılan 2-D makro-kayma ve mikro-kayma kuru sürtünme modelleri Şekil 2.17’de görülmektedir. Ayrıca iki boyutlu temas problemleri için matematik olarak daha basit olduğu söylenebilir. Çalışmada [5] kullanılan iki serbestlik dereceli sistem Şekil 2.18’de görülmektedir.

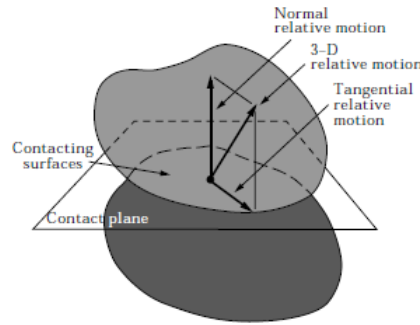


Şekil 2.17 : (a) İki boyutlu (2-D) makro-kayma kuru sürtünme modeli (b) İki boyutlu (2-D) mikro-kayma kuru sürtünme modeli [5].



Şekil 2.18 : Çalışmada kullanılan iki serbestlik dereceli sistem ve 2-D makro-kayma modeli [5].

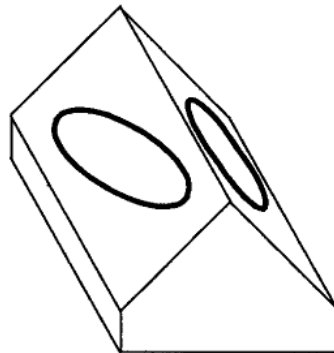
Daha sonra bu alanda yapılan çalışmalar, üç boyutlu (3-D) hareket düşünülerek tekrarlanmıştır. B. D. Yang ve diğerleri [24] yaptıkları çalışmada, iki temas yüzeyi arasındaki bağıl hareketi iki komponent şeklinde tanımlamışlardır; yatay komponent: temas düzlemindeki bağıl hareket ve normal komponent: temas yüzeyine dik doğrultudaki bağıl hareket. Fakat bu çalışmada, Şekil 2.19'dan görülebileceği üzere 3-D temas dinamiğinin basitleştirilmiş versiyonu çalışılmıştır. Bağıl hareketin normal komponenti aynen kalırken, yatay komponent ise sadece gidip-gelme hareketi yapmaktadır.



Şekil 2.19 : 3-D hareketin gerçekleştiği temas dinamiği [24].

Daha sonra Yang, B. D. Ve Menq, C. H. [24], bağıl hareketin yatay komponentinin 2-D hareket ettiği durumu göz önüne alarak çalışmayı [24] tekrarlamışlardır.

2001 yılında Şanlıtürk, K. Y. ve diğerleri [6], üç boyutlu sürtünme sönümleyici modeli ve iki boyutlu temas hareketini içeren çalışmalarında, mikro-kayma modeli kullanmışlardır. Çalışmada [6], sürtünme sönümleyicinin yaptığı 2-D hareket Şekil 2.20'de gösterilmiştir.

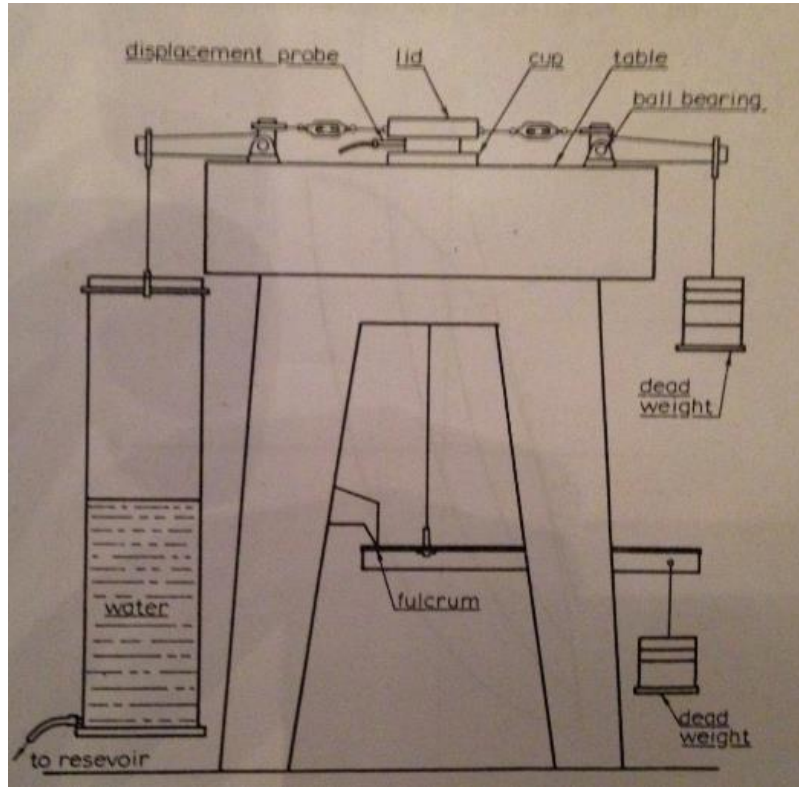


Şekil 2.20 : Sürtünme sönümleyicinin platform üzerinde yaptığı deplasmanlar [6].

Liu, Y. ve diğerkleri [25] yaptıkları çalışmada, Şanlıtürk, K. Y. ve diğerkleri [5] tarafından yapılan çalışmanın kapsamını genişleterek, temas yüzeyinde normal yönde de bağıl hareket olduğunu kabul etmişlerdir.

2.4 Kuru Sürtünme Deneysel Çalışmaları

1975 yılında Rogers, P. F. ve Boothroyd, G. [27] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Şekil 2.21’de görüldüğü gibi iki metal düz yüzey temas halindedir. Yapılan deneysel çalışmada, yüzeyler üzerine üniform bir basınç dağılımı yaratacak şekilde normal kuvvet ve temas yüzeyi ile aynı düzlemde olacak şekilde periyodik yatay kuvvet uygulanmaktadır. Uygulanan normal kuvvet ve periyodik olarak uygulanan yatay kuvvetin miktarlarının, sürtünme yüzeyinde her bir periyotda meydana gelen enerji kaybına olan etkisi gözlemlenmiştir. Çalışma için yapılan literatür taraması sonucunda, periyodik yatay kuvvet etkiyen metalik sürtünme yüzeylerinde meydana gelen enerji kaybını gösteren deneysel çalışmaların azlığından ve normal kuvvet, sürtünme yüzeyinin kalitesi ile sürtünme yüzeyini oluşturan malzemenin enerji kaybına olan etkisini gösteren deneysel çalışma ihtiyacından bahsedilmiştir.



Şekil 2.21 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [27].

Çalışmada [27] kullanılan test düzeneğinde, sürtünme yüzeyini oluşturan üst parça (lid) ve sürtünme yüzeyini oluşturan alt parça (cup) olarak adlandırılan iki parça, düz ve dairesel bir sürtünme yüzeyi oluşturmuşlardır. Alt parça, cıvatalar yardımıyla altındaki ağır metal tabla'ya bağlanmıştır. Üst parça ise, ölü ağırlık kullanılarak normal yönde yüklenmiştir. Elektromanyetik sarsıcı yardımıyla sürtünme yüzeyi düzleminde, periyodik yatay kuvvet uygulanmıştır. Uygulanan yatay kuvvet, piezoelektrik kuvvet sensörü yardımıyla ölçülmüştür. Normal ve yatay kuvvetlerin her ikisi de, üst parça'nın kütle merkezi düzlemlerinden uygulanmışlardır (Üst parça kütle merkezi ile sürtünme yüzeyi aynı düzlemdedir.). İkisi arasındaki bağıl deplasman, alt parça üzerine rijit bağlanmış, temassız bir kapasitans sensör yardımıyla ölçülmüştür. Kuvvet ve bağıl deplasman verileri osiloskop yardımıyla görüntülenmiş, bu iki veriden kuvvet-deplasman histeresis grafiği elde edilmiş ve bu grafik fotoğraflanarak alan (bağıl deplasmanın her bir periyodunda meydana gelen enerji kaybı ile oransal), maksimum kuvvet ve maksimum deplasman değerleri elde edilmiştir. Testler sırasında elde edilen histeresis grafiklerde, yatay kuvvet verildikten sonra, ilk birkaç saniye içinde maksimum kuvvet ve deplasmanlarda azalma olduğu (aynı zamanda histeresis grafiği alanı) gözlemlenmiştir. Bu sebeple, histeresis grafiklerin stabil bir duruma gelmeleri için yeterli bir süre beklendikten sonra ölçülen veriler dikkate alınmıştır. Çalışmada, yatay kuvvet 5-200 Hz aralığında uygulanmış ve histeresis grafiklerde gözle görülür bir değişiklik yaşanmamıştır. Ancak test düzeneği ve aparatlarının istenmeyen hareketlerinin en aza indirilebilmesi için, testler 5 Hz yatay kuvvet frekansı ile gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında farklı normal yüklerde ölçümlere başlanmadan önce, temas yüzeyleri birbirlerinden ayrılmış ve tekrar birleştirme işlemi yapılmıştır. Böylece tekrarlanabilir sonuçlar alınmasına çalışılmıştır.

1991 yılında Padmanabhan, K. K. ve Murty, A. S. R. [28] tarafından yapılan çalışmada, normal yük ile önceden yüklenmiş, periyodik yatay kuvvetlere maruz, düz ve metalik sürtünme yüzeylerinde meydana gelen enerji kaybı ile ilgili bir dizi deneysel çalışma yapılmış ve sürtünme sönümü üzerinde etkili olan parametreler incelenmiştir. Şekil 2.22'de görülen ve çalışmada [28] kullanılan test düzeneği, Rogers, P. F. ve Boothroyd, G. [27] tarafından yapılan çalışmada kullanılan test düzeneğine benzerdir. Şekil 2.22'de gösterildiği gibi, sürtünme yüzeyini oluşturan alt parça (cup) ve sürtünme yüzeyini oluşturan üst parça (lid), düz ve

daireseel bir sürtünme yüzeyi oluşturmaktadır. Sürtünme yüzeyini oluşturan alt parça, test düzeneğinin en altında yer alan, ağır dökme demirden yapılmış sabit bir desteğe rijid bir şekilde bağlı (cıvatalı bağlantı) ağır dökme demir bir bloğa, güvenli bir şekilde, cıvatalı bağlantı ile bağlanmıştır. Tüm cıvatalı bağlantılar tork anahtarı kullanarak, sabit tork değerlerinde kontrollü olarak yapılmıştır. Sürtünme yüzeyini oluşturan üst parça üzerindeki normal kuvvet, l ağırlık şeklinde oluşturulmuştur. Sürtünme yüzeyini oluşturan üst parça ile normal kuvvet oluşturmak için bağlı olan kolun beraber oluşturdukları kütle merkezleri, sürtünme yüzeyi ile aynı düzlemindedir. Normal kuvvet ve yatay kuvvet'in her ikisi de, sürtünme yüzeyini oluşturan üst parça – kol (lid-rod) ikilisinin kütle merkezinden uygulanmaktadır. Böylece, sadece öteleme hareketi yapılması sağlanmıştır. Sürtünme yüzeyini oluşturan alt parça ve üst parça arasında meydana gelen bağlı deplasman miktarı, hareketli olan üst parça üzerine rijid şekilde bağlı olan, temassız eddy current sensörü tarafından llmektedir. Sürtünme yüzeyi düzleminden uygulanan yatay kuvvet ise, elektrodinamik sarsıcı tarafından sağlanmaktadır. Sarsıcı, en alt kısımda yer alan blok zemine rijid olarak bağlıdır, ancak blok zeminden sarsıcıya bir sarsıntı ulaşmaması için aralarına sönümleyici malzemeler yerleştirilmiştir. Uygulanan sarsıcı kuvveti, yk hücresi tarafından llmektedir. Bağlı deplasman ve yatay kuvvet değerleri, osiloskop tarafından görüntülenmektedir. Çeşitli yatay ve normal kuvvet değerleri için oluşan histeresis grafiklerinden bazıları ekil 2.23'de görülmektedir.

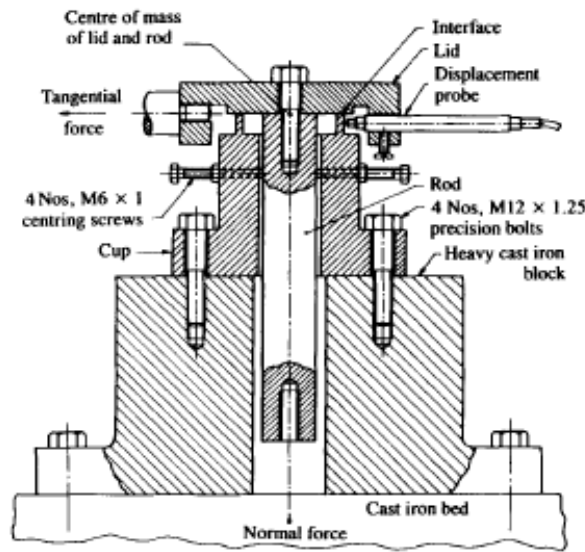
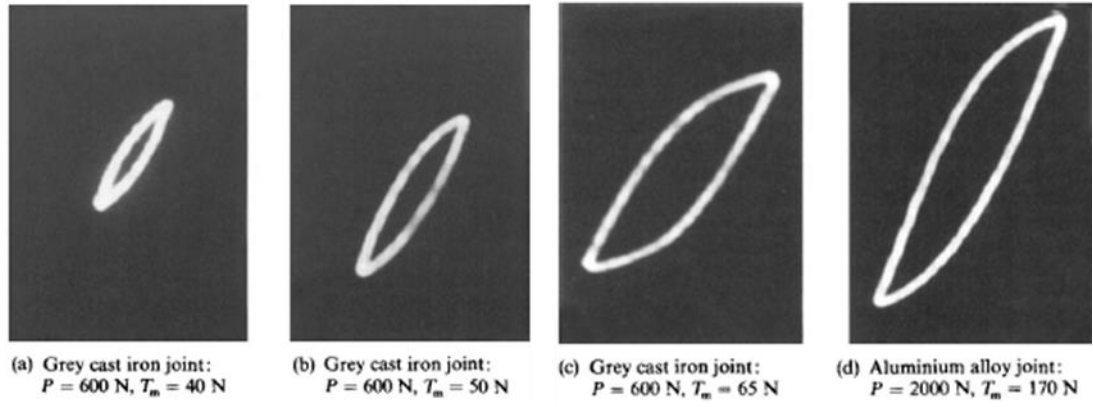


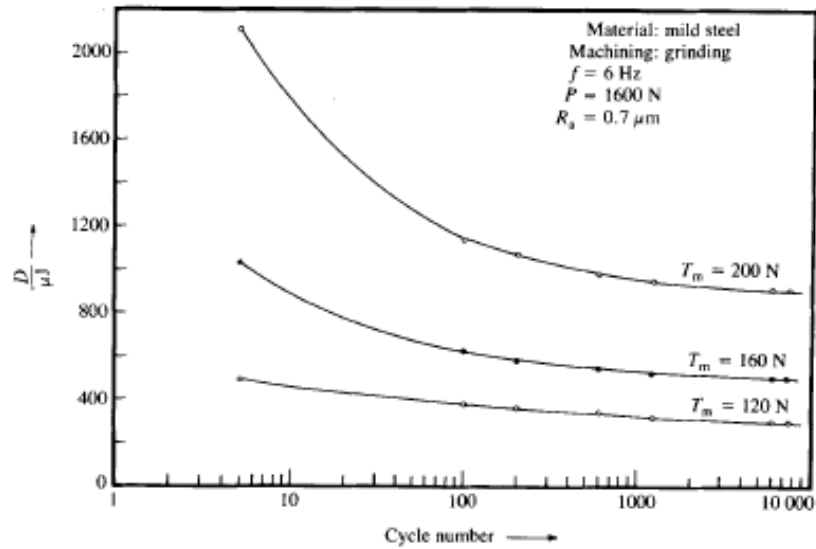
Fig. 2 Cup and lid assembly

Şekil 2.22 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [28].



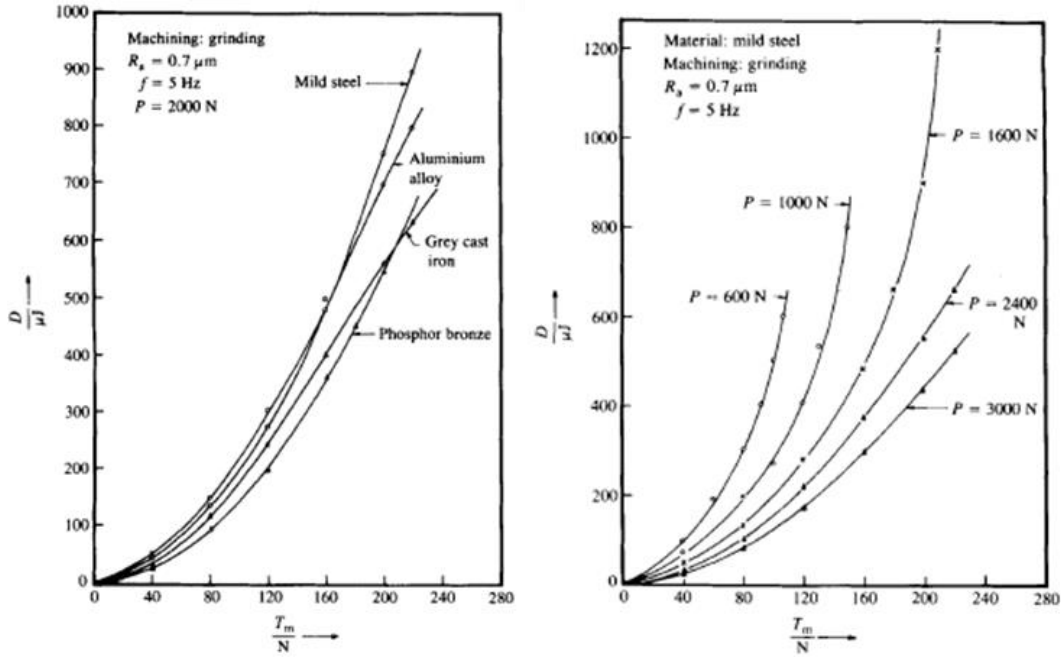
Şekil 2.23 : Çeşitli normal (P) / yatay kuvvet (T_m) için elde edilen histeresis grafikleri [28].

Bu çalışmada da, farklı normal kuvvetler uygulanmadan önce, sürtünme yüzeyini oluşturan parçalar sökülmüş ve tekrar monte edilmiştir. Normal kuvvet uygulandıktan sonra, normal yöndeki deplasmanın oluşmasına izin vermek amacıyla, yatay kuvvet uygulanmadan önce bir süre beklenmiştir. Ayrıca, test düzeneğinin yüksek frekanslardan dolayı oluşabilecek, istenmeyen hareketlerinden uzak durmak için uygulanan yatay kuvvet frekansı 5Hz seçilmiştir. Yapılan ilk denemeler sonucu, Şekil 2.24'den de görülebileceği üzere, 5Hz yatay kuvvet frekansı ile yapılan testlerde histeresis grafiklerinin stabil hale gelebilmesi, Boothroyd ve Roger [27]'in çalışmasında bahsedilenden çok daha fazla zaman almış, yaklaşık olarak 4500 periyotluk bir zaman gerekmiştir. Bu sebeple veri alınmadan önce, yaklaşık 15 dakika histeresis grafiklerinin stabil bir hale gelmesi beklenmiştir.



Şekil 2.24 : Çeşitli yatay kuvvet (T_m) değerleri için periyot ile enerji kaybının değişimi [28].

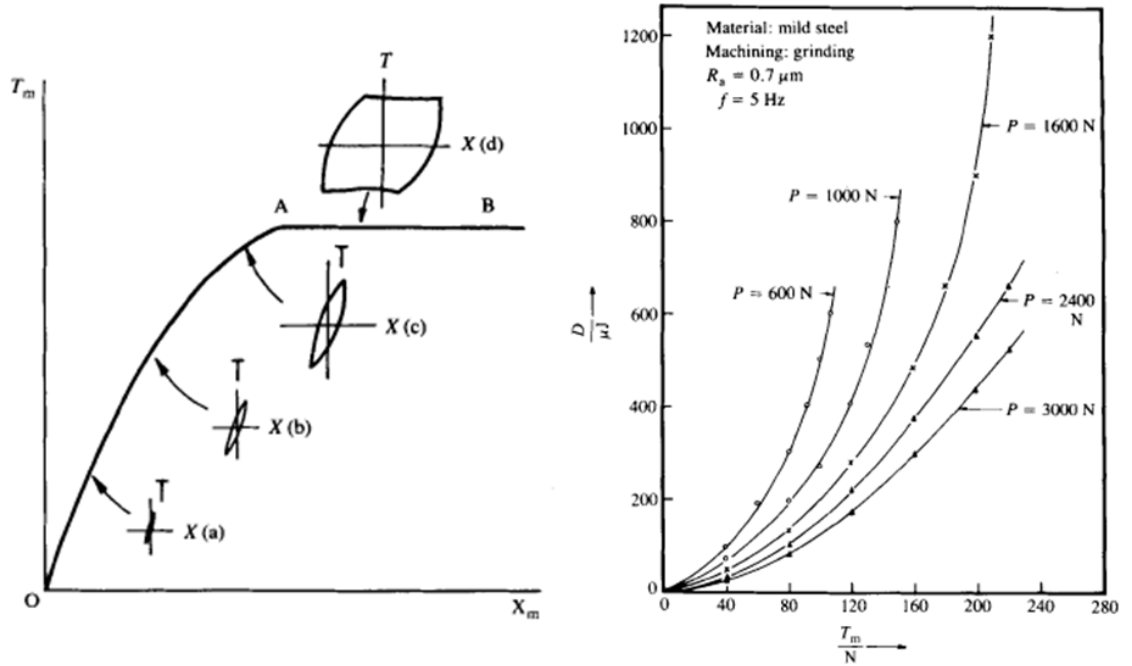
Şekil 2.25 (a) her bir periyot’da meydana gelen enerji kaybının, uygulanan yatay kuvvet ile değişimini göstermektedir. Beklendiği üzere, yatay kuvvet genliği arttıkça, enerji kaybı miktarı da artmaktadır. Şekil 2.25 (b) ise her bir periyot’da meydana gelen enerji kaybının, uygulanan normal kuvvet ile değişimini göstermektedir. Normal kuvvet arttıkça, her bir periyot’da kaybedilen enerji miktarının azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.25 : (a) Çeşitli malzemeler için yatay kuvvet ile enerji kaybı değişimi (b) Çeşitli malzemeler için normal kuvvet ile enerji kaybı değişimi [28].

Bu çalışmada yapılan önemli bir inceleme de, mikro-kayma ve bütünsel kayma bölgelerinin belirlenmesidir. Bu sebeple, önce küçük bir yatay kuvvet uygulanarak testlere başlanmış ve yatay kuvvet yavaşça arttırılmıştır. Şekil 2.26 (a)’dan görülebileceği üzere, maksimum deplasman artan yatay kuvvet ile beraber artmış ve histeresis grafikleri OA bölgesi içerisinde (a), (b) ve (c) formlarında oluşmuştur. Kritik deplasmanın aşıldığı AB bölgesinde ise, histeresis grafiği (d) formunda oluşmuş ve görülebileceği üzere yatay kuvvet sabit bir değer almıştır. Sonuçlar incelendiğinde, mikro-kayma OA bölgesi içerisinde, bütünsel kayma ise AB bölgesi içerisinde meydana gelmektedir. A noktası mikro-kayma’nın maksimum noktası olmakla beraber, bu noktaya karşılık gelen deplasman değeri kritik mikro-kayma deplasmana (X_s), yatay kuvvet ise bütünsel kayma kuvvetine (T_s) eşittir. Şekil 2.26 (b), X_m ve T_m arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Görülebileceği üzere, bütünsel kayma kuvveti (T_m) ve kritik mikro-kayma deplasmanı (X_s), normal kuvvet

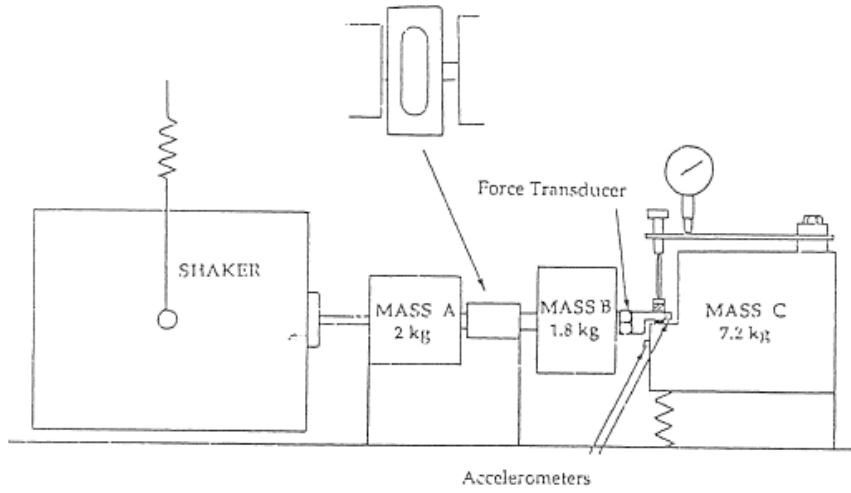
değerinden oldukça etkilenmektedir. Normal kuvvet arttıkça, kritik mikro-kayma deplasmanı da artmaktadır.



Şekil 2.26 : (a) Yatay kuvvet – bağıl deplasman ilişkisi ve meydana gelen histeresis grafiği formları (b) Kritik mikro-kayma deplasmanı ve bütünsel kayma kuvvetinin normal kuvvet ile değişimi [28].

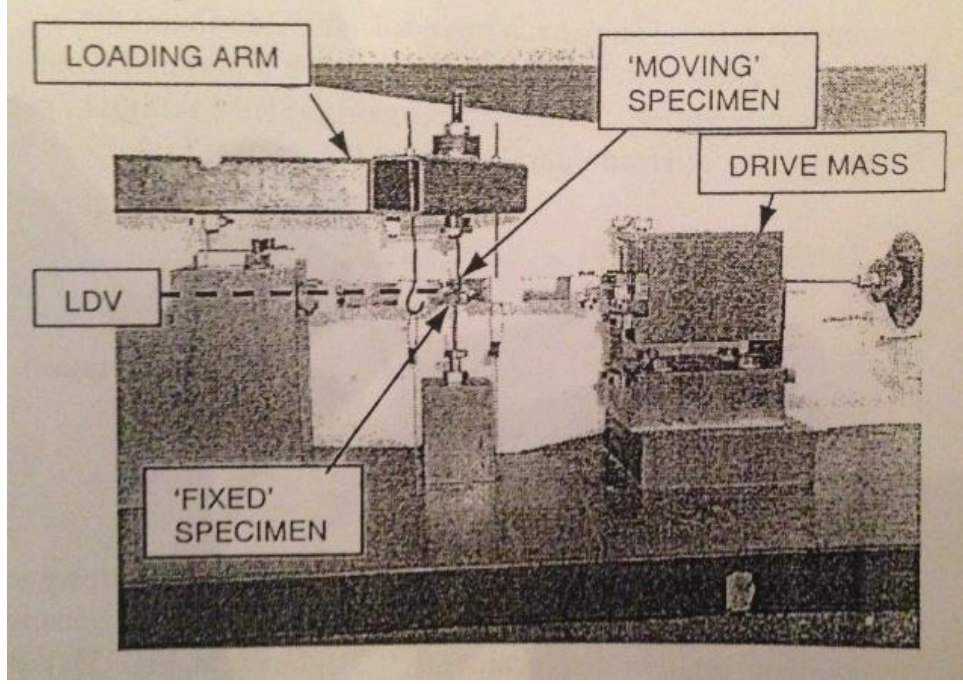
1995 yılında Şanlıtürk, K. Y. ve diğerleri [20], turbomakine endüstrisinde kullanılan sürtünme sönümleyicilerin titreşim karakteristiğini ölçmek için, Şekil 2.27’de gösterilen test düzeneğini geliştirmişlerdir. Testler çeşitli yatay ve normal kuvvetlerde, kontrollü bir şekilde yatay yönde deplasman sağlanarak oluşan nonlineer sürtünme sönümleyici kuvvetini ölçmek olarak planlanmıştır. Yeterli yatay kuvveti sağlayabilmek için, sarsıcı ile sürtünme sönümleyici arasına kütle (A) - yay – kütle (B) sistemi konulmuş ve bu sistem doğal frekansında sarsılarak (1 kHz), sönümleyiciyi harekete geçirecek yeterli yatay kuvvet elde edilmiştir. Böylece arzu edilen yönde hareket sağlanarak, diğer yönlerde oluşan istenmeyen hareketlerden uzak durulmuştur. Böylece, mümkün olduğu kadar, istenen hareket olan sinusoidal hareket yaratılabilmektedir. Sürtünme sönümleyici üzerine gelen yatay kuvvet, kuvvet sensörü aracılığıyla ölçülmüştür. Normal kuvvet, manivela kolu yardımıyla yüklenilmiş bir kol tarafından sağlanmaktadır. Uygulanan kuvvet, manivela kolunun önceden kalibre edilmiş sehim’i tarafından bilinmekte ve komparatör yardımıyla ölçülmektedir. Sürtünme yüzeyinin hareketli ve hareketsiz bölgelerine yerleştirilen

minyatür ivmeölçerler tarafından ölçülen ivme değerlerinin sayısal integrasyonu sonucu elde edilen deplasman değerlerinin farkı, bağıl deplasmanı vermektedir.

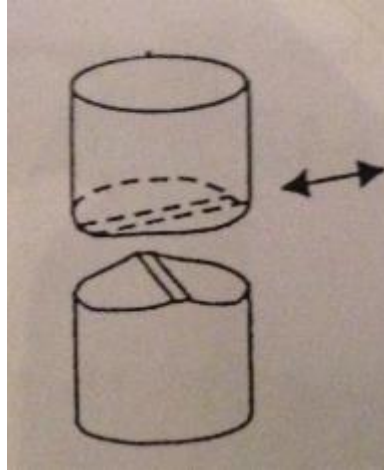


Şekil 2.27 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [20].

2001 yılında Stanbridge, A. B. ve diğerleri [10] tarafından yapılan çalışmada, silindire benzer iki parçanın oluşturduğu temas noktasında oluşan kuvvet – deplasman ilişkisi, özel bir deney düzeneği sayesinde ölçülebilmiştir. Çalışmada kullanılan deney düzeneği, birçok açıdan daha önce bahsedilen çalışmadaki [20] düzeneğe benzemektedir. Şekil 2.28’de gösterilen deney düzeneğinde, bir tanesi hareketli, diğeri sabit durumdaki kollara bağlı iki adet parçanın, sürtünme yüzeyini oluşturduğu görülebilir. Kollardan biri rijit bloğa sabit bağlı, diğeri ise klasik elektromanyetik sarsıcı tarafından sarsılmaktadır. Sürtünme yüzeyini oluşturan parçalar, Şekil 2.28’de görülen kol yardımıyla, birbirlerine doğru bastırmaktadırlar. Temas bölgesi, dört adet halojen lamba ve kapalı çevrim kontrol sistemi kullanılarak, sürtünme sönümleyicilerin çalışma koşulu olan yaklaşık 1000 °C civarına ısıtılmıştır. Sürtünme kuvveti yani iletilen kuvvet, kuvvet sensörü kullanılarak ölçülmüştür. Bağıl deplasman ise, sabit blok tarafından bulunan ve hareketli parçanın üzerine yönlendirilmiş lazer titreşimölçer kullanılarak ölçülen hız değerinin dijital integrasyon yapılması ile elde edilmiştir. Lazer titreşimölçer tarafından yollanan lazer ışığının sürtünme yüzeyinin hareketli parçasına ulaşması amacıyla, sabit blok içine delik açılmıştır. Çalışmada, sürtünme yüzeyini oluşturan parçalar, Şekil 2.29’da görülmektedir. Her biri 1mm genişliğinde düz bir alana sahiptir. Çapraz temas ettirilmeleri sayesinde, 1mm²’lik bir sürtünme alanı oluşturmaları.



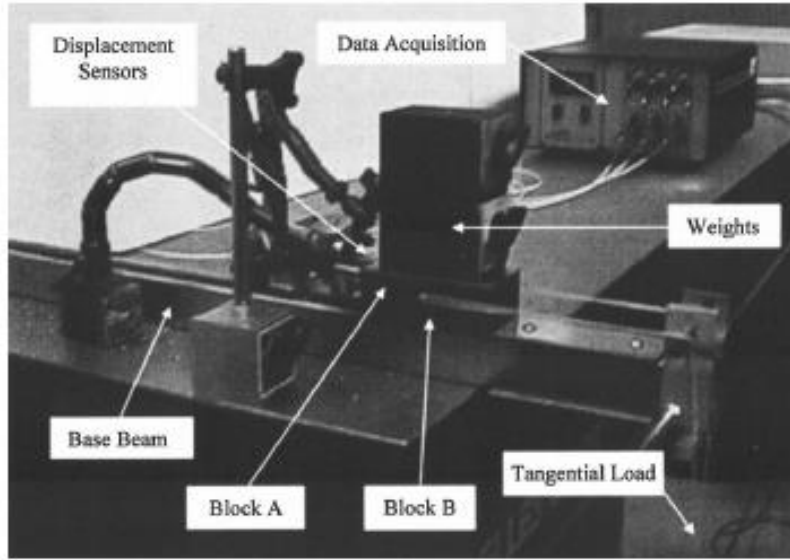
Şekil 2.28 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [10].



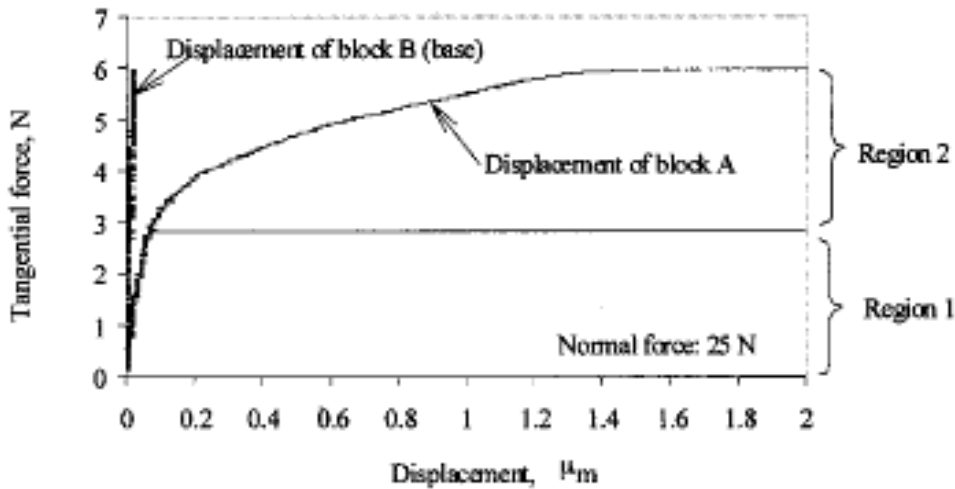
Şekil 2.29 : Kuru sürtünme yüzeyini oluşturan temas durumundaki parçalar [10].

2001 yılında Ni, J. ve Zhu, Z. [29] tarafından yapılan çalışmada, normal yönde yüklenmiş ve yatay doğrultuda hareket sağlanan kuru sürtünme yüzeylerinde, yatay yönde meydana gelen mikro hareketler deneysel olarak gözlenmiş ve makro-kayma hareket meydana gelmeden önce yatay kuvvet – bağıl deplasman ilişkisi incelenmiştir. Çalışma [29] sırasında, Şekil 2.30’da gösterilen test düzeneği kullanılmıştır. Test düzeneği, biri sabit (Blok B) diğeri hareketli (Blok A) iki blok arasında kuru sürtünme yüzeyi oluşturmak ve bu yüzeye ölü ağırlıklar yardımıyla normal kuvvet sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Böylece hareketli olan tarafa yatay

kuvvet etkimesi sonucu, iki yüzey arasında meydana gelecek bağıl deplasmanın ve hareketli yüzeye etkiyen yatay kuvvetin ölçülmesiyle, yatay kuvvet – bağıl deplasman ilişkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçlar göstermektedir ki; Şekil 2.31’de görüldüğü üzere, temas halindeki kuru sürtünme yüzeylerinde meydana gelen mikro hareketler iki bölgeye ayrılır. İlk bölgede, temas halinde olan yüzey pürüzlülükleri düşük yatay kuvvet altında elastik rejimdedir. İkinci bölgede ise, yüksek yatay kuvvet altında elastik rejimden çıkılarak mikro-kayma hareketler başlar ve makro-kayma hareketin başladığı noktaya kadar artarak devam eder. İlk bölgede yatay kuvvet ve bağıl deplasman arasındaki ilişki lineer olmasına karşılık, ikinci bölgede nonlineerdir.

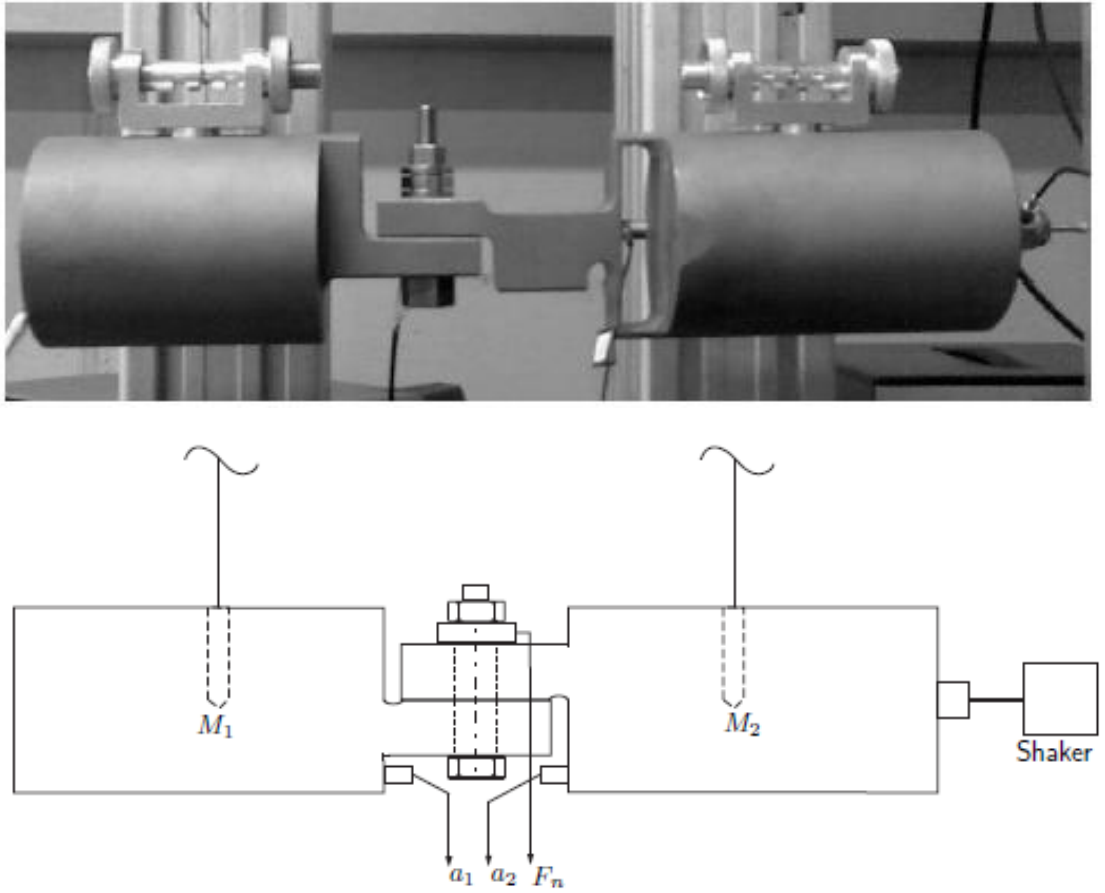


Şekil 2.30 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [29].



Şekil 2.31 : Deneysel sonuçlar : Bağıl deplasman / yatay kuvvet ilişkisi [29].

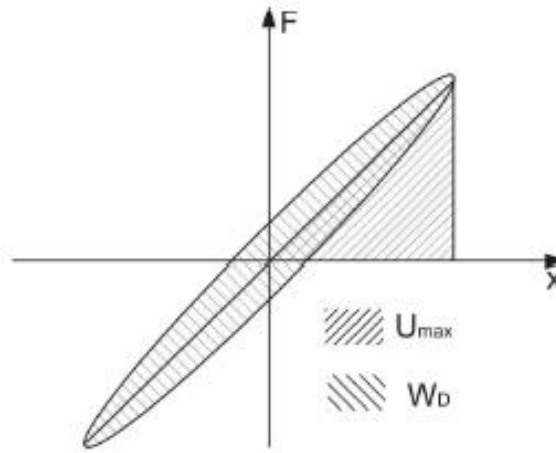
2008 yılında Bograd, S. ve diğerleri [30], cıvatalı bağlantı ile bağlanmış kuru sürtünme yüzeylerini temsil eden bir test düzeneği kurmuşlar ve cıvatalı bağlantılarda bulunan kuru sürtünme yüzeylerinin modellenmesi çalışmalarında kullanmak üzere, temas parametrelerini elde etmeye çalışmışlardır. Kullanılan test düzeneğinde oluşturulan sürtünme yüzeyinin, buradan elde edilecek temas parametrelerinin kullanılacağı, temas halinde bulunan gerçek yapıdaki sürtünme yüzeyi ile uyumlu olmasına çalışılmıştır. Böylece aynı malzeme, aynı yüzey işleme ve aynı normal kuvvet dağılımı oluşturulmasına çaba gösterilmiştir. Şekil 2.32’de bu çalışmada kullanılan test düzeneği ve ölçüm noktaları görülmektedir.



Şekil 2.32 : Çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği [30].

Test düzeneği, temas yüzeylerini oluşturan iki adet rijit kütleden oluşmaktadır. Kütleler, ağırlık merkezlerinden ince bir ip ile bağlanmışlardır. Normal kuvvet, sürtünme yüzeylerini birbirlerine bağlayan cıvata tarafından ayarlanabilmekte ve cıvatanın içinden geçtiği bir yük hücresi tarafından ölçülmektedir. Yatay kuvvet, sarsıcı tarafından verilen sinusoidal kuvvet yardımıyla sağlanmaktadır. Bağlı deplasman ise, temas bölgesinin her iki tarafına yerleştirilen ivmeölçerlerden

toplanan ivme verisinin sayısal olarak entegre edilerek deplasman değerine dönüştürülmesinden sonra, toplama/çıkarma hesabı yapılarak elde edilmiştir. Sürtünme yüzeyi tarafından diğer kütleye iletilen kuvvet ise, iletilen tarafın kütlesi ile o taraftan toplanan ivme değerinin çarpımı sonucu hesaplanmıştır. Ölçümlere, titreşimler rejim haline ulaştıktan sonra başlanmıştır. Ölçümler sonrasında temas yüzeyindeki direngenlik, iletilen kuvvet – bağıl deplasman histeresis grafiğinin eğimi kullanılarak bulunmuştur. Sönüm değerini temsil eden kayıp faktörü ise, Şekil 2.33’de verilen histeresis grafiğindeki bilgiler ve aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır:



Şekil 2.33 : Histeresis grafiğinin sönüm hesaplaması için kullanılması [30].

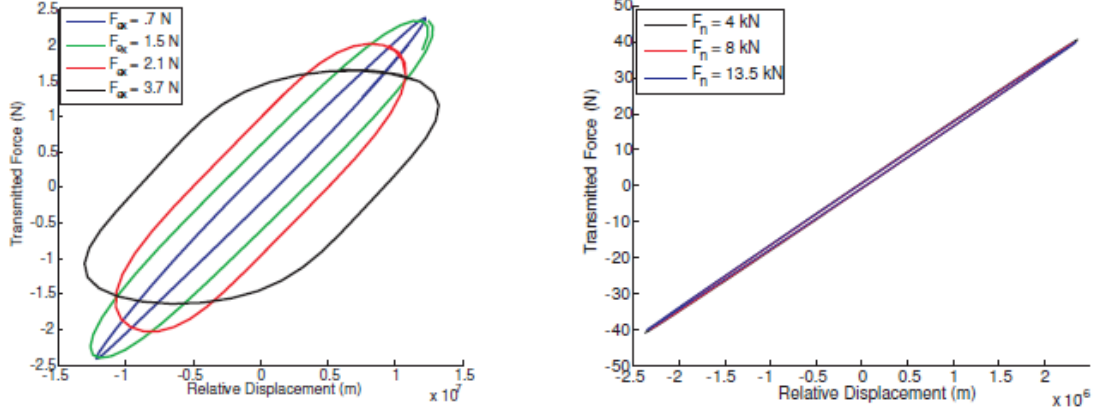
$$\eta = \frac{W_d}{2\pi U_{max}} \quad (2.16)$$

η : Kayıp faktörü

W_d : Titreşim’in bir periyodunda atılan enerji (histeresis eğrisi alanı)

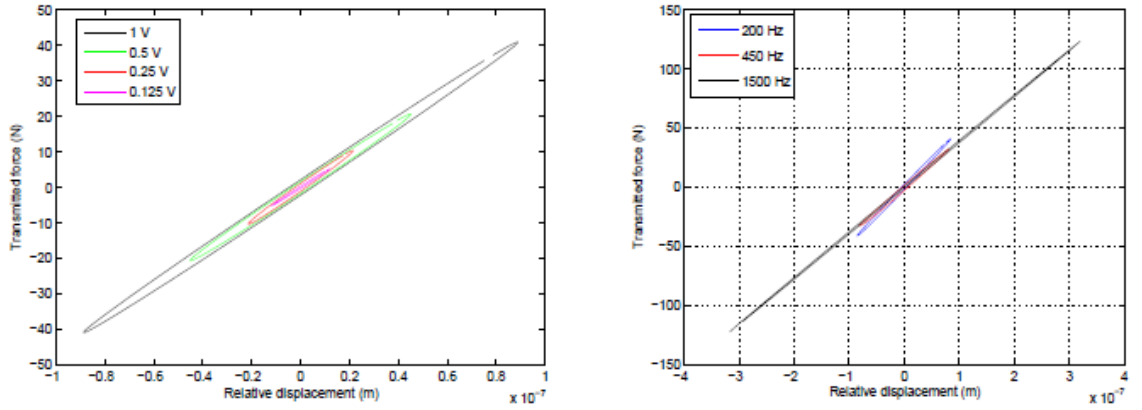
U_{max} : Maksimum potansiyel enerji

Şekil 2.34 (a) sabit normal kuvvet altında, sarsıcı kuvvetlerinin değiştirilmesi sonucu elde edilen histeresis grafiklerini göstermektedir. Düşük sarsıcı kuvvetlerinde sadece mikro-kayma hareketler meydana gelirken, yüksek sarsıcı kuvvetlerde mikro-kayma ve makro-kayma hareketlerinin her ikisi de görülmektedir. Şekil 2.34 (b) incelendiğinde ise, yüksek normal kuvvetler altında sadece mikro-kayma hareket meydana geldiği ve periyot başına atılan enerji (histeresis grafiği alanı) miktarının çok daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 2.34 : (a) ve (b) - Ölçüm sonuçları [30].

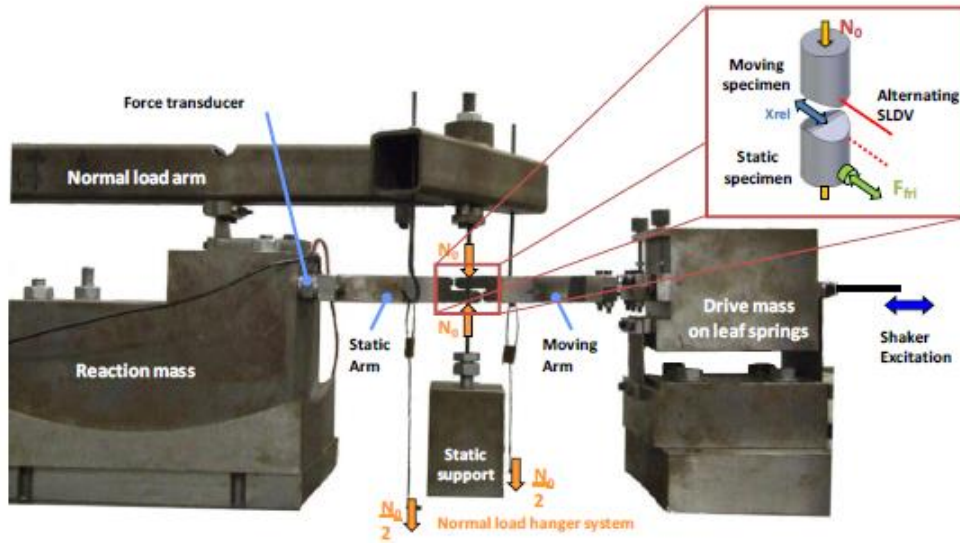
Ölçümler sonucunda normal kuvvet arttırıldığında, uygulanan yatay sarsıcı kuvvetinin sönüm veya direngenlik üzerinde etkili olmadığı anlaşılmıştır. Şekil 2.35 (a) incelendiğinde, yatay sarsıcı kuvvetin değiştirilmesine rağmen histeresis eğrilerinin eğimlerinin aynı kaldığı görülür. Ayrıca Şekil 2.35 (b) incelendiğinde, çalışmada da bahsedildiği üzere, sönüm ve direngenlik değerlerinin, sarsıcı frekansının değiştirilmesinden, ihmal edilecek kadar az bir miktarda etkilendiği görülmektedir.



Şekil 2.35 : (a) ve (b) - Ölçüm sonucu elde edilen bağıl deplasman (m) - iletilen kuvvet (N) histeresis eğrileri [30].

2011 yılında Schwingshackl, C. V. ve diğerleri [31], temas yüzeylerinin sayısal modellenmesi çalışmalarında kullanılmak üzere, kuru sürtünme parametrelerini deneysel olarak elde etmeye çalışmışlar ve bu parametrelerin ölçüm doğruluklarını incelemiştir. Test düzeneğindeki ölçümler sırasında temel alınan ana prensip, bilinen bir normal kuvvete maruz kalmış sürtünme yüzeyi parçalarının bir boyutta kayma hareketi yapmasıdır. Böylece çalışma süresince histeresis grafikleri ölçülmüş,

bu grafiklerden de dinamik sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti gibi temas parametreleri elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan test düzeneği hakkında detaylı bilgi, daha önce incelenen diğer çalışmalarda [20], [10] verilmiştir. Bu çalışmada, testler 100Hz sarsıcı frekansında gerçekleştirilmiştir. Böylece test düzeneğinin doğal frekanslarından uzak kalınmıştır. Bu şekilde yapılan sarsma, tek yönde bir hareket yaratmıştır. Deplasmanın elde edilmesi için kullanılan lazer titreşimölçerin, temas bölgesine çok yakın bir yerden ölçüm aldığından bahsedilmiştir. Daha önce de detaylı olarak anlatılan test düzeneğinin daha net bir resmi Şekil 2.36’da görülebilir.



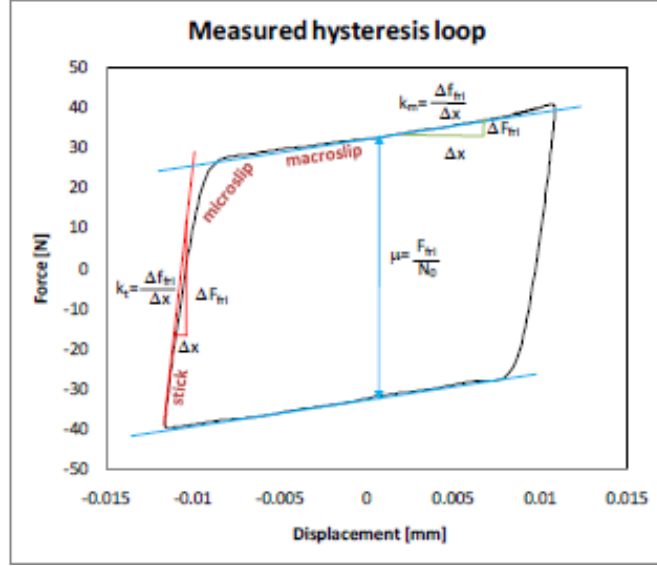
Şekil 2.36 : Kuru sürtünme testleri test düzeneği [31].

Testler sonucu elde edilen histeresis grafikleri Şekil 2.37’deki gibidir. Histeresis grafiği üzerinde de görülebildiği üzere üç farklı bölgeden bahsedilmiştir;

- Temas yüzeyindeki pürüzlülüklerin elastik rejimde davrandığı ve bağlı deplasman – kuvvet ilişkisinin lineer olduğu bölge
- Temas alanının bazı bölgelerinin kaymaya başladığı, bazı bölgelerinin kaymadığı mikro-kayma bölgesi
- Tüm temas alanında kaymanın meydana geldiği ve iletilen kuvvet’in sabit kaldığı makro-kayma bölgesi

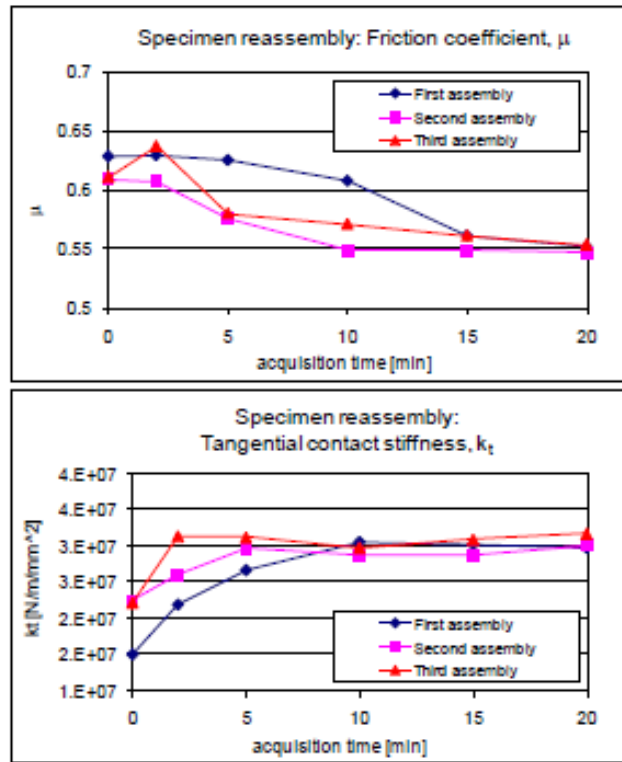
İlk bölge, yatay yöndeki temas direngenliği değerinin elde edilebildiği bölgedir. Yukarıda bahsedildiği üzere, kuvvet – deplasman arasında lineer bir ilişki vardır. Bu bölgenin başladığı ilk noktadan bu lineer çizgi boyunca bir çizgi geçirilirse, eğim yardımıyla direngenlik değeri elde edilir. Makro-kayma bölgede ise sürtünme

kuvvetinin normal kuvvet'e oranı veya makro-kayma bölgede Şekil 2.37'den de görülebileceği üzere iki çizgi arasındaki mesafe sürtünme katsayısını vermektedir ($\mu = F_{fr}/N_0$). Bu çalışmada, ayrıca makro-kayma bölgede bazen meydana gelebilen sürtünme kuvvetindeki artışı modelleyebilmek için ek bir parametre daha sunulmuştur. Ek olarak verilen bu direngenlik değeri, yatay direngenlik değerine benzer şekilde makro-kayma bölgedeki eğimi modelleyebilmek için kullanılmıştır.

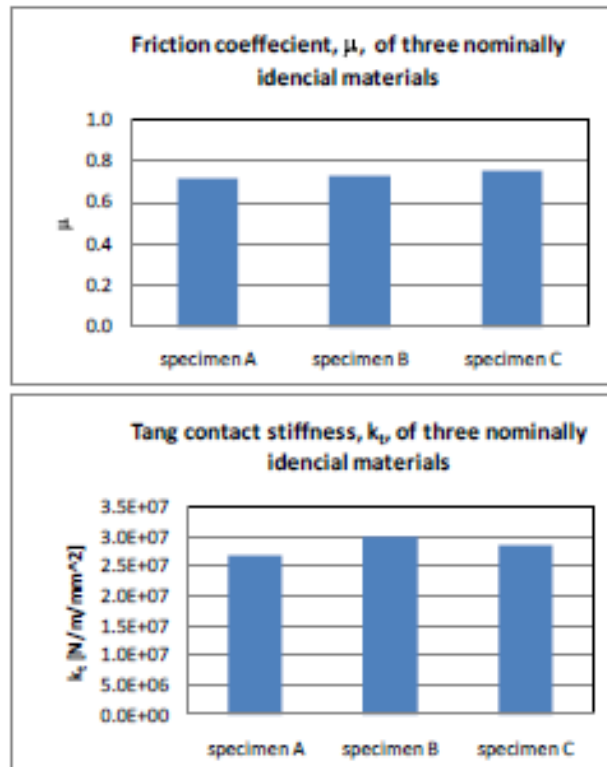


Şekil 2.37 : Klasik histeresis eğrisi [31].

Şekil 2.38'de ölçümlerin tekrarlanabilirliği hakkında yapılan çalışmaya ait sonuçlar gösterilmektedir. Temas yüzeyini yaratan parçalar üç kez sökülüp takılarak, ölçüm alınmıştır. İlk grafikten de görülebileceği üzere, temas yüzeyi koşullarının stabil hale gelebilmesi için yaklaşık 15 dakikaya ihtiyaç vardır. Bu bekleme süresi uygulandığında, ölçümlerin tekrarlanabilirliğinin iyi olduğu söylenebilir. Şekil 2.39'da ise, temas yüzeyini oluşturan parçaların değişkenliği hakkında yapılan çalışmanın sonuçları gösterilmektedir. Birbirine eş üç farklı parça kullanılarak testler tekrarlanmıştır. Sürtünme katsayısı için elde edilen sonuçlar iyi bir uyum gösterse de, yatay direngenlik değeri bir miktar değişkenlik göstermektedir. Bir diğer çalışma da test düzeneğinin hizalama konusuyla ilgilidir. Yapılan çalışma sonucu, test düzeneğindeki 4-5 derecelik bir yamukluk sürtünme katsayısı sonuçlarında %4 ve yatay direngenlik değerlerinde %12'lik bir değişime sebep olmuştur. Sonuç olarak, test düzeneğinin oldukça güvenilir bir şekilde veri ürettiğinden bahsedilmiştir.



Şekil 2.38 : Ölçümlerin tekrarlanabilirliğini göstermek için yapılan denemelere ait sonuçlar [31].



Şekil 2.39 : Temas yüzeyini oluşturan parçaların değişkenliğini göstermek için yapılan denemelere ait sonuçlar [31].

3. MALZEME SÖNÜMÜNÜN BELİRLENMESİ

3.1 Giriş

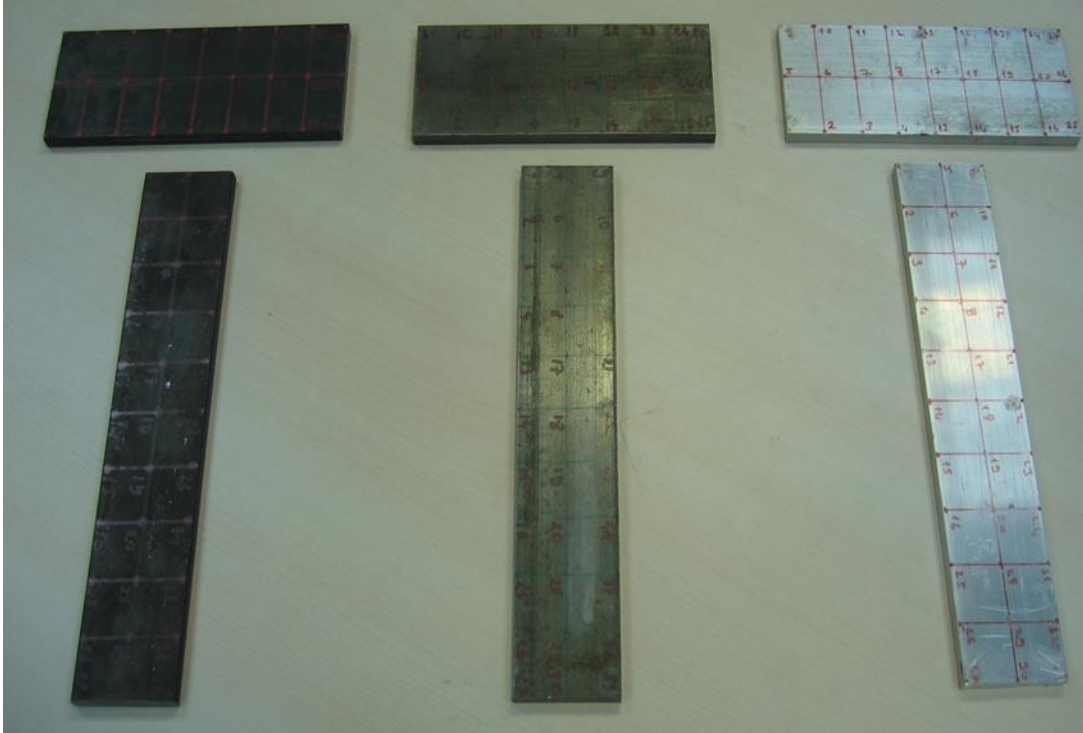
Bu çalışmanın başlıca amacı, çok elemanlı yapılarda, parçalar arasındaki sürtünme kaynaklı sönümün ve direngenliğin doğru bir şekilde modellenebilmesine katkı sağlamaktır. Bu amaca yönelik olarak, birbirine temas eden yapılar arasındaki sürtünme yüzeyine ait temas parametreleri deneysel olarak elde edilmeye çalışılacaktır. Bu deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, gelecekte yapılması planlanan kuru sürtünme yüzeylerinin sayısal modellenmesi çalışmalarında girdi olarak kullanılacaktır. Gelecek çalışmalarda, kuru sürtünme yüzeyleri için geliştirilecek sayısal model üzerinde iyileştirmeler yapabilmek için, deneysel çalışmalarda kullanılan parçaların malzeme sönüm değerlerinin de, deneysel yollarla hassas bir şekilde ölçülmesi çok önemlidir. Bu şekilde, kuru sürtünme yüzey modellerinin de yer aldığı analizler sonucunda ortaya çıkan hataların tamamının nonlineer bir davranış gösteren temas yüzeylerinin modellenmesinden kaynaklandığı ve malzeme sönümünün bu hatalara katkı sağlamadığı anlaşılabilecek ve temas yüzeyinin modellenmesinde geliştirmeler daha rahat yapılabilecektir. Özetle, temas parametreleri ile ilgilenmeden önce şu iki noktaya dikkat etmek gerekir;

- a. Montajdaki parçaların sayısal modellerinin kabul edilebilir seviyede doğru olması
- b. Montajdaki parçaların malzeme özelliklerinin hassas bir şekilde belirlenmiş olması

Bu sebeple, kuru sürtünme kaynaklı sönüm ile ilgilenmeden önce sağlanması en zor malzeme bilgisi olarak bilinen malzeme sönümünün, deneysel olarak hassas bir şekilde elde edilmesi, çalışmanın ilk aşamasını oluşturacaktır. Bu bölüm içerisinde malzeme sönümünün deneysel olarak elde edilmesine çalışılırken, aynı zamanda frekansın malzeme sönümüne olan etkisi de incelenecektir.

3.2 Sönüm Miktarının Belirlenmesi için Uygun Yöntemin Tespit Edilmesi

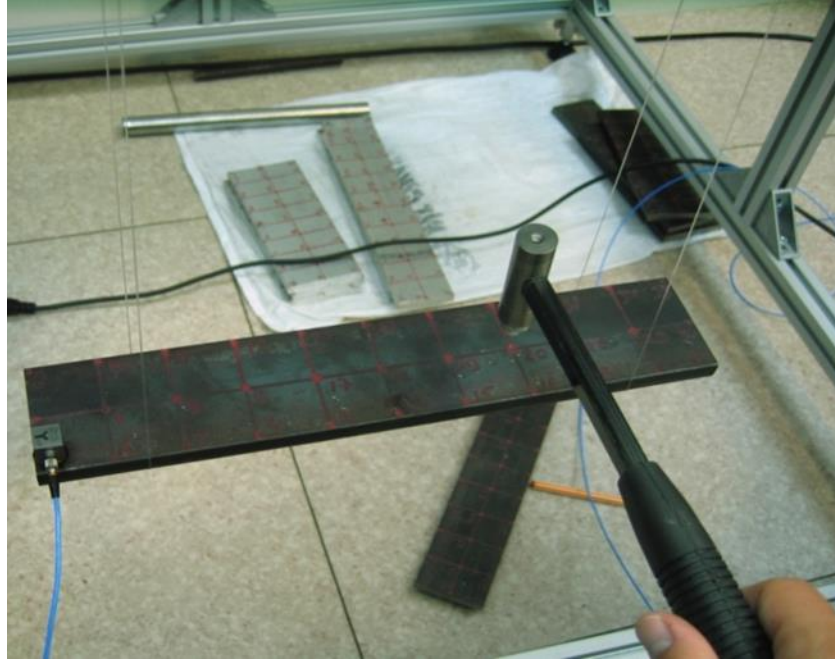
Malzeme sönümünün elde edilmesi amacıyla yapılacak deneysel çalışmalar için, Şekil 3.1’de gösterilen ve otomotiv sektöründe motor ve güç aktarma organları parçalarında kullanılan başlıca malzemeler olan alüminyum, demir ve çelik malzemelerden, farklı ebatlarda plakalar kullanılmıştır. Sonuçların tekrarlanabilirliğinin gözlemlenebilmesi amacıyla, her bir malzemedan üçer adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 3.1 : Malzeme sönüm testlerinde kullanılan numuneler.

Malzeme sönümü testlerinde, LMS marka veri toplama cihazı kullanılarak numunelere modal test uygulanmış ve elde edilen frekans tepki fonksiyonlarından, LMS Polymax yazılımı yardımıyla sönüm değerleri elde edilmiştir.

Modal test, yapıyı tahrik etmek için modal çekiç, yapının cevabını ölçmek için ise ivmeölçer kullanılarak yapılmıştır. Modal test, ivmeölçerin sabit tutulması ve çekicinin önceden belirlenen ölçüm noktaları üzerinde gezdirilerek yapının tahrik edilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2’de, test numunelerinden biri için yapıya ait tahrik noktaları (yapının çekiç ile tahrik edildiği noktalar), ivmeölçerin yapı üzerinde bulunduğu yer ve yapının asıldığı bölgeler görülmektedir.



Şekil 3.2 : Malzeme sönümünün deneysel olarak elde edilmesi.

Çizelge 3.1’de, Şekil 3.1’de görülen her bir numune için birinci doğal frekans ve sönüm oranı (%) olarak malzeme sönümü değerleri görülmektedir. Çizelge 3.1’den görülebileceği ve daha önce söylenildiği gibi, ölçümlerin tekrarlanabilirliğinin gözlemlenebilmesi için her bir malzeme ve boyut için üç adet eşdeğer numune kullanılmıştır. Ölçümlerin tekrarlanabilirliği ile anlatılmak istenen, aynı ebatlarda ve malzemedan üretilen farklı numunelerin (örneğin; alüminyum, numune 1-2-3 (60x300mm)) ölçüm sonuçlarının aynı veya benzer çıkmasıdır. Bu açıdan sonuçlara bakıldığında, testlerin tekrarlanabilirliğinin oldukça iyi olduğu söylenebilir. Fakat aşağıda sıralanan sebeplerden dolayı, gerekli düzeltmelerin yapılmasından sonra ölçümlerin tekrarlanmasına karar verilmiştir;

- a. Literatürden edinilen bilgilere göre, frekansın metal malzemelerin sönümü üzerinde etkili olmadığı bilinmektedir. Ancak Çizelge 3.1’deki sonuçlara bakıldığında, aynı malzemedan yapılan, farklı ebatlardaki yani farklı 1. doğal frekanslardaki numunelerin sönüm değerlerinin birbirlerinden oldukça uzak olduğu görülmektedir.
- b. Elde edilen sönüm değerlerinin, genel olarak literatürdeki değerlerden yüksek olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 3.1 : 1. doğal frekans ve malzeme sönümü (sönüm oranı) değerleri.

	Alüminyum		Çelik		Demir	
	1. Doğal Frekansı (W_n) [Hz]	Sönüm Oranı (ζ) [%]	1. Doğal Frekansı (W_n) [Hz]	Sönüm Oranı (ζ) [%]	1. Doğal Frekansı (W_n) [Hz]	Sönüm Oranı (ζ) [%]
Numune 1 (60x300mm)	575,713	0,072	585,380	0,023	577,978	0,020
Numune 2 (60x300mm)	578,733	0,064	582,037	0,027	577,123	0,021
Numune 3 (60x300mm)	577,315	0,068	580,881	0,027	579,573	0,019
Numune 1 (80x200mm)	1281,949	0,224	1316,484	0,065	1295,388	0,090
Numune 2 (80x200mm)	1284,891	0,206	1320,281	0,064	1278,033	0,081
Numune 3 (80x200mm)	1290,771	0,216	1326,898	0,071	1295,786	0,106

3.2.1 Sönüm testlerini etkileyebilecek parametreler

Çizelge 3.1’de sunulan sonuçlar hakkında, yukarıda ifade edilen olumsuz durum için, testlerde kullanılan ölçüm numuneleri ve ölçüm koşulları konusunda aşağıda belirtilen parametrelerin etkili olabileceği ve gerekli düzeltmelerin yapılması gerektiği anlaşılmıştır;

- I. Ortamdaki havanın etkisi
- II. Yapının asılış şekli ve askı yerleri
- III. İvmeölçer konumu
- IV. Ölçüm cihazları

Yukarıda sıralanan her bir parametrenin etkisi ayrı ayrı incelenmiş ve sonuçlar aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur.

I. Ortamdaki Havanın Etkisi

Malzeme sönümü ölçümlerinde, ölçüm yapılan parçanın hacim/yüzey alanı küçük ve titreşim genliklerinin yüksek olması durumunda ortamda bulunan havanın yarattığı sönüm, ölçüm sonuçları açısından önemli olabilir.

Küçük hacim/yüzey alanına sahip bu numuneler ile yapılan testler sonucu elde edilen sönüm değerlerinin, yapının kendi malzeme sönümüne ek olarak, ortamdaki havanın etkisiyle yapı üzerinde oluşan ilave sönümü de içerdiği düşünülmüştür. Bu durum, ölçülen değerlerin olması gerekenden fazla olmasına neden olmaktadır.

Yapılan araştırmalarda malzeme sönümü ölçülürken ortamdaki havanın çok önemli bir parametre olarak kabul edildiği ve havanın etkisini ortadan kaldırmak için vakumlu ortamlarda testler yapıldığı da görülmüştür. Fakat bu çalışmanın ana

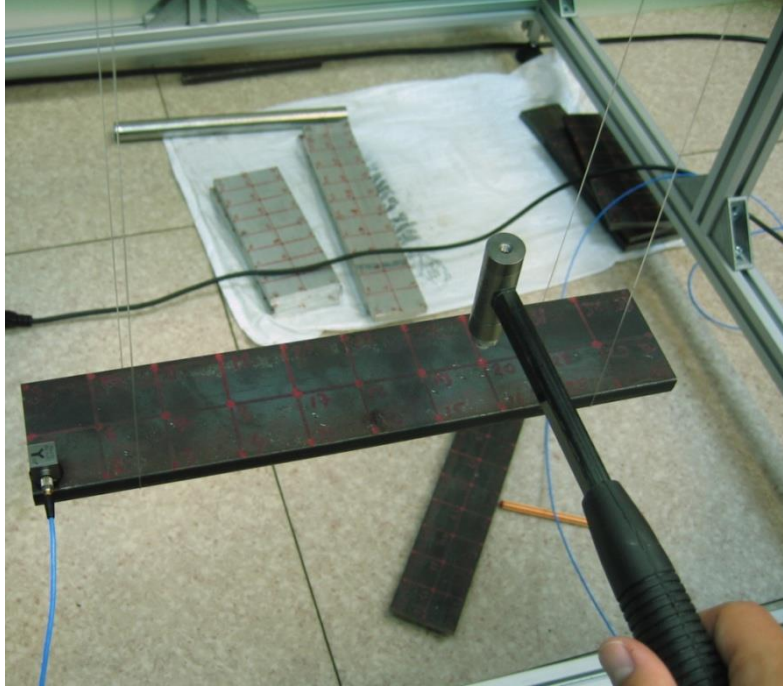
konusunun malzeme sönümü değil, sürtünme nedeniyle meydana gelen yapısal sönüm olduğundan ve bu sönüm değerinin de malzemenin kendi iç sönümü yanında oldukça büyük olduğundan, malzeme sönümü ölçümlerinde vakum ortamına ihtiyaç duyulmamıştır. Bunun yerine, ölçümler sırasında havanın sönüm etkisinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Testler sırasında ortamdaki havanın etkisini olabildiğince düşük tutabilmek için, hacim/yüzey alanı oranı daha büyük ve kalınlığı arttırılmış yeni numunelerin kullanılmasına karar verilmiştir. Çelik ve alüminyum malzemeden iki farklı ebatda, ikişer tane olan yeni numuneler Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3 : Malzeme sönüm testlerinde kullanılacak yeni numuneler.

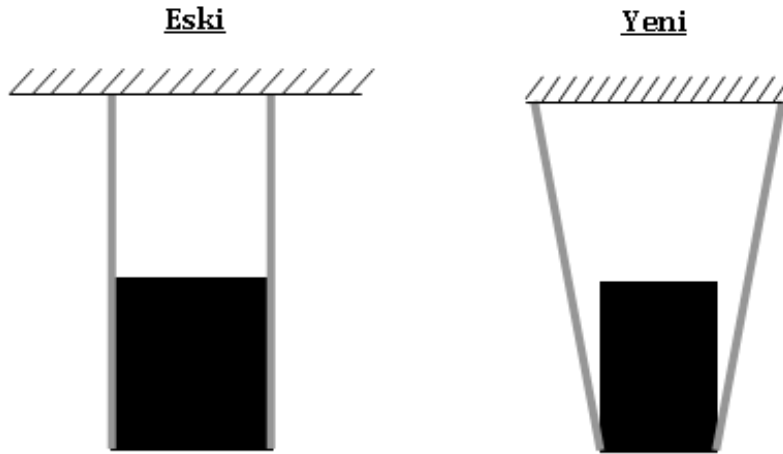
II. Yapının Asılış Şekli ve Askı Yerleri

Yapılan değerlendirmelerde numunenin asılış şekli ve yerinin de önemli olduğu anlaşılmıştır. Test numunesinin, Şekil 3.4’de gösterildiği gibi numuneyi tamamen saracak şekilde asılmasının malzeme sönümüne ilave bir sönüm kazandırması olasıdır.



Şekil 3.4 : Asılış şeklinin malzeme sönümü üzerindeki etkisi.

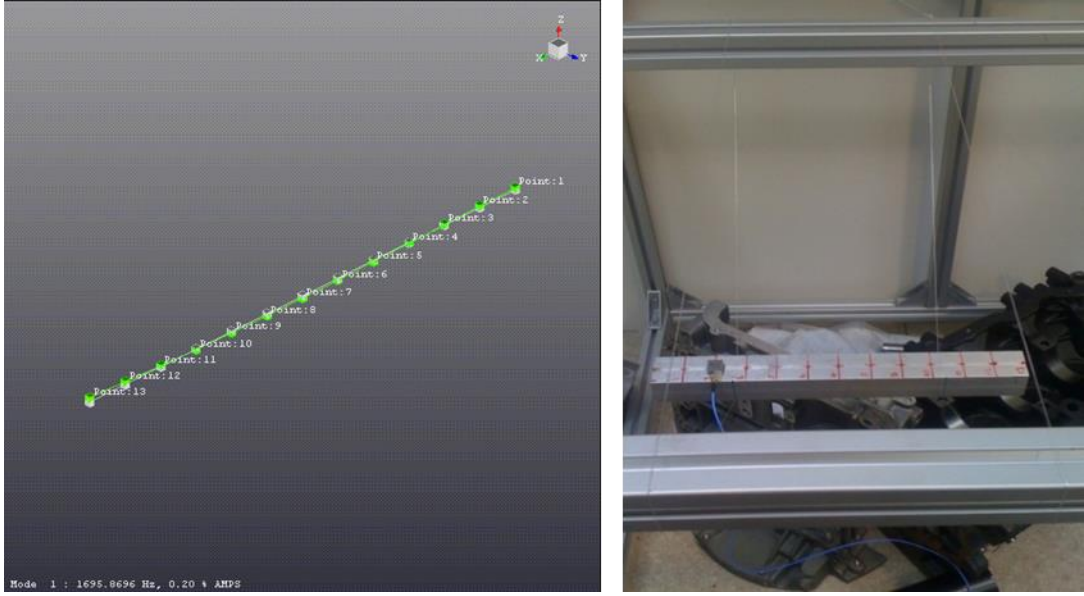
Bu sebeple testler sırasında, test numunesinin asılması sırasında ip tarafından mümkün olduğu kadar az temas etmesine özen gösterilmiştir. Asılış şeklinin eski ve yeni hali arasındaki fark Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.5 : Asılış şeklinin eski ve yeni durumu.

İlk yapılan testler sırasında numunelerin askı yerleri rastgele belirlenmişti. Ancak numunelerin yüksek genlikli titreşim yapan noktalarından asılmasının, asma ipinin sönüm üzerinde daha etkili bir parametre olmasına neden olabileceği dikkate alınmıştır. Bu sebeple malzeme sönümleri ölçülecek numune üzerinde sönüm testlerine başlamadan önce yapıya basit bir modal test yapılarak, yapının 1. mod

şeklinin çıkartılmasına ve yapının ilk moduna ait hareket etmeyen nodal noktalarından asılmasına karar verilmiştir. Böylece parçanın, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi hareket etmeyen noktalarından asılarak, asma ipinin sönüm üzerine olan etkisinin azaltılması amaçlanmıştır.



Şekil 3.6 : Alüminyum malzeme ve 30x30x300mm boyutundaki test numunesine ait 1. mod şekli ve askı yerleri.

III. İvmeölçer Lokasyonu

Yapılan sönüm testlerinde, ivmeölçer kablosunun da ek bir sönüm yaratabileceği düşünülmüştür ve bu etkinin de minimize edilmesi amaçlanmıştır. İvmeölçerin mümkün olduğunca yapının az hareket eden noktalarına konulmasının bu etkiyi azaltacağı anlaşılmıştır. Bu sebeple Şekil 3.6'da görüldüğü gibi ivmeölçerin, yapının 1. modunun nodal noktalarına yakın (ama nodal noktalar olmayan) bir bölgeye yerleştirilmesine karar verilmiştir.

IV. Ölçüm Cihazları

Daha önceki kısımlarda anlatıldığı gibi, bir yapının malzeme sönümünü elde etmek için yapı üzerinden frekans tepki fonksiyonları ölçülmekte ve elde edilen frekans tepki fonksiyonlarının analiz edilmesinden, yapının malzeme sönümü elde edilmektedir. Yapılan modal test sırasında, yapıyı tahrik etmek ve yapının bu etkiye karşılık verdiği tepkiyi elde etmek amacıyla kullanılan ivmeölçer ve modal çekiç gibi ölçüm cihazları, elde edilen sönüm değeri üzerinde doğrudan etkilidir. Özellikle işlevini yerine getirirken yapıya temas eden ölçüm cihazlarının, test edilen yapının

kütlesini ve rijitliğini etkilediğinden, yapının doğal frekansını değiştireceği, yapı üzerinde sürtünme etkisi yaratmasından dolayı da, yapının malzeme sönümüne ilave bir sönüm ortaya çıkaracağı düşünülmektedir. Bu etkiler gözönüne alındığında, temassız bir şekilde görevini gerçekleştiren ölçüm cihazlarının, sönüm ölçümü için en uygun cihazlar olacağı kesindir.

İlerleyen bölümde, yukarıda sayılan ve ölçümleri etkilediği düşünülen tüm parametreler gözönüne alınarak gerçekleştirilen ve en uygun ölçüm metodunun elde edilmesine çalışılan bir dizi test yapılmış ve sonuçları paylaşılmıştır.

3.2.2 Uygun test metodunun belirlenmesi

Bu bölümde, bölüm 3.2.1.'de açıklanan değişiklikler yapılarak hazırlanan test düzenekleri üzerinde, farklı ölçüm cihazları kullanılarak, sönüm testleri için en uygun ölçüm cihazının belirlendiği bir dizi test yapılmıştır.

Aşağıda sistemi tahrik etmek ve sistem cevabını elde etmek için kullanılan ölçüm cihaz çiftleri bulunmaktadır;

- i. Modal çekiç / ivmeölçer
- ii. Modal çekiç / lazer titreşimölçer
- iii. Modal sarsıcı / lazer titreşimölçer

Bu çiftlerin ölçüm sonuçlarına etkisi incelenmiş ve sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

i. Modal Çekiç / İvmeölçer

İlk olarak Şekil 3.7'de görüldüğü gibi modal çekiç ve ivmeölçer ikilisi ile sönüm testi yapılmış ve bölüm 3.2.1.'deki önlemler alınmadan önce yapılan teste ait sonuçlar ile karşılaştırılarak, yapılan değişikliklerin sonuçları nasıl etkilediği incelenmiştir.



Şekil 3.7 : Modal test sırasında kullanılan modal çekiç ve ivmeölçer.

Çizelge 3.2 : Modal çekiç ve ivmeölçer kullanılarak yapılan sönüm testine ait değerler.

	Alüminyum		Çelik	
	1. Doğal Frekansı (W_n) [Hz]	Sönüm Oranı (ζ) [%]	1. Doğal Frekansı (W_n) [Hz]	Sönüm Oranı (ζ) [%]
Numune 1 (30x30x300mm)	1714,648	0,010	1704,827	0,011
Numune 2 (30x30x300mm)	1714,066	0,014	1681,474	0,011
Numune 1 (40x40x500mm)	839,043	0,004	821,312	0,007
Numune 2 (40x40x500mm)	838,883	0,003	814,849	0,006

Çizelge 3.2’deki sonuçlar incelendiğinde, Çizelge 3.1 de verilen eski test sonuçlarına göre çok daha anlamlı sönüm değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sönüm değerleri incelendiğinde, bölüm 3.2.1.’de belirtilen çevresel faktörler nedeniyle yapının kendi iç malzeme sönümüne ek olarak ortaya çıkan sönüm miktarının azaldığı ve yapının kendi malzeme sönümünün daha sağlıklı ölçülebildiği görülmektedir. Ayrıca aynı malzemeden farklı ebatlardaki numunelerin sönüm değerlerinin de birbirlerine oldukça yakın olduğu (sönüm değerlerinin küçük sayılar ile ifade edildiği de gözönüne alınmalı) görülmektedir. Böylece literatürde söylendiği üzere, metaller için, frekansın sönüm üzerinde bir etkisinin olmadığı da bu sonuçlar ile ifade edilebilir.

Daha önce ifade edildiği gibi modal çekiç ve ivmeölçer kullanılarak yapılan sönüm testlerinde, ivmeölçer sabit tutularak modal çekicinin gezdirilmesi yoluyla yapı üzerindeki tahrik noktası kadar frekans tepki fonksiyonu elde edilmektedir. Bu ölçüm sırasında numune üzerinde bulunan 21 noktada çekiç gezdirilmiş ve yapının tepkisi 4 ve 5 nolu noktalar arasında bulunan ivmeölçerden alınmıştır. Çizelge 3.3’de ivmeölçerin bulunduğu nokta ile çekicinin gezdirildiği 21 nokta arasında elde edilen 21 adet frekans tepki fonksiyonundan ayrı ayrı elde edilen 1. doğal frekans ve sönüm oranı (%) değerleri görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, rijit ve homojen bir yapının sönüm değerinin elde edilebilmesi için aşağıdaki gibi bir ifade ortaya konabilir;

“Yapı etkin bir şekilde tahrik edilip, uygun bir noktadan cevap alınarak elde edilen frekans tepki fonksiyonundan yapının malzeme sönümü değerini elde etmek, yapının malzeme sönümünü belirlemek için yeterlidir”

Çizelge 3.3 : 40x40x500mm boyutlarındaki çelik malzeme, numune 1 üzerinden toplanan 21 adet frekans tepki fonksiyonundan elde edilen 1. doğal frekans ve malzeme sönümü değerleri.

Çelik (40x40x500mm) - Numune 1			
İvmeölçer Konumu	Tahrik Noktası	1. Doğal Frekansı (W_n) [Hz]	Sönüm Oranı (ζ) [%]
4-5	1	821,3	0,006
4-5	2	821,3	0,006
4-5	3	821,3	0,005
4-5	4	821,3	0,004
4-5	5	821,3	0,004
4-5	6	821,3	0,004
4-5	7	821,3	0,005
4-5	8	821,3	0,005
4-5	9	821,3	0,005
4-5	10	821,3	0,005
4-5	11	821,3	0,006
4-5	12	821,3	0,006
4-5	13	821,3	0,006
4-5	14	821,3	0,005
4-5	15	821,3	0,005
4-5	16	821,3	0,004
4-5	17	821,3	0,005
4-5	18	821,3	0,005
4-5	19	821,3	0,006
4-5	20	821,2	0,007
4-5	21	821,3	0,006
Ortalama		821,3	0,005

ii. Modal Çekiç / Lazer Titreşimölçer

Daha önce söylenildiği gibi, malzeme sönümünün elde edildiği frekans tepki fonksiyonunu elde ederken, yapıyı tahrik etmek ve yapının bu etkiye cevabını ölçmek için kullanılan ölçüm cihazları, test sonucu elde edilen yapıya ait malzeme sönümü değeri üzerinde oldukça etkilidir. Bu etkiyi rahatlıkla görebilmek için tüm test parametreleri sabit bırakılarak, sadece sistem tepkisi ölçmek için yapıya yapıştırılan ivmeölçer yerine Şekil 3.8’de görülen lazer titreşimölçer kullanılarak testler tekrarlanmıştır. Çizelge 3.4’de, yeni yapılan testlere ait sonuçlar, modal çekiç

& ivmeölçer kullanılarak yapılan testlere ait sonuçlar ile beraber verilerek daha kolay değerlendirilebilmeleri sağlanmıştır.



Şekil 3.8 : Modal test sırasında kullanılan modal çekiç ve lazer titreşimölçer.

Çizelge 3.4 : Modal çekiç & Lazer titreşimölçer ve Modal çekiç & İvmeölçer kullanılarak yapılan sönüm testlerine ait değerler.

		Modal Çekiç & İvmeölçer		Modal Çekiç & Lazer Titreşimölçer	
		1. Doğal Frekans (W_n) [Hz]	Sönüm Oranı (ζ) [%]	1. Doğal Frekans (W_n) [Hz]	Sönüm Oranı (ζ) [%]
Alüminyum	Numune 1 (30x30x300mm)	1714,648	0,010	1716,938	0,005
	Numune 2 (30x30x300mm)	1714,066	0,014	1716,202	0,006
	Numune 1 (40x40x500mm)	839,043	0,004	839,173	0,001
	Numune 2 (40x40x500mm)	838,883	0,003	839,162	0,002
Çelik	Numune 1 (30x30x300mm)	1704,827	0,011	1705,354	0,005
	Numune 2 (30x30x300mm)	1681,474	0,011	1682,207	0,005
	Numune 1 (40x40x500mm)	821,312	0,007	821,515	0,003
	Numune 2 (40x40x500mm)	814,849	0,006	815,043	0,004

Çizelge 3.4’de bulunan değerler incelendiğinde, yapıya temas etmeden ölçüm yapabilen lazer titreşim ölçer kullanılmasının, ivmeölçerin sonuçlara kattığı ekstra kütle ve sürtünme etkilerini ortadan kaldırdığı görülmektedir. İvmeölçer yapıya ilave kütle ekleyerek yapının 1. doğal frekansını aşağı çekerken, eklenen ekstra sürtünme ile de sonuçlarda, malzemenin kendi iç sönümü ile beraber ilave bir sönüm sağlamakta ve doğru olmayan sonuçların elde edilmesine neden olmaktadır. Sonuçlara bakıldığında, ilave kütle ve sürtünme etkisinin özellikle narin yapılarda (30x30x300mm boyutundaki numuneler) etkili olduğu açıktır.

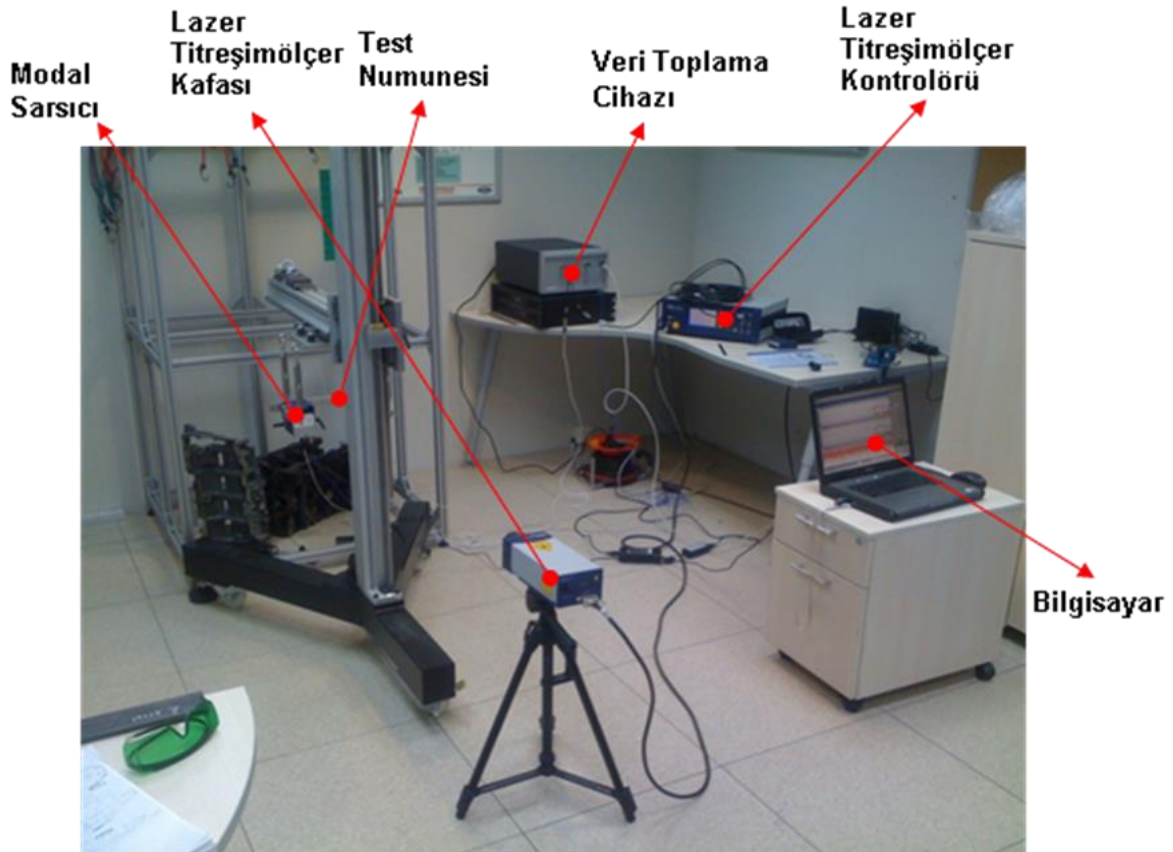
iii. Modal Sarsıcı / Lazer Titreşimölçer

Tüm test parametreleri aynı bırakılarak yapıyı tahrik etmek için kullanılan modal çekiç yerine Şekil 3.9’da gösterilen modal sarsıcı kullanılmasının sönüm üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.9 : Modal test sırasında kullanılan modal sarsıcı ve lazer titreşimölçer.

Şekil 3.10 modal sarsıcı ve lazer titreşimölçer kullanılan ölçüm düzeneğini, Şekil 3.11 ise test numunesinin modal sarsıcı ile sarsılmasına ait detay görüntüyü göstermektedir.



Şekil 3.10 : Modal sarsıcı ve lazer titreşimölçer kullanılarak yapılan sönüm testi düzeneğı.



Şekil 3.11 : Alüminyum malzeme, 40x40x500mm ve 30x30x300mm numunelerin modal sarsıcı ile sarsılması.

Çizelge 3.5 incelendiğinde, önceden öngörüldüğü gibi modal sarsıcının yapıya ekstra kütle ekleyerek yapının 1. doğal frekansını aşağı çektiği, eklediği ekstra sürtünme ile de sonuçlarda, malzemenin kendi iç sönümü ile beraber ilave bir sönüm görülmesine ve doğru olmayan sonuçların elde edilmesine neden olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.5 : Modal sarsıcı ve lazer titreşimölçer kullanılarak yapılan sönüm testine ait değerler.

	Alüminyum		Çelik	
	1. Doğal Frekansı (W_n) [Hz]	Sönüm Oranı (ζ) [%]	1. Doğal Frekansı (W_n) [Hz]	Sönüm Oranı (ζ) [%]
Numune 1 (30x30x300mm)	1681,602	0,101	1689,064	0,075
Numune 2 (30x30x300mm)	1677,917	0,072	1664,980	0,037
Numune 1 (40x40x500mm)	837,047	0,050	820,478	0,010
Numune 2 (40x40x500mm)	836,249	0,047	814,174	0,008

3.3 Sonuçlar

Literatürde ve piyasada malzeme sönümü için alışlagelmiş empirik değerlerin kullanılması yaygın olmasına rağmen bu çalışma kapsamında malzeme sönümünün deneysel olarak hassas bir şekilde elde edilmesi için kapsamlı bir çalışma yapılmıştır.

Bu çalışma sonucunda, malzeme sönümünün deneysel olarak hassas bir şekilde belirlenmesi konusunda, eldeki imkanlar doğrultusunda elde edilen çıktılar aşağıdaki gibidir;

- ✓ Yapının malzeme sönümünü elde ederken yapıyı tahrik etmek için modal çekiç, yapının cevabını elde etmek için lazer titreşim ölçer kullanılması en hassas sonucu vermektedir. Genellemek gerekirse; yapıya mümkün olduğu kadar temas etmeyen ölçüm cihazları kullanılmalıdır.
- ✓ Rijid ve homojen yapılarda, yapının etkin bir şekilde tahrik edilip uygun bir noktadan cevap alınarak elde edilen frekans tepki fonksiyonundan, yapının malzeme sönümü değerini elde etmek, yapının malzeme sönümünü belirlemek için yeterlidir.
- ✓ Yapının malzeme sönümünü deneysel olarak belirlemek için kullanılan numunenin büyük hacim/yüzey alanına sahip olmasına dikkat edilmelidir.
- ✓ Özellikle küçük ve hafif yapılarda, yapının nodal noktalardan ve ipin yapıyı mümkün olduğu kadar az saracak şekilde asılmasına dikkat edilmelidir.

4. MOTOR PARÇALARININ DİNAMİK MODELLENMESİ

4.1 Giriş

Bölüm 3’de basit test numuneleri kullanılarak yapılan çalışma sonucunda, bir parçanın malzeme sönümünün hassas bir şekilde ölçülmesi için dikkat edilmesi gereken noktalar ve en uygun ölçüm cihazlarının seçimi konusunda uygun yöntem belirlenmiştir. Bu bölümde, elde edilen bu çıktıların otomotiv sektöründe kullanılan karmaşık motor parçaları üzerindeki uygulamaları gerçekleştirilip, malzeme sönümünün ölçülmesi için elde edilen yöntemin uygulanabilirliği kontrol edilmiştir. Ayrıca bu çalışmanın kapsamı dışında olan ancak gelecekte yapılması planlanan çok elemanlı yapılarda kuru sürtünme yüzeylerinin sayısal olarak modellenmesi çalışmalarında, kuru sürtünme yüzeyi modelinin geliştirilmesi ve doğrulanması aşamalarında hassas bir çalışma yapılabilmesi amacıyla, kullanılması muhtemel motor parçalarının malzeme sönümlerinin hassas bir şekilde ölçülmesi, yapılacak sönüm testlerinin bir başka önemli sebebidir. Yine gelecekte yapılması planlanan kuru sürtünme yüzeylerinin sayısal modellerinin elde edilmesi çalışmalarında kullanılması muhtemel motor parçalarının dinamik sayısal modellerinin doğrulanabilmesi için, doğal frekans ve mod şekli modal parametreleri de deneysel olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışma sonucu elde edilen modal parametreler şunlardır;

- ✓ Doğal Frekans
- ✓ Mod Şekli
- ✓ Malzeme Sönümü

Deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra, parçaların sayısal modelleri kurularak öncelikle modal analiz gerçekleştirilmiştir ve doğal frekans ile mod şekli elde edilerek deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucu analize girilen malzeme özellikleri güncellenmiş ve tamamıyla doğru bir modelin elde edilmesine çalışılmıştır.

Doğal frekans ve mod şekli açısından sayısal modelin deneysel sonuçlar ile korele olmasından sonra, deneysel olarak elde edilen malzeme sönümünü de içeren analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen malzeme sönümünün, kullanılan ticari programa ne şekilde girilebileceği araştırılmıştır. Bu sönüm değerleri kullanılarak yapılan analiz sonucunda elde edilen frekans tepki fonksiyonları, deneysel olarak elde edilen frekans tepki fonksiyonları ile karşılaştırılarak modelin bir de titreşim genliği açısından korele edilmesine çalışılmıştır. Ayrıca test sonucu hesaplanan malzeme sönümleri kullanılarak yapılan analiz sonuçları ile empirik sönüm değerleri kullanılarak yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmış ve deneysel olarak elde edilen malzeme sönümü değerlerinin analizlerde kullanılmasının etkileri görülmeye çalışılmıştır.

Gelecek çalışmalarda yapılması planlanan motor parçalarının montajlanmış halde sürtünme sönümünü de içeren deneysel ve sayısal çalışmalarına başlanmasından önce tek tek her bir parçanın modal parametrelerinin test yoluyla elde edilmesi ve deneysel sonuçlar kullanılarak parçaların doğruya en yakın sayısal modellerinin kurulması amaçlanmıştır. Böylece her bir parçayı deneysel olarak elde edilen, gerçek malzeme özellikleri ile modelleyerek, motor parçaları arasında bulunan kuru sürtünme yüzeylerinin modellenmesi çalışmalarında karşılaşılabilecek olası hataların sadece kuru sürtünmeden kaynaklandığı kabul edilebilecektir. Bu şekilde, kuru sürtünme yüzeyi sayısal modelinin geliştirilme çalışmalarında daha doğru geri bildirimler alınması amaçlanmaktadır.

Bu kısımda deneysel ve sayısal çalışmalar Şekil 4.1’de de gösterilen motor parçaları üzerinde yürütülmüştür.

- ✓ Motor bloğu
- ✓ Ladder frame
- ✓ Yağ karteri



Şekil 4.1 : Bu bölümde deneysel ve sayısal çalışmalarda kullanılan motor parçaları, sırasıyla Motor bloğu – Ladder frame – Yağ karteri.

4.2 Deneysel Çalışmalar

Bu kısımda gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar sonunda bölüm 4.1’de de belirtildiği üzere, ilgilenilen yapılara ait modal parametreler (doğal frekans, mod şekli ve malzeme sönümü) elde edilecektir. Deneysel olarak elde edilen modal parametreler kullanılarak, bölüm 4.3’de gerçekleştirilecek analizler öncesi yapıların malzeme bilgileri güncellenecek ve gerçek malzeme bilgileri ile analiz koşturulması sağlanacaktır.

Deneysel çalışmalar sırasında, yapılara ait doğal frekans ile mod şeklinin ve malzeme sönümünün elde edilmesi için farklı yöntemler kullanılmıştır. Hatırlanacağı üzere bölüm 3’de bir yapının malzeme sönümünün ölçülmesi için yapılan modal test çalışması sırasında, yapıya mümkün olduğu kadar temas etmeyen ölçüm cihazlarının kullanılmasının en hassas sonucu vereceği belirtilmişti. Bu sebeple çalışmanın bundan sonraki kısımlarında da, malzeme sönümü testlerinde yapıyı tahrik etmek için modal çekiç, yapının cevabını ölçmek için ise lazer titreşimölçer kullanılacaktır. Ancak motor parçaları gibi büyük ve karmaşık geometrilere sahip parçaların doğal frekans ve mod şeklini elde etmek için lazer titreşimölçer kullanılması zahmetli ve gereksizdir. Hem karmaşık geometriden dolayı lazer titreşimölçer ile her noktadan ölçüm alınamaz hem de mod şeklini elde etmek için yapı üzerinde çok fazla noktadan ölçüm almamız gerektiğinden dolayı lazer titreşimölçer kullanmak oldukça zahmetli ve zaman alıcı olacaktır. Bu sebeplerden dolayı doğal frekans ve mod şekli

elde etmek için yapılan modal test çalışmalarında, yapıyı tahrik etmek için modal çekiç ve yapının cevabını ölçmek için ivmeölçer kullanılacaktır.

4.2.1 Modal parametrelerin belirlenmesi (Doğal Frekans & Mod Şekli)

Bu bölümde motor bloğu, ladder frame ve yağ karteri parçaları üzerinde, yapıyı tahrik etmek için modal çekiç ve yapının cevabını elde etmek için ivmeölçer kullanılarak modal test çalışmaları yapılmış ve yapılara ait doğal frekans ile mod şekli elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan ölçüm cihazları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

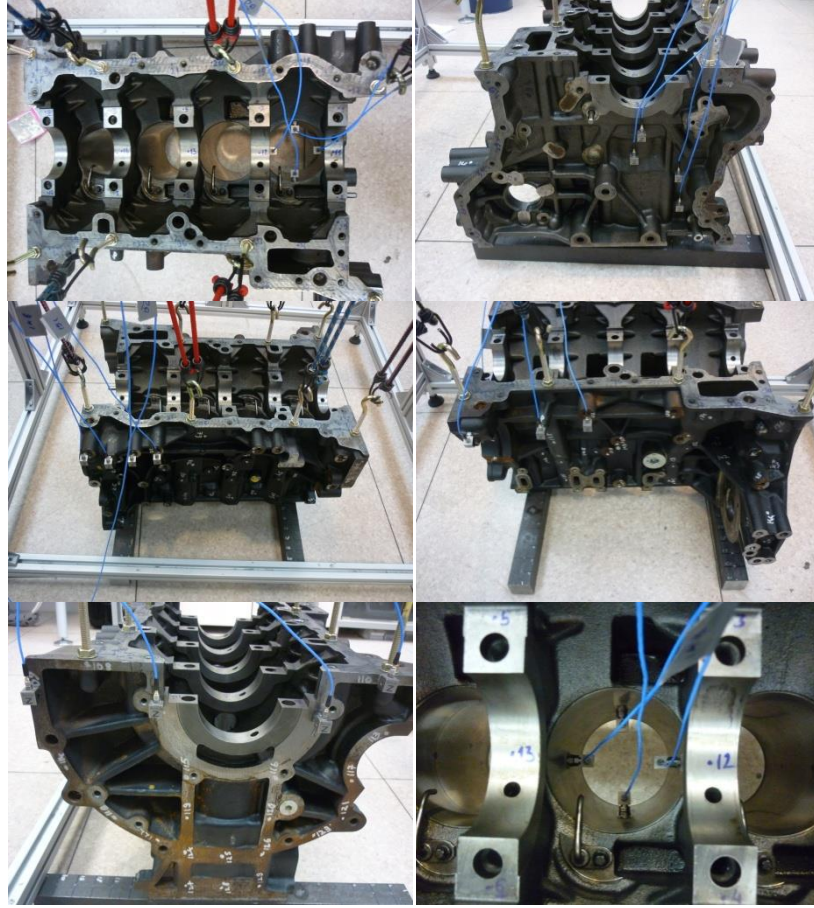


Şekil 4.2 : Doğal frekans ve mod şekli elde etmek için yapılan modal test çalışmaları sırasında kullanılan modal çekiç ve ivmeölçer.

Bu kapsamda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar aşağıdaki alt bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

4.2.1.1 Motor bloğu

Modal test çalışmalarında amaç sadece doğal frekans bulmak değil de aynı zamanda mod şeklini elde etmek ise yapılacak ilk işlem yapının geometrisinin ayrıntılı olarak elde edilmesini ve mod şekillerinin sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesini sağlayacak sayıda ölçüm noktasının yapı üzerinde belirlenmesi ve işaretlenmesidir. Bu çalışma kapsamında, ilgilenilen yapıların hepsi özellikle motor bloğu oldukça büyük ve karmaşık geometrilere sahiptir. Bu sebeple, bu karmaşık geometrinin ve aynı zamanda bu karmaşık geometrinin sahip olduğu mod şekillerinin elde edilebilmesi için yeterli sayıda nokta motor bloğu üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 4.3’den görülebileceği üzere blok üzerinde silindir içlerinin ve diğer ayrıntıların elde edileceği şekilde ölçüm noktaları belirlenerek yapıya ait mod şekillerinin ayrıntılı ve sağlıklı bir şekilde görülebilmesi amaçlanmıştır.

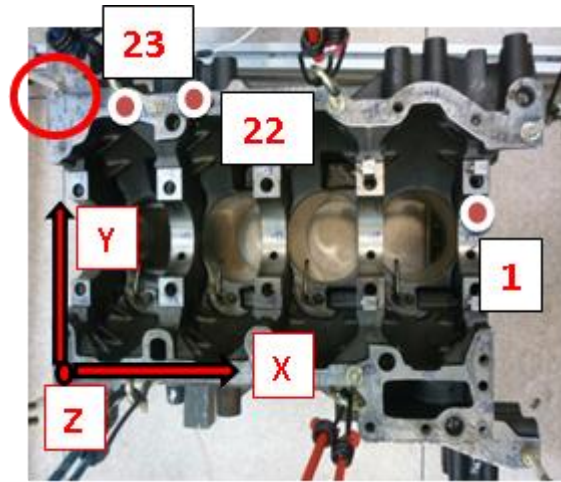


Şekil 4.3 : Modal test çalışması için motor bloğu üzerinde işaretlenen ölçüm noktaları.

Modal test sonucu yapının mod şekillerinin elde edilebilmesi için yapı üzerinden ölçüm alınan ve yapının geometrisinin ayrıntılı bir şekilde elde edilmesini sağlayan bu noktaların bilgisayar ortamına aktarılması gerekmektedir. Bu noktalar bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra iki boyutlu elemanlar ile uygun şekilde birleştirilerek yapının üç boyutlu geometrisi elde edilir. Bu çalışmada, ölçüm ve ölçüm sonrası analiz yapılarak deneysel sonuçların elde edilmesi işlemi için LMS Test Lab programının ilgili modülleri kullanılmıştır. Yapının mod şeklinin elde edilebilmesi için yapı üzerine işaretlenen ölçüm noktalarının bilgisayar ortamına aktarılması işlemi de Test Lab programı kullanılarak yapılabilmektedir. Ancak bu işlemin yapılabilmesi için öncelikle yapı üzerindeki ölçüm noktalarından biri referans olarak belirlenmeli ve geri kalan tüm noktalar bu referans noktaya göre mesafelendirilerek bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Ancak üzerinde çalışılan diğer parçalar gibi motor bloğunun da karmaşık bir yapı olması ve çok sayıda ölçüm noktasına sahip olması, noktaların bu şekilde bilgisayar ortamına aktarılmasını imkansız hale getirmiştir. Bu sebeple Test Lab programı gibi tek bir referans noktaya göre değil,

daha önce bilgisayar ortamına aktarılan yapı üzerindeki bir başka noktaya göre mesafelendirme yapabilen ve ölçüm noktalarının bu şekilde bilgisayar ortamına aktarılmasına imkan tanıyan I-DEAS programı, modal test yapılan yapının geometrisinin bilgisayar ortamına aktarılması için kullanılmıştır.

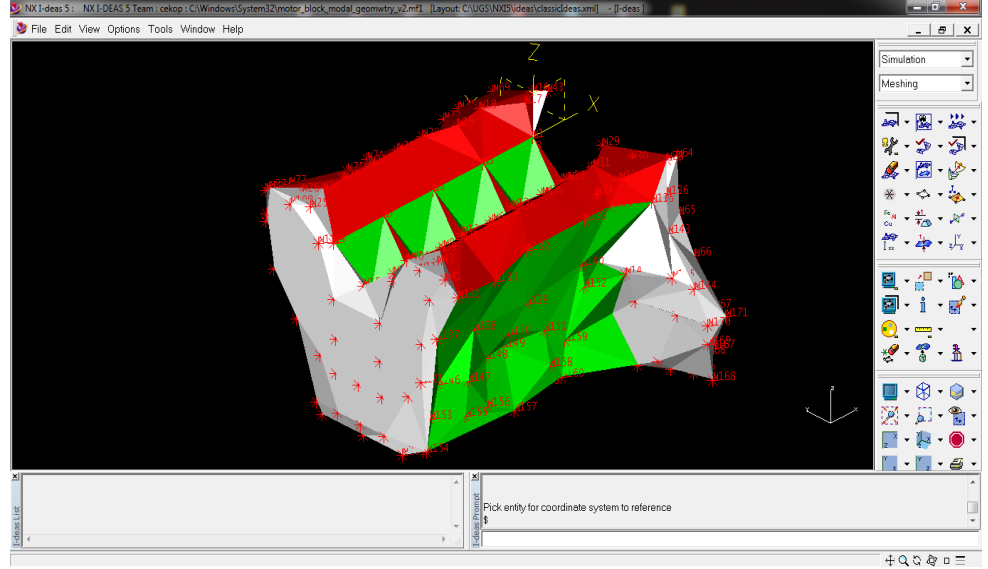
Modal test gerçekleştirilirken kullanılacak olan koordinat sistemi blok üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.4’de sol üst tarafta görüldüğü üzere yapı üzerine çizilmiştir. Bu koordinat sistemi, aynı zamanda yapı üzerindeki ölçüm noktalarının bilgisayar ortamına aktarılması sırasında kullanılmıştır. Eğer noktaların bilgisayar ortamına aktarılması Test Lab programı kullanılarak yapılsaydı, öncelikle Şekil 4.4’de gösterilen blok üzerindeki “1” noktası referans olarak seçilecek ve diğer 268 ölçüm noktasının bu noktaya göre X-Y-Z koordinatlarında mesafeleri ölçülerek bilgisayar ortamına aktarımları yapılacaktı. I-DEAS programının kullanılması ile elde edilen kolaylık aşağıdaki örnek ile daha kolay anlaşılabilir;



Şekil 4.4 : Blok üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının bilgisayar ortamına aktarılması.

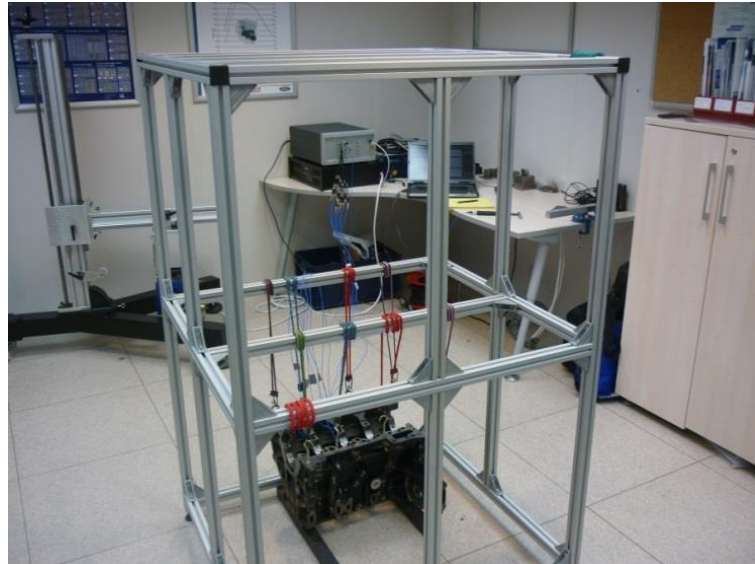
Örneğin Şekil 4.4’de gösterilen “23” noktasının bilgisayar ortamına aktarımı Test Lab programı ile yapılsaydı, referans olarak seçilerek bilgisayar ortamına aktarılan ilk nokta olan “1” noktasına olan mesafesinin X-Y-Z koordinatlarında ölçülmesi gerekecekti. Ancak I-DEAS programında referans noktanın istenildiği zaman değiştirilebilmesinden dolayı, “23” noktası daha önce bilgisayara aktarılan “22” noktasını referans alarak X-Y-Z koordinatlarında mesafelendirilebilmekte ve bu ölçüler kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Bu durum bir önceki duruma göre büyük bir miktarda emek ve zaman tasarrufu sağlamasıyla beraber, yanlış yapma riskini de oldukça azaltmaktadır.

Daha sonra bilgisayar ortamına aktarılan ölçüm noktaları geometriye uygun bir şekilde birleştirilmiştir, diğer bir deyişle yapının mesh atılmış hali elde edilmiştir. Motor bloğunun I-DEAS programı kullanılarak oluşturulan ve ölçüm noktalarını içeren üç boyutlu geometrisi Şekil 4.5’de görülmektedir.



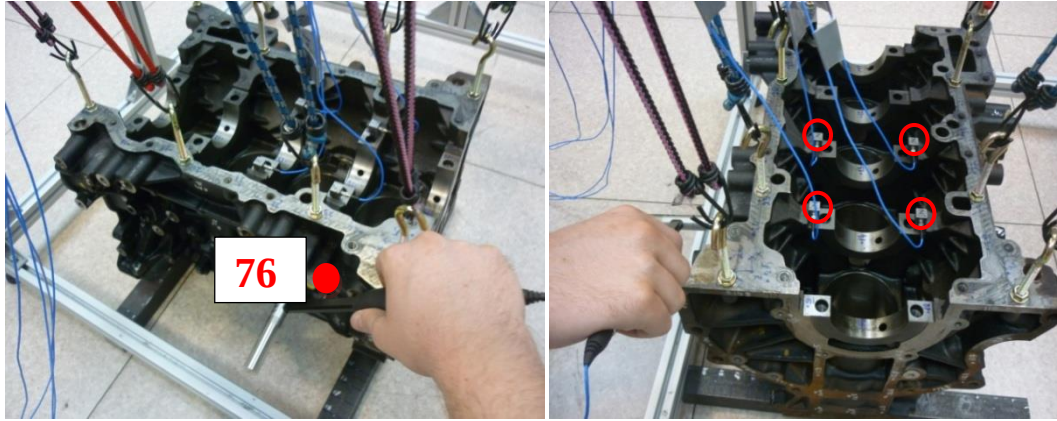
Şekil 4.5 : Motor bloğu üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının I-DEAS programı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılması ile elde edilen 3-D model.

Yapı üzerinde ölçüm noktaları ile koordinat sistemi belirlendikten ve bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra, motor bloğu Şekil 4.6’da görüldüğü gibi askı düzeneğine serbest-serbest koşullarda asılmıştır.



Şekil 4.6 : Motor bloğunun modal test gerçekleştirilmek üzere askı düzeneğine serbest-serbest koşullarda asılması.

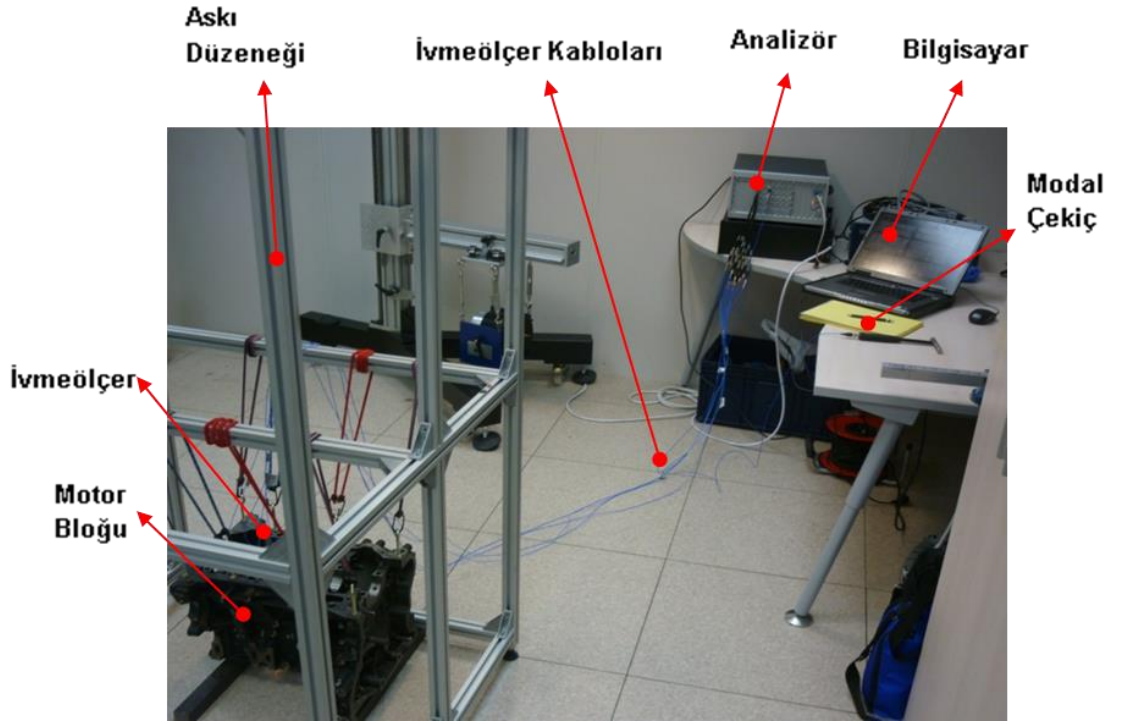
Motor bloğunun karmaşık geometrisi ve girintili-çıkıntılı bölgelerinden dolayı, modal test sırasında modal çekicin gezdirilerek yapının farklı noktalardan tahrik edilmesi uygun değildir. Bu sebeple yapının tahrik edilebildiği uygun nokta belirlenmiş (76. ölçüm noktası) ve yapının bu noktadan tahrik edilerek sistem cevabının ivmeölçer gezdirilerek elde edilmesi tercih edilmiştir. Motor bloğunun karmaşık geometrisinin ayrıntılı bir biçimde elde edilebilmesi ve sahip olduğu mod şekillerinin hassas bir şekilde görülebilmesi amacıyla, motor bloğu üzerinde 268 adet noktadan ölçüm alınması uygun bulunmuştur. Ölçümlerin daha kısa sürede tamamlanması amacıyla Şekil 4.7’den de görülebileceği üzere eldeki imkanlar dahilinde 4 adet ivmeölçer kullanılmıştır. Ayrıca motor bloğunun daha kolay tahrik edilebilmesi amacıyla modal çekicin arkasına Şekil 4.8’de gösterilen ekstra kütle takılarak testler gerçekleştirilmiştir. Motor bloğunun modal testinin yapılması için kullanılan test düzeneği Şekil 4.9’da görülmektedir.



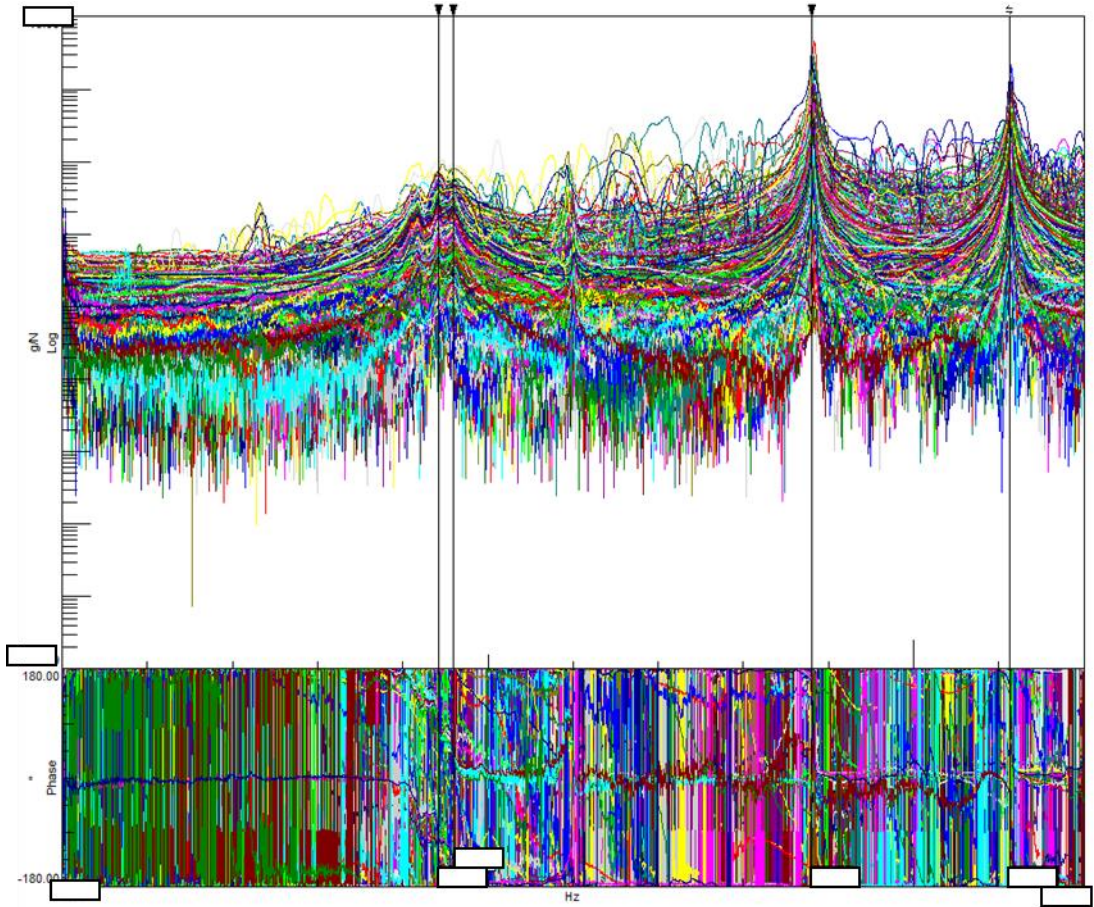
Şekil 4.7 : Motor bloğunun sabit noktadan tahrik edilmesi ve 4 adet ivmeölçerin gezdirilmesi suretiyle modal testinin gerçekleştirilmesi.



Şekil 4.8 : Motor bloğunun daha kolay tahrik edilebilmesi amacıyla kullanılan ekstra kütle .

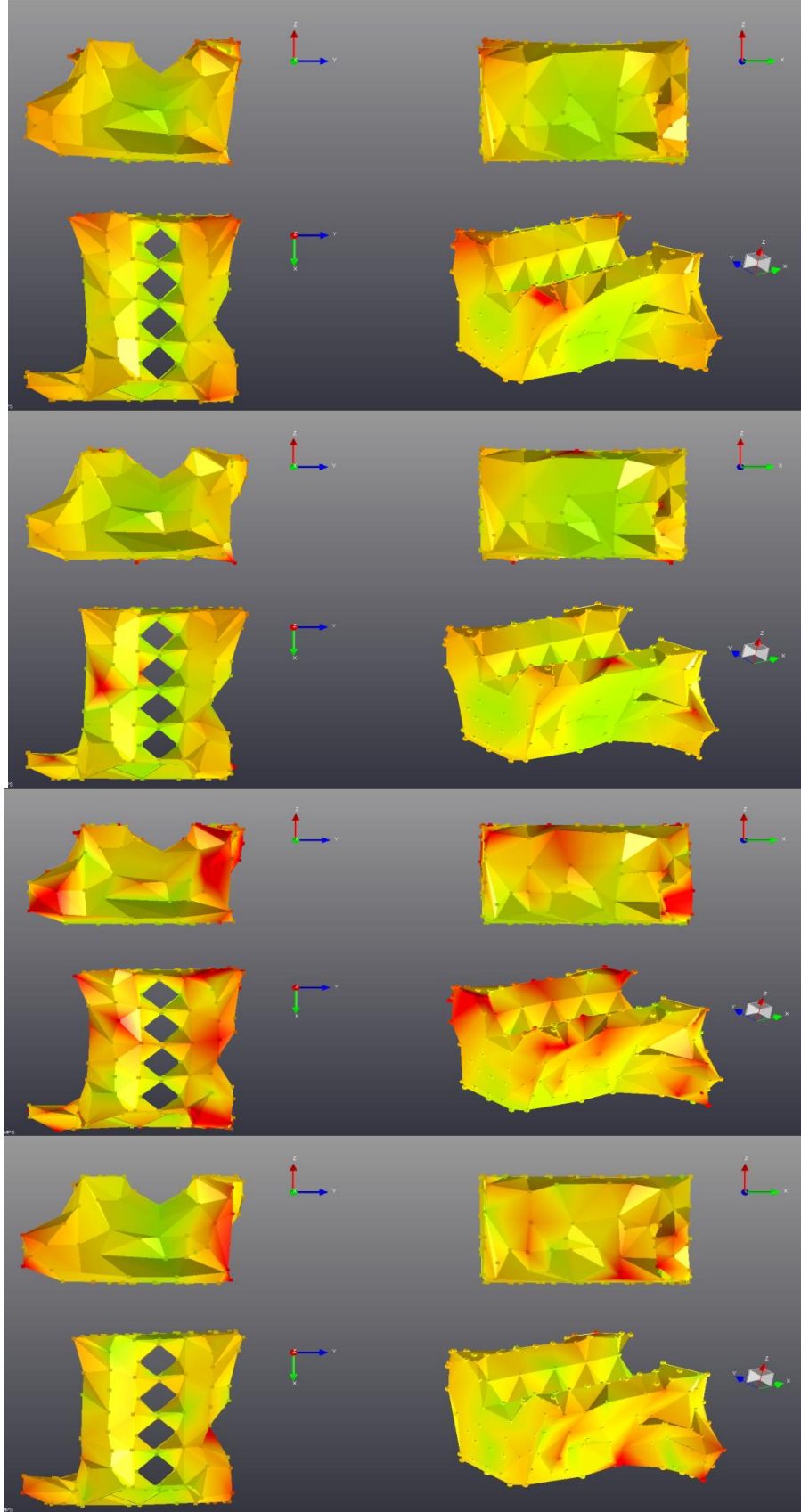


Şekil 4.9 : Motor bloğu modal test düzeneği.



Şekil 4.10 : Motor bloğu modal test sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonları.

Motor bloğu 76 numaralı noktadan modal çekiç ile tahrik edildi ve üzerinde bulunan 268 adet noktadan ivmeölçer aracılığıyla frekans tepki fonksiyonları elde edildi. Her noktadan X-Y-Z koordinatlarında ivme verisi toplandığından toplamda 804 adet frekans tepki fonksiyonu elde edildi. Bu verinin toplanması için 76 numaralı noktadan en az 300 defa modal çekiç ile vuruldu. (Ölçüm tekrarlanabilirliğini sağlamak için her noktada 3 defa olmak üzere ve yapılan yanlış vuruşlar ile beraber yapılan toplam vuruş sayısıdır.) Elde edilen frekans tepki fonksiyonları yapıya ait ilk birkaç doğal rezonans bölgesini içerecek şekilde Şekil 4.10'da görülebilmektedir. Test Lab programı polymax modülü yardımı ile elde edilen mod şekli önerileri, elde edilen frekans tepki fonksiyonları ile beraber detaylıca incelenerek Şekil 4.10'da da gösterildiği üzere motor bloğunun ilk 4 rezonans bölgesine ait doğal frekans ve mod şekli belirlenmiştir. Şekil 4.11'de yapıya ait ilk 4 rezonans bölgesine ait mod şekli görülmektedir.



Şekil 4.11 : Motor bloğu modal test sonucu elde edilen ilk 4 mod'a ait mod şekli.

4.2.1.2 Ladder frame

Bu çalışma kapsamında modal parametreleri belirlenecek bir diğer motor parçası, motor üzerinde, blok ile yağ karteri arasında yer alan ladder frame isimli parçadır. Bu modal test çalışmasında da yapılacak ilk işlem, yapının karmaşık geometrisinin ayrıntılı olarak elde edilmesini ve mod şekillerinin sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesini sağlayacak sayıda ölçüm noktasının yapı üzerinde belirlenmesi ve işaretlenmesidir. Karmaşık bir geometriye sahip bu parçanın mod şekillerinin hassas bir şekilde belirlenebilmesini sağlayacak kadar ölçüm noktası Şekil 4.12’de görüldüğü gibi yapı üzerindeki uygun yerlere işaretlenmiş ve numaralandırılmıştır. Şekil 4.12’de gösterildiği üzere ölçüm noktaları, parça üzerindeki girinti ve çıkıntıların elde edilebileceği şekilde belirlenmiş ve yapıya ait mod şekillerinin ayrıntılı ve sağlıklı bir şekilde görülebilmesi amaçlanmıştır.

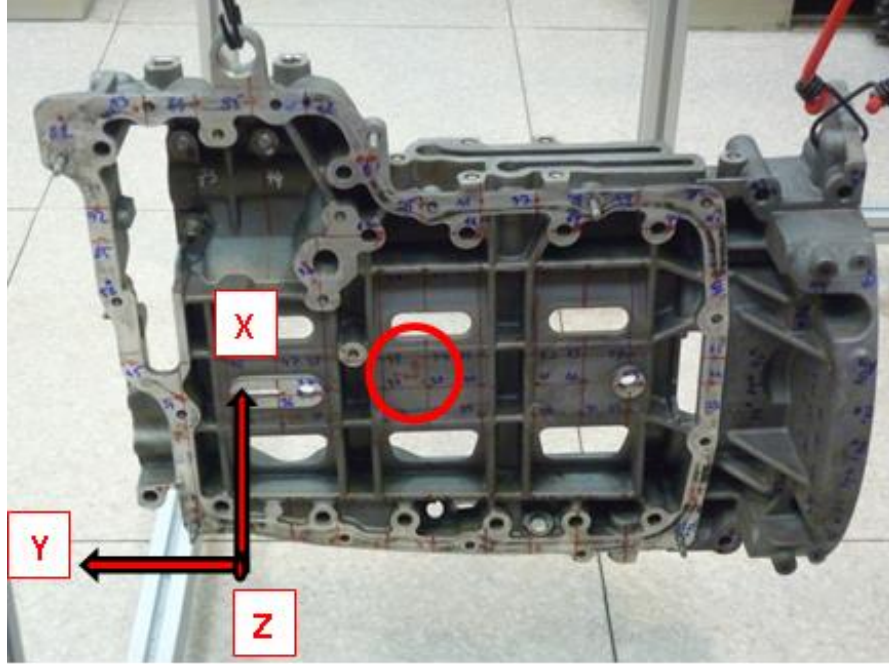


Şekil 4.12 : Modal test çalışması için ladder frame üzerinde işaretlenen ölçüm noktaları.

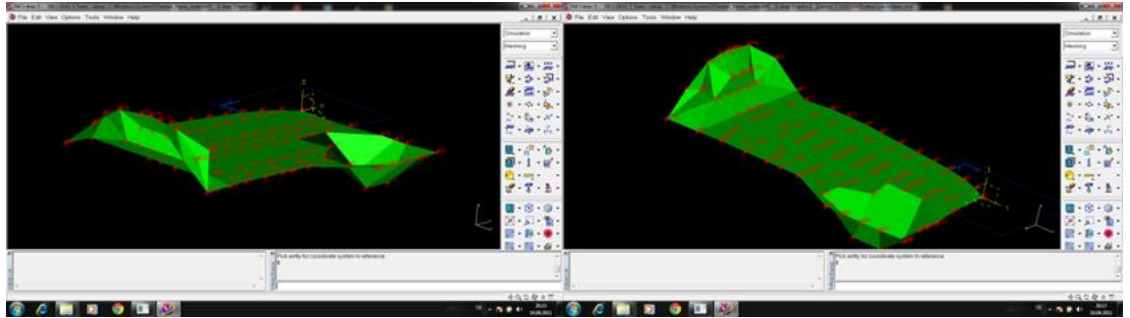
Modal test sonucu yapının mod şekillerinin elde edilebilmesi için, yapı üzerinden ölçüm aldığımız ve ayrıntılı bir şekilde yapının geometrisini elde ettiğimiz bu noktaların bilgisayar ortamına aktarılması gerekmektedir. Bu noktalar bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra, iki boyutlu elemanlar ile uygun şekilde birleştirilerek yapının üç boyutlu geometrisi elde edilir. Bölüm 4.2.1.1’de karmaşık geometrilere sahip yapılarda, ölçüm noktalarının LMS Test Lab programı yerine I-DEAS programı ile bilgisayar ortamına aktarılmasının üstünlüklerinden bahsedilmiştir.

Modal test gerçekleştirilirken kullanılacak olan koordinat sistemi, yapı üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.13’de görüldüğü üzere yapı üzerine çizilmiştir. Bu koordinat sistemi aynı zamanda yapı üzerindeki ölçüm noktalarının bilgisayar ortamına aktarılması için de kullanılmıştır. Daha sonra, bilgisayar ortamına aktarılan ölçüm

noktaları geometriye uygun bir şekilde birleştirilmiştir. Ladder frame parçasının I-DEAS programı kullanılarak oluşturulan ve ölçüm noktalarını içeren üç boyutlu geometrisi Şekil 4.14’de görülmektedir.



Şekil 4.13 : Ladder frame üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının bilgisayar ortamına aktarılması.



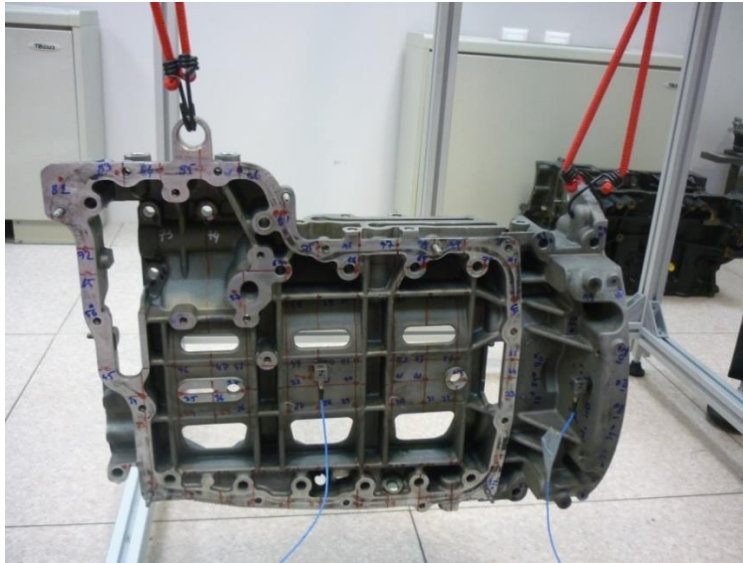
Şekil 4.14 : Ladder frame üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının I-DEAS programı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılması ile elde edilen 3D model.

Yapı üzerinde ölçüm noktaları ile koordinat sistemi belirlendikten ve bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra, ladder frame Şekil 4.15’de görüldüğü gibi askı düzeneğine serbest koşullarda asılmıştır.

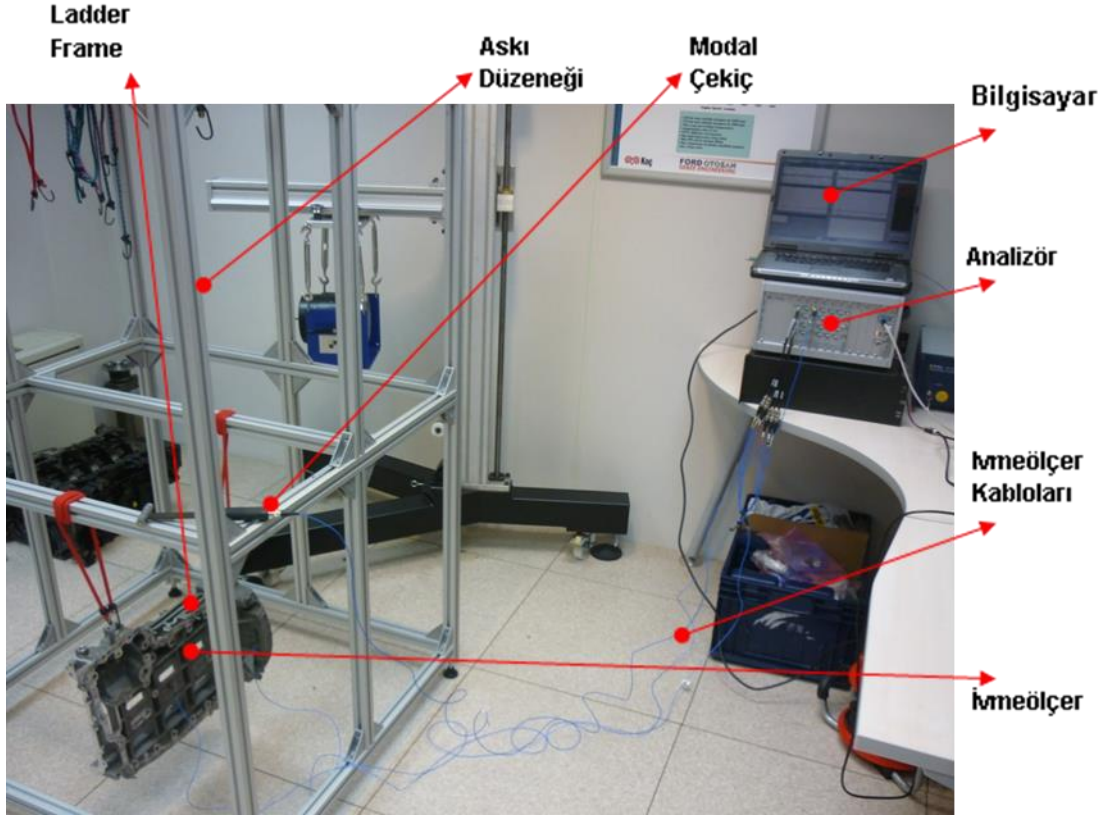


Şekil 4.15 : Ladder frame'in modal test gerçekleştirilmek üzere askı düzeneğine serbest-serbest koşullarda asılması.

Yapının motor bloğuna göre nispeten basit olan geometrisi nedeniyle, ladder frame üzerinde yapılan modal test sırasında modal çekicinin gezdirilmesi ve Şekil 4.16'da gösterildiği gibi 2 adet ivmeölçer'in yapının uygun yerlerinde tutulması tercih edilmiştir. Ölçüm düzeneği Şekil 4.17'de görülmektedir.

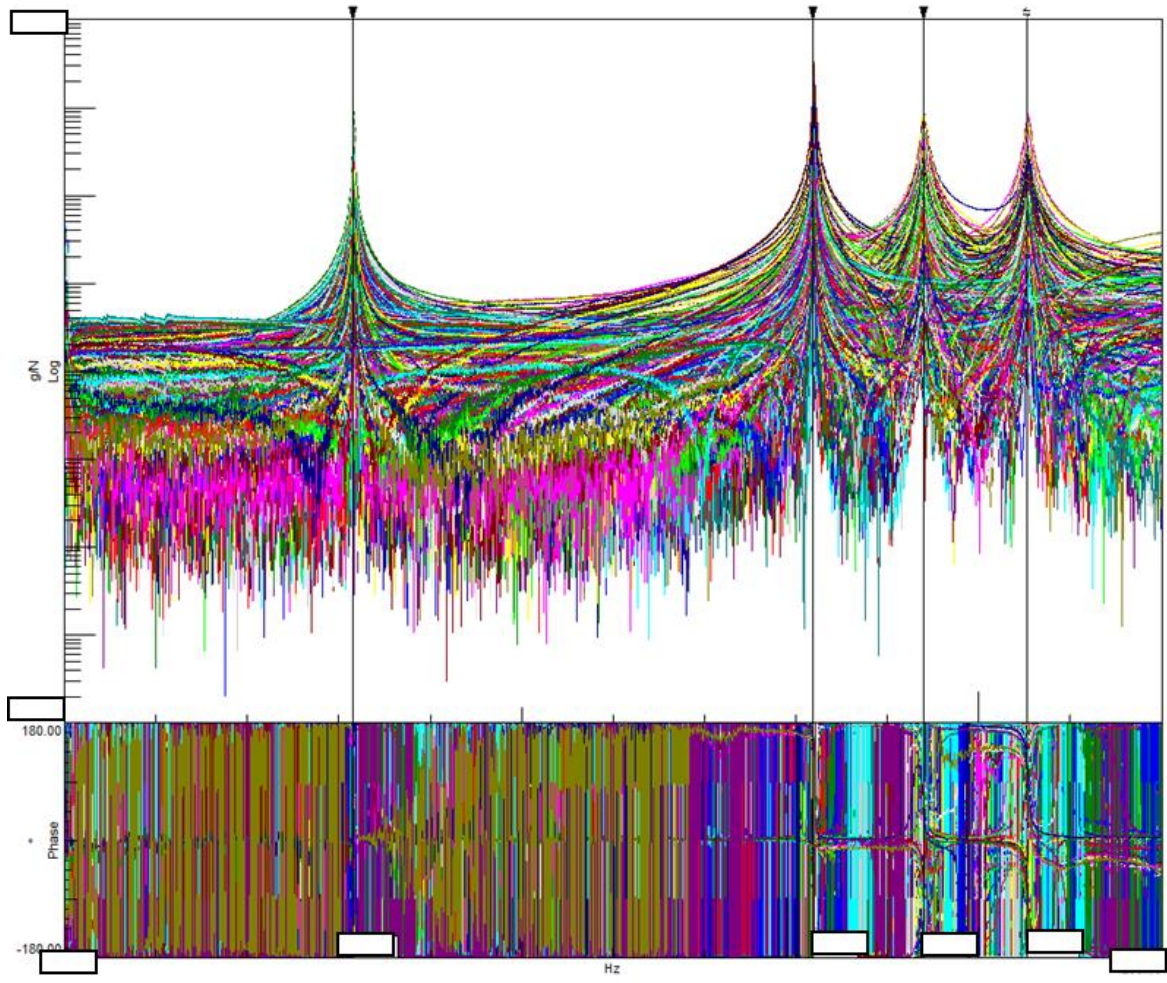


Şekil 4.16 : Ladder frame'in modal çekici gezdirilerek ve 2 adet ivmeölçerin sabit tutularak (50 ve 109 numaralı ölçüm noktaları) modal testinin gerçekleştirilmesi.

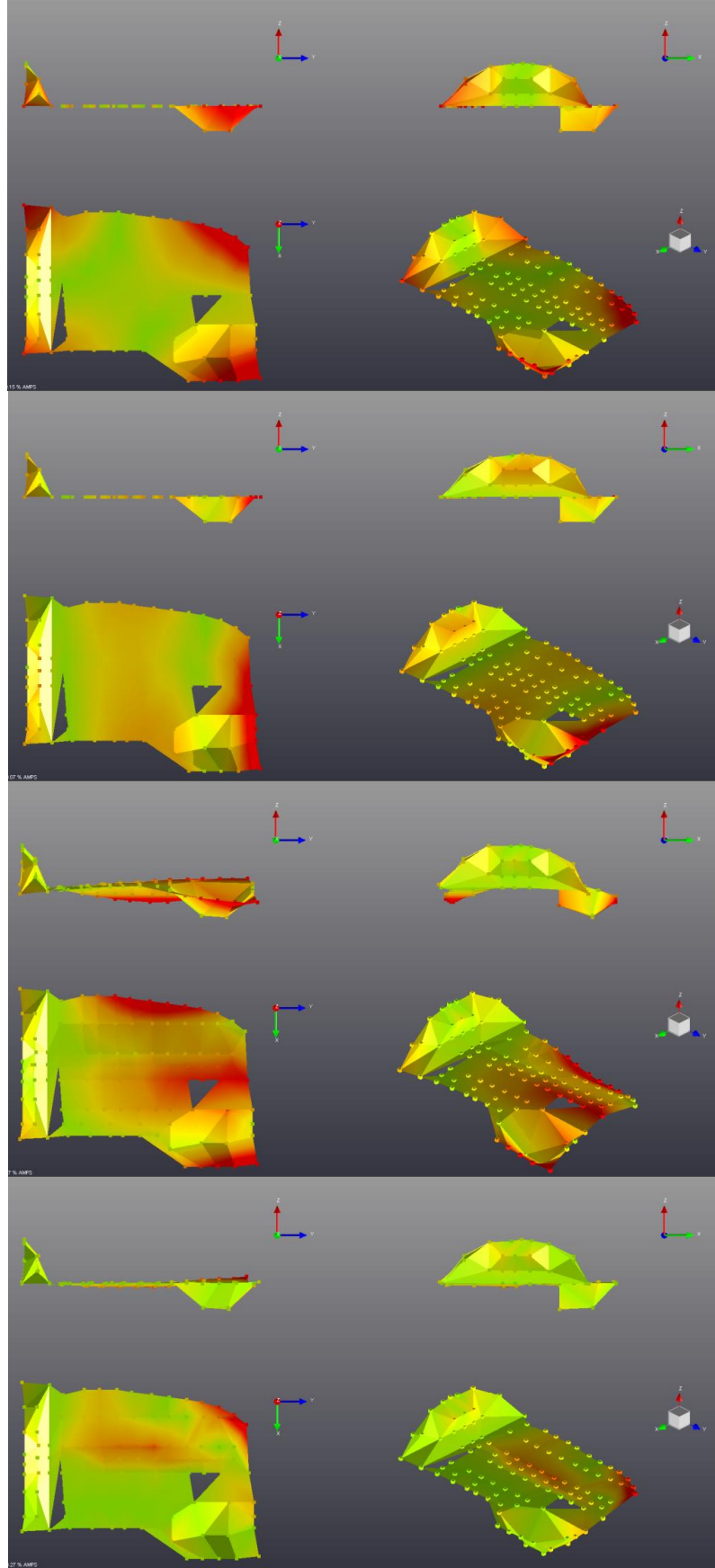


Şekil 4.17 : Ladder frame modal test düzeneği.

Ladder frame üzerindeki 110 noktada modal çekiç gezdirilerek, yapı üzerine yerleştirilmiş 2 adet ivmeölçer'den X-Y-Z yönlerinde ivme verisi toplanmıştır. Böylece 660 adet frekans tepki fonksiyonu elde edilmiştir. Bu verinin toplanması için yapı üzerindeki ölçüm noktalarından yaklaşık 400 defa modal çekiç ile vurulmuştur (Ölçüm tekrarlanabilirliğinin sağlanması için her noktadan 3 defa olmak üzere ve yapılan yanlış vuruşlar ile beraber gerçekleştirilen toplam vuruş sayısıdır.). Elde edilen frekans tepki fonksiyonları, yapıya ait ilk birkaç doğal rezonans bölgesini içerecek şekilde Şekil 4.18'de görülebilmektedir. Test Lab programı polymax modülü tarafından yapılan mod şekli önerileri elde edilen frekans tepki fonksiyonları ile beraber detaylıca incelenerek Şekil 4.18'de de gösterildiği üzere ladder frame parçasının ilk 4 rezonans bölgesine ait doğal frekans ve mod şekli belirlenmiştir. Şekil 4.19'da yapıya ait ilk 4 rezonans bölgesine ait mod şekli görülmektedir.



Şekil 4.18 : Ladder frame modal test sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonları.



Şekil 4.19 : Ladder frame modal test sonucu elde edilen ilk 4 mod'a ait mod şekilleri.

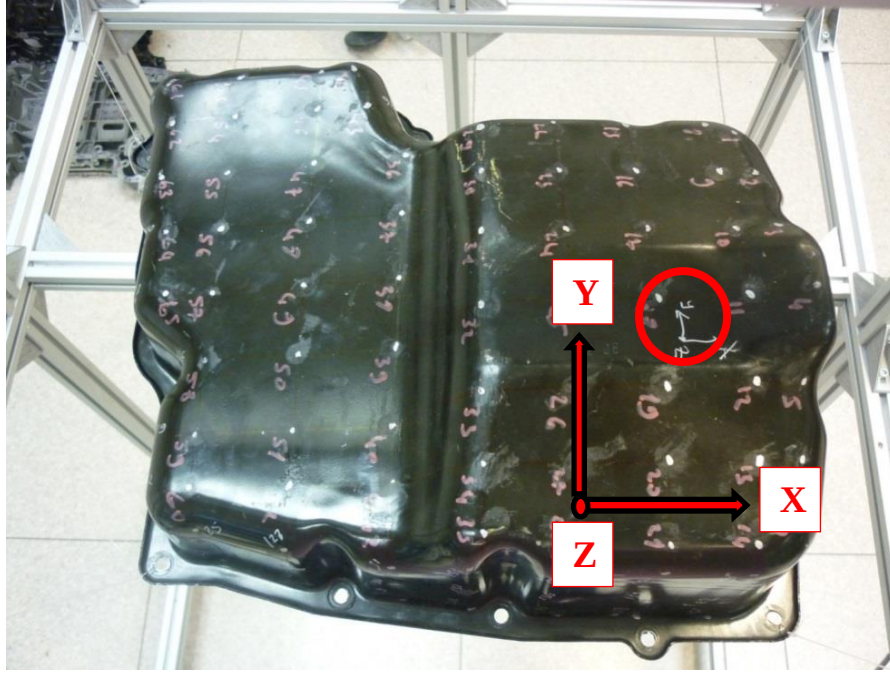
4.2.1.3 Yağ karteri

Bu çalışma kapsamında modal parametreleri belirlenecek bir diğer motor parçası yağ karteridir. Bu modal test çalışmasında da yapılacak ilk işlem, yapının geometrisinin ayrıntılı olarak elde edilmesini ve mod şekillerinin sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesini sağlayacak sayıda ölçüm noktasının yapı üzerinde belirlenmesi ve işaretlenmesidir. Mod şekillerinin hassas bir şekilde belirlenebilmesini sağlayacak kadar ölçüm noktası Şekil 4.20’de görüldüğü gibi yapı üzerindeki uygun yerlere işaretlenmiş ve numaralandırılmıştır.

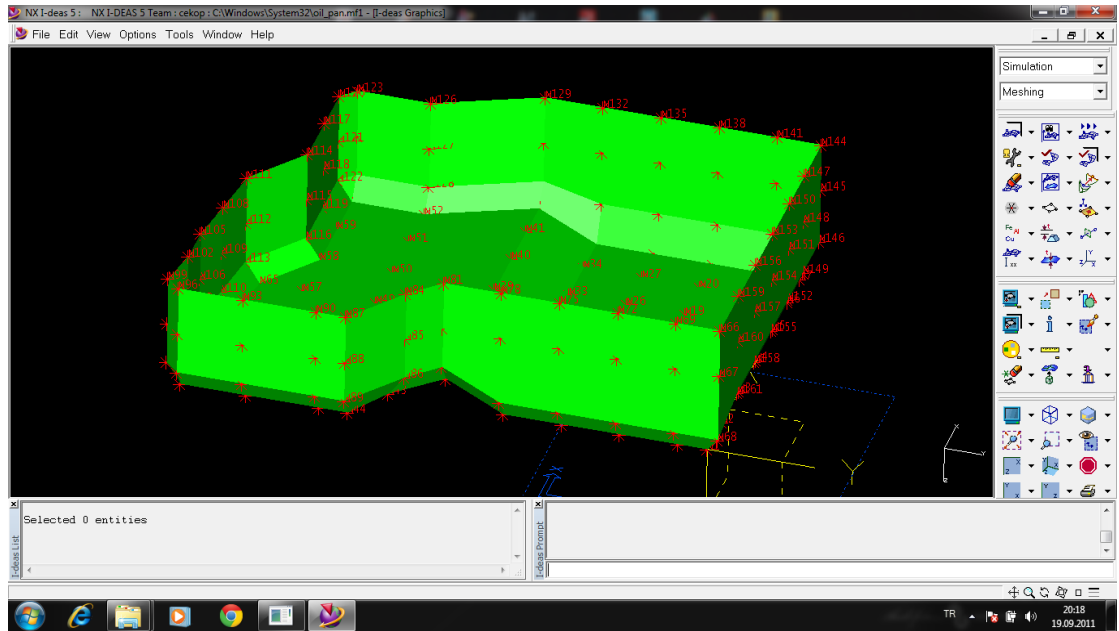


Şekil 4.20 : Modal test çalışması için yağ karteri üzerinde işaretlenen ölçüm noktaları.

Modal test sonucu yapının mod şekillerinin elde edilebilmesi için, yapı üzerinden ölçüm aldığımız ve ayrıntılı bir şekilde yapının geometrisini elde ettiğimiz bu noktaların bilgisayar ortamına aktarılması gerekmektedir. Bu noktalar bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra, iki boyutlu elemanlar ile uygun şekilde birleştirilerek yapının üç boyutlu geometrisi elde edilir. Modal test gerçekleştirilirken kullanılacak olan koordinat sistemi belirlenmiştir ve Şekil 4.21’de görüldüğü üzere yapı üzerine çizilmiştir. Bu koordinat sistemi aynı zamanda yapı üzerindeki ölçüm noktalarının bilgisayar ortamına aktarılması için de kullanılmıştır. Daha sonra bilgisayar ortamına aktarılan ölçüm noktaları, geometriye uygun bir şekilde birleştirilmiştir. Yağ karterinin I-DEAS programı kullanılarak oluşturulan ve ölçüm noktalarını içeren üç boyutlu geometrisi Şekil 4.22’de görülmektedir.



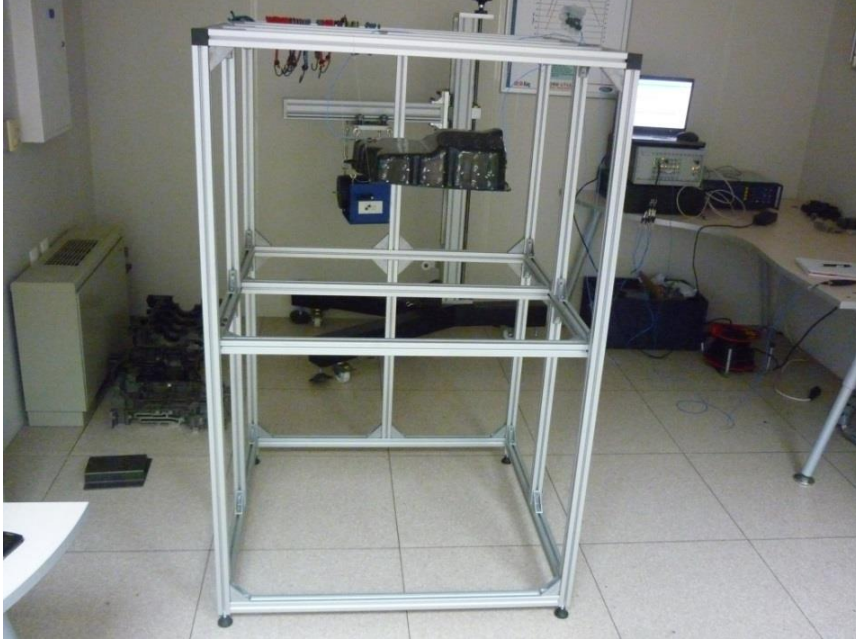
Şekil 4.21 : Yağ karteri üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının bilgisayar ortamına aktarılması.



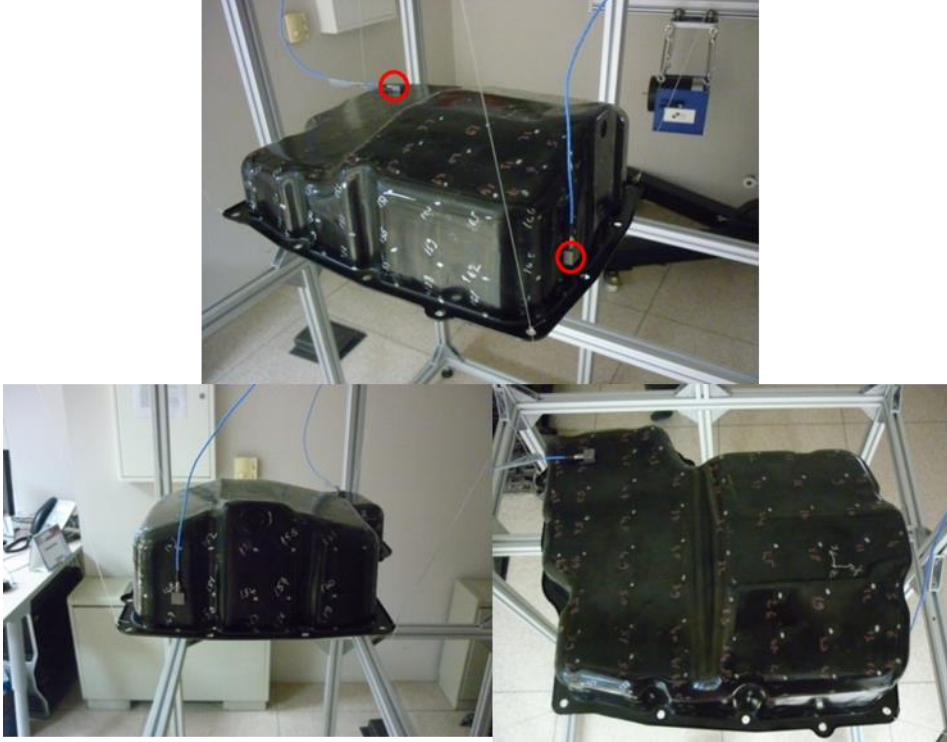
Şekil 4.22 : Yağ karteri üzerinde işaretlenen ölçüm noktalarının I-DEAS programı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılması ile elde edilen 3D model.

Yapı üzerinde, ölçüm noktaları ile koordinat sistemi belirlendikten ve bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra, yağ karteri Şekil 4.23’de görüldüğü gibi askı düzeneğine serbest koşullarda asılmıştır. Geometrinin uygunluğundan dolayı yağ karteri üzerinde yapılan modal test sırasında modal çekicinin gezdirilmesi ve 2 adet

ivmeölçer'in yapının uygun yerlerinde tutulması tercih edilmiştir. İvmeölçer yerleri Şekil 4.24'de gösterilmiştir.

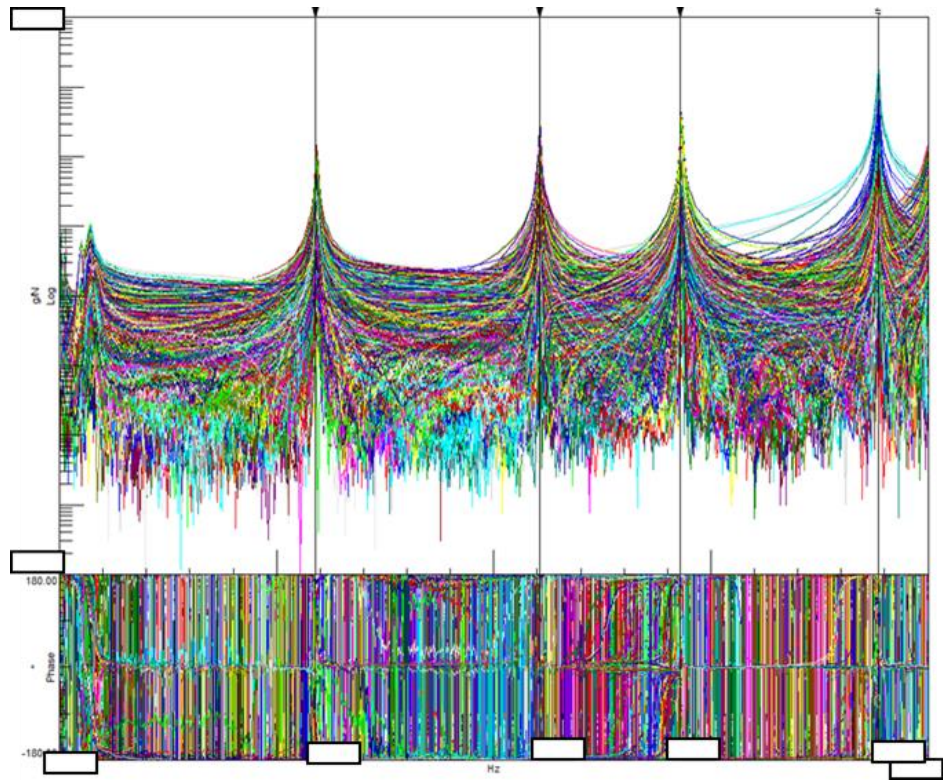


Şekil 4.23 : Yağ karteri'nin modal test gerçekleştirilmek üzere askı düzeneğine serbest-serbest koşullarda asılması.



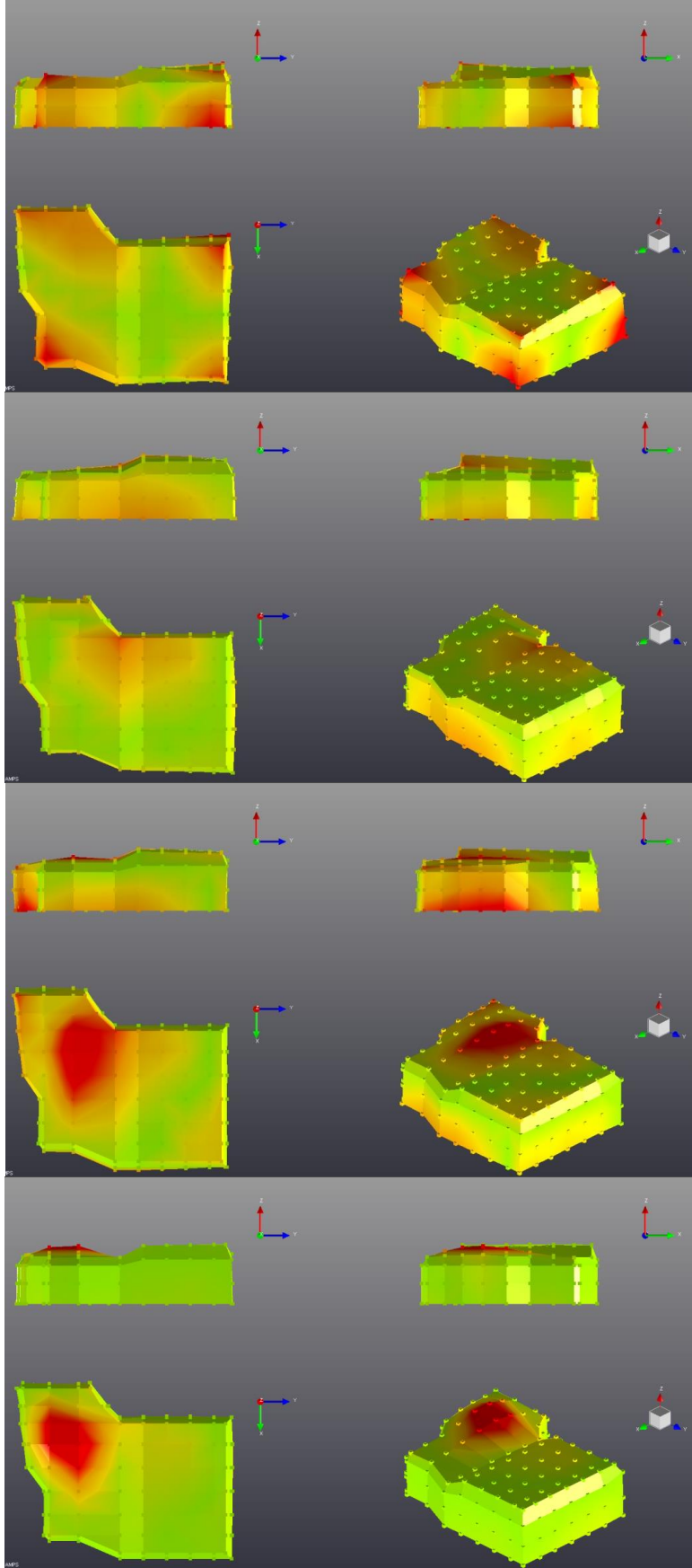
Şekil 4.24 : Yağ karterinin modal çekiç gezdirilerek ve 2 adet ivmeölçerin sabit tutularak (54 ve 148 numaralı ölçüm noktaları) modal testinin gerçekleştirilmesi.

Yağ karteri üzerindeki 161 noktada modal çekiç gezdirilerek, yapı üzerine yerleştirilmiş 2 adet ivmeölçer'den X-Y-Z yönlerinde ivme verisi toplanmıştır. Böylece 966 adet frekans tepki fonksiyonu elde edilmiştir. Bu verinin toplanması için yapı üzerindeki ölçüm noktalarından yaklaşık 600 defa modal çekiç ile vurulmuştur. (Ölçüm tekrarlanabilirliğini sağlamak için her noktada 3 defa olmak üzere ve yapılan yanlış vuruşlar ile beraber yapılan toplam vuruş sayısıdır.) Elde edilen frekans tepki fonksiyonları, yapıya ait ilk birkaç doğal rezonans bölgesini içerecek şekilde Şekil 4.25'de görülmektedir.



Şekil 4.25 : Yağ karteri modal test sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonları.

Test Lab programı polymax modülü yardımı ile elde edilen mod şekli önerileri, elde edilen frekans tepki fonksiyonları ile beraber detaylıca incelenerek Şekil 4.25'de de gösterildiği üzere yağ karterinin ilk 4 rezonans bölgesine ait doğal frekans ve mod şekli belirlenmiştir. Şekil Şekil 4.26'da yapıya ait ilk 4 rezonans bölgesine ait mod şekli görülmektedir.



Şekil 4.26 : Yağ karteri modal test sonucu elde edilen ilk 4 mod'a ait mod şekilleri.

4.2.2 Malzeme sönümünün belirlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, üzerinde çalışılan motor parçalarının malzeme sönümü değerleri, bölüm 3’de yapılan çalışmalar dikkate alınarak hassas bir şekilde ölçülmeye çalışılacaktır. Elde edilen deneysel sönüm değerleri daha sonra bölüm 4.3’de yapılacak sayısal çalışmalar sırasında kullanılacaktır. Böylece motor parçalarının sayısal modellerinin doğrulukları, deneysel sonuçlar ile bir de titreşim genliği bakımından korele edilmeye çalışılacaktır. Ayrıca bu bölümde elde edilen deneysel sönüm değerleri kullanılarak, bölüm 4.3’de yapılan çalışmalar sırasında, sönüm değerlerinin sayısal modelleme için kullanılan ticari programa ne şekilde girilebileceği incelenecektir. Son olarak, bu bölümde yapılan deneysel çalışma sonucu olarak elde edilen malzeme sönümü değerleri ile hali hazırda kullanılan empirik malzeme sönümlerinin analiz sonuçlarına etkisi ve malzeme sönümünün deneysel ölçülmesinin avantajlı olup olmadığı bölüm 4.3’de incelenecektir.

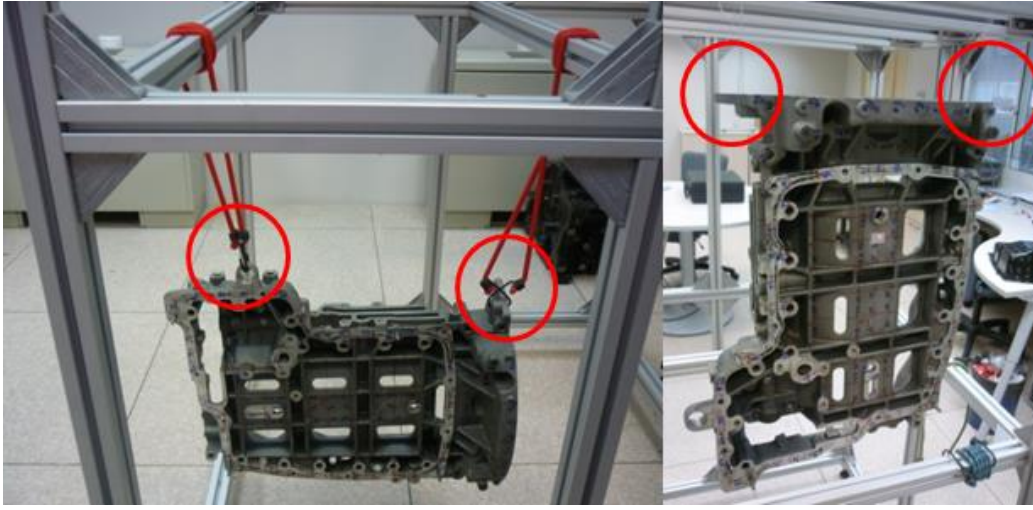
Bölüm 3’de açıklandığı üzere, malzeme sönümü testlerinde yapıya temas etmeyen ölçüm cihazlarının en hassas sonucu vermesi nedeniyle, bu bölümde de yapıyı tahrik etmek amacıyla modal çekiç ve yapının cevabını ölçmek için lazer titreşimölçer kullanılacaktır. Sistem cevabı sabit bir noktadan ölçülerek, yapılar farklı bölgelerinden tahrik edilecek ve böylece yapının genel sönüm karakteristiği elde edilmeye çalışılacaktır. Ayrıca bölüm 3’de basit test parçaları için elde edilen “yapı üzerinden tek bir frekans tepki fonksiyonundan elde edilen sönüm değeri yapının sönüm değerini temsil edebilir” sonucunun, karmaşık motor parçalarında da geçerli olup olmadığı kontrol edilecektir.

Bu çalışma kapsamında ladder frame ve yağ karteri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

4.2.2.1 Ladder frame

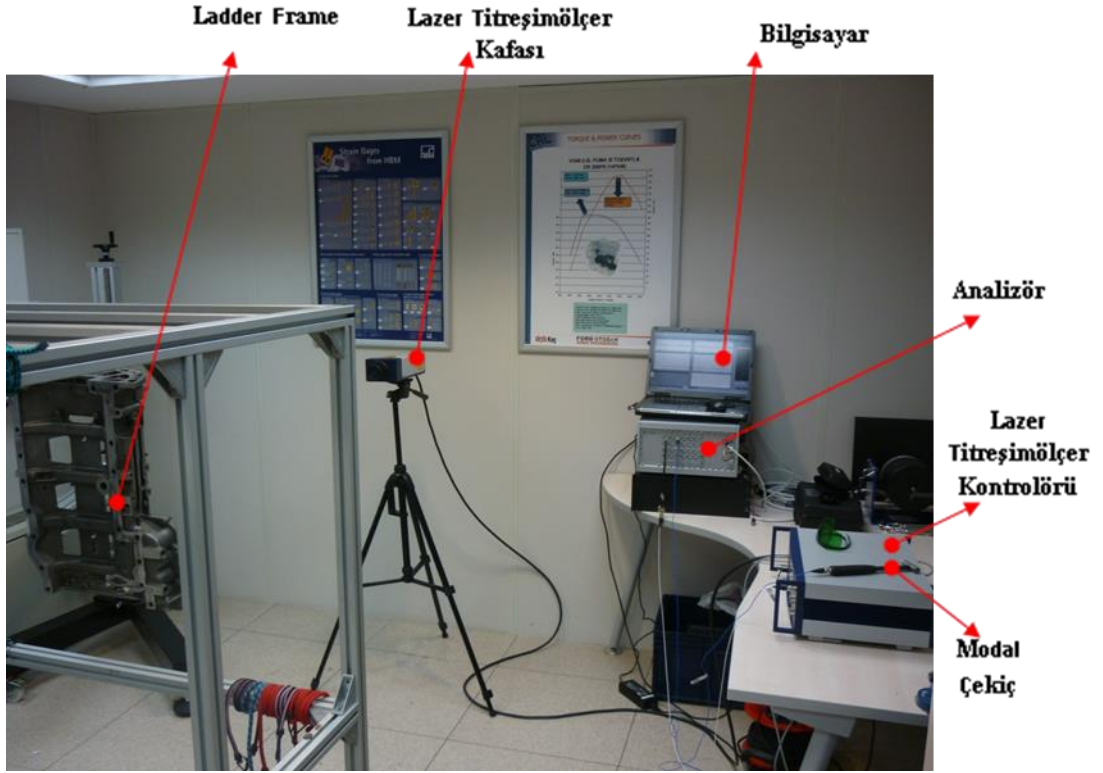
Bölüm 4.2.1.2’de gerçekleştirilen modal test çalışması sebebiyle, ölçüm noktaları yapı üzerinde hali hazırda bulunmaktadır. Bu sebeple modal test gerçekleştirilmek üzere, parça doğrudan asılmıştır. Ölçülecek sönüm değerlerine katkı yapmaması için, yapının bölüm 3’de belirtilen kurallara uygun şekilde asılmasına özen gösterilmiştir. Bölüm 4.2.1.2’de doğal frekans ve mod şekli elde etmek için yapılan modal test ve bu kısımda malzeme sönümü elde etmek amacıyla yapılan modal test için parçaların asılması arasındaki fark, Şekil 4.27’de görülmektedir. Doğal frekans & mod şekli

elde etmek amacıyla yapılan modal test çalışmasının aksine, malzeme sönümü elde etmek amacıyla yapılan test için yapının nasıl asılması gerekeceği çok daha fazla önem kazanmıştır. Malzeme sönümü testlerinde bölüm 3’de belirtildiği üzere, yapı mümkün olduğu kadar az sarılacak şekilde asılarak yapıya ekstra sönüm eklenmemesine çalışılmıştır. Bu sebeple, yapı ağırlığı da izin verdiği için ince misina ipleri kullanılarak ve ipin yapıya mümkün mertebe az temas ettirilmesine dikkat edilerek asılmıştır.

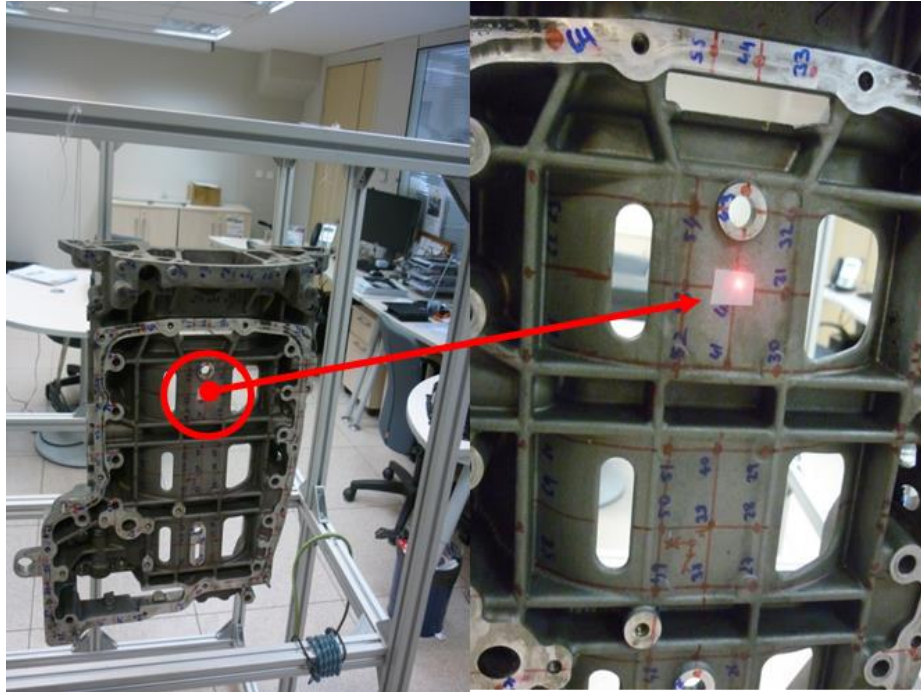


Şekil 4.27 : Sırasıyla doğal frekans & mod şekli elde etmek amacıyla yapılan ve malzeme sönümü elde etmek amacıyla yapılan modal testler sırasında, ladder frame’in farklı asılış biçimleri.

Modal çekiç ile tahrik edildikten sonra yapının cevabını ölçmek için kullanılan lazer titreşimölçer cihazı, temel olarak yapı üzerine bir sinyal gönderme ve bu sinyalin yapı üzerinden geri yansımaya prensibine sahiptir. Bölüm 4.2.2’de anlatıldığı üzere yapı, modal çekiç ile farklı noktalardan tahrik edilmiş ve cevabı tek bir noktadan lazer titreşimölçer ile ölçülmüştür. Kullanılan test düzeneği Şekil 4.28’de görülmektedir. Bu şekilde elde edilen farklı frekans tepki fonksiyonlarından sönüm değerleri hesaplanarak, yapının genel sönüm karakteristiği elde edilmeye çalışılmıştır. Bu sebeple Şekil 4.29’da görüldüğü üzere, 42 numaralı ölçüm noktasına yansıtıcı kağıt yapıştırılarak, lazer titreşimölçer tarafından temiz bir veri alınmasına çalışılmıştır.

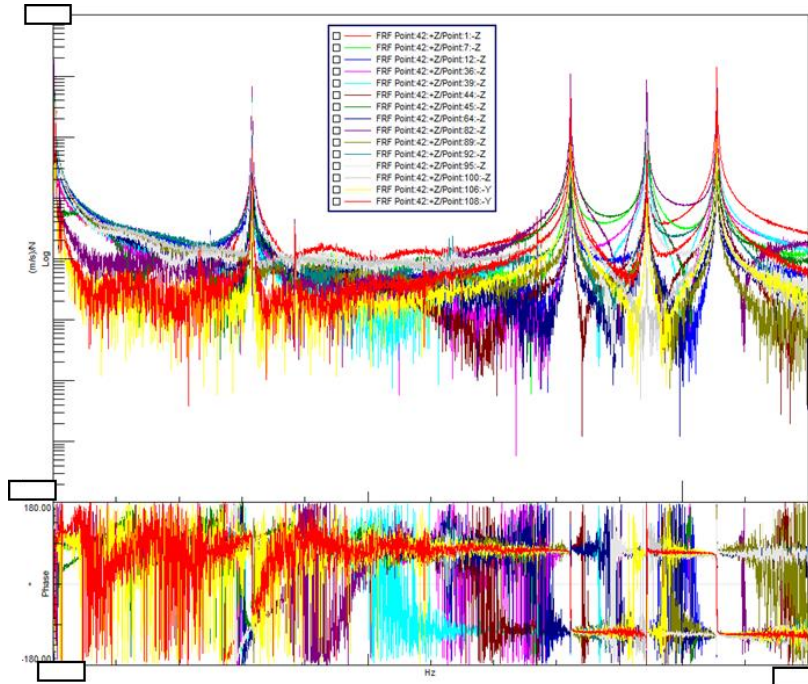


Şekil 4.28 : Ladder frame malzeme sönümü için gerçekleştirilen modal test düzeneği.



Şekil 4.29 : Lazer titreşimölçer kullanılarak sistem cevabının elde edilmesi.

Lazer titreşimölçer 42 numaralı ölçüm noktasında sabit tutularak, yapının 15 farklı ölçüm noktasından modal çekiç ile tahrik edilmesi sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonları Şekil 4.30'da görülmektedir. Daha önce belirtildiği gibi, yapının genel sönüm karakteristiğinin elde edilmesi amacıyla yapının farklı noktalarından tahrik edilmesi sonucu elde edilen bu 15 adet frekans tepki fonksiyonundan, malzeme sönümü değerleri ayrı ayrı elde edilmiştir. Ayrıca bu 15 adet frekans tepki fonksiyonunun tamamının kullanıldığı toplam frekans tepki fonksiyonundan da sönüm değeri hesaplanarak, ayrı ayrı bulunan değerlerin toplam frekans tepki fonksiyonundan hesaplanan değer ile karşılaştırılması suretiyle, her bir frekans tepki fonksiyonunun yapının sönüm karakteristiğini ne ölçüde temsil ettiği anlaşılmaya çalışılmıştır. Her bir frekans tepki fonksiyonundan elde edilen sönüm değerinin, yapının genel sönüm karakteristiğini ne ölçüde temsil ettiğini anlayabilmek için bir de aritmetik ortalama yolu tercih edilmiştir. Her bir noktadan elde edilen sönüm değerlerinin aritmetik ortalaması alınmış ve tekil değerlerin ortalamadan ne ölçüde saptığına bakılmıştır. Ölçüm sonuçları ve aritmetik ortalama değerleri Çizelge 4.1'de görülmektedir. Çizelge 4.1'deki tüm doğal frekans ve sönüm oranı değerleri 39 numaralı noktadan vurulması sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonunun 1. moduna karşılık gelen doğal frekans ve sönüm oranı değerlerine göre normalize edilerek verilmiştir.



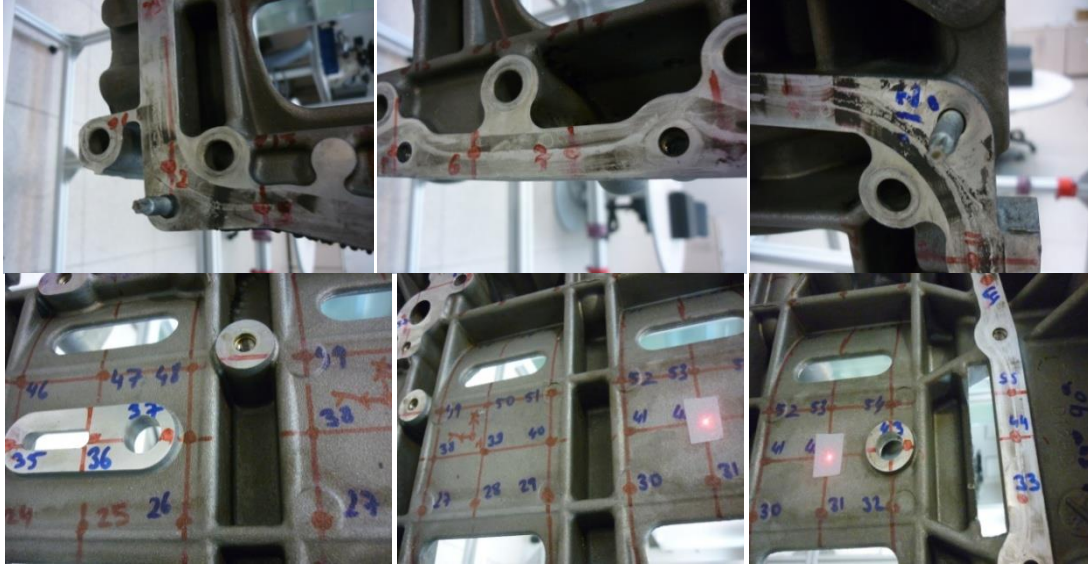
Şekil 4.30 : Ladder frame malzeme sönümü modal test sonucu elde edilen 15 adet frekans tepki fonksiyonu.

Çizelge 4.1 : Ladder frame modal test sonucu elde edilen malzeme sönümü değerleri (Ölçüm noktası 39 ilk doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranı değerlerine göre normalize edilmiştir).

	1. Mod		2. Mod		3. Mod		4. Mod	
	Doğal Frekans (Wn) (Hz)	Sönüm Oranı (ζ) (%)	Doğal Frekans (Wn) (Hz)	Sönüm Oranı (ζ) (%)	Doğal Frekans (Wn) (Hz)	Sönüm Oranı (ζ) (%)	Doğal Frekans (Wn) (Hz)	Sönüm Oranı (ζ) (%)
Ölçüm Noktası 1	1,000	0,914	2,603	4,023	2,986	4,444	3,339	3,344
Ölçüm Noktası 7	1,000	0,582	2,603	3,842	2,986	4,808	3,339	3,376
Ölçüm Noktası 12	1,000	0,808	2,603	3,559	2,987	4,320	3,340	3,081
Ölçüm Noktası 36	1,000	0,886	2,603	3,738	2,986	4,118	3,339	3,116
Ölçüm Noktası 39	1,000	1,000	2,603	3,579	2,986	4,078	3,339	3,031
Ölçüm Noktası 44	-	-	2,603	3,678	2,987	4,084	3,340	3,462
Ölçüm Noktası 45	1,000	1,084	2,603	4,063	2,986	4,206	3,339	3,306
Ölçüm Noktası 64	1,000	0,920	2,603	3,544	2,986	3,771	3,339	3,127
Ölçüm Noktası 82	1,000	0,668	2,603	3,658	2,986	3,812	3,339	3,251
Ölçüm Noktası 89	1,000	0,805	2,603	3,596	2,987	3,743	3,340	3,310
Ölçüm Noktası 92	1,000	1,128	2,603	3,442	2,987	3,811	3,340	3,543
Ölçüm Noktası 95	1,000	0,991	2,603	3,401	2,986	3,823	3,339	3,099
Ölçüm Noktası 100	1,000	1,413	2,603	3,403	-	-	3,339	3,399
Ölçüm Noktası 106	-	-	2,603	3,638	2,987	3,989	3,340	3,406
Ölçüm Noktası 108	1,000	0,393	2,603	3,590	2,987	3,708	3,339	3,287
Toplam Frekans Tepki Fonksiyonu	1,000	0,773	2,603	3,817	2,986	4,155	3,339	3,299
Aritmetik Ortalama	1,000	0,892	2,603	3,650	2,986	4,051	3,339	3,276

Çizelge 4.1 incelendiğinde, ölçüm yapılan her noktadan ayrı ayrı elde edilen frekans tepki fonksiyonları kullanılarak hesaplanan sönüm oranı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve bu farklı 15 frekans tepki fonksiyonunun bir araya gelmesiyle meydana gelen toplam frekans tepki fonksiyonu kullanılarak elde edilen sönüm oranı değeri ile örtüştüğü görülmektedir. Ayrıca farklı noktalardan elde edilen malzeme sönümü değerlerinin aritmetik ortalaması sonucu hesaplanan doğal frekans ve sönüm oranı değerleri de tekil sonuçlar ile yakın çıkmaktadır. Böylece bölüm 3’de belirtildiği gibi, yapı üzerinden ilk birkaç mod’un tahrik edilebileceği uygun bir noktadan elde edilen frekans tepki fonksiyonundan hesaplanan sönüm değerinin, yapının genel sönüm karakteristiğini ortaya koyabildiği bu çalışma ile de görülebilmektedir. Ancak motor bloğu, ladder frame ve yağ karteri gibi karmaşık ve büyük geometrilere sahip yapılar üzerinden, yapının farklı noktalarından birkaç adet frekans tepki fonksiyonu toplanması ve bu frekans tepki fonksiyonlarının Çizelge 4.1’deki gibi incelenerek yapının genel sönüm karakteristiğinin elde edilmeye

alışılması, daha güvenilir sonuçlar sağlayacaktır. Şekil 4.31’de yapının tahrik edildiği ölçüm noktalarından bazıları görülmektedir.



Şekil 4.31 : Ladder frame malzeme sönümü modal test ölçüm noktaları – sırasıyla 1, 7, 12, 36, 39, 44.

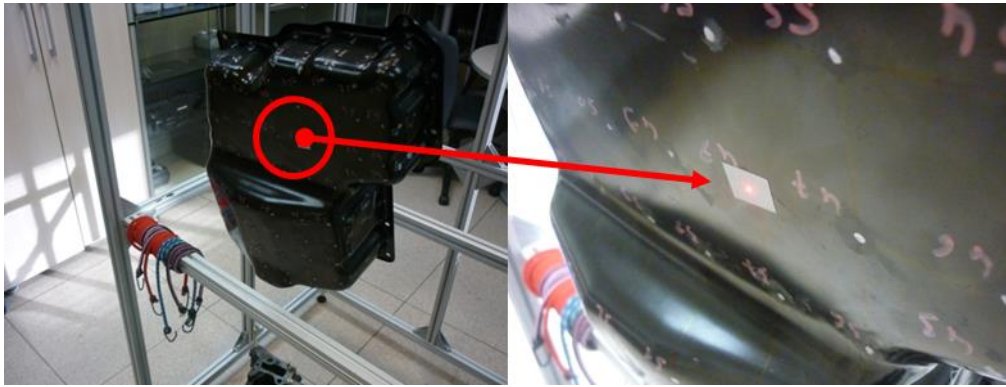
4.2.2.2 Yağ karteri

Yağ karteri, Bölüm 4.2.1.3’de yapılan modal test sırasında da hafifliğinden dolayı, misina ipleri kullanılarak asılmıştı. Sönüm testleri sırasında da bu Şekilde asılmıştır. Böylece sönüm testlerinde özellikle önem gerektiren, askı aparatının yapıya az temas etmesi sağlanmıştı. Ancak hem misina iplerinin yapıya daha da az temas etmesini sağlamak hem de lazer titreŐimler ile yapının daha yüksek titreşim genliği gösteren bölgelerinden ölçüm yapabilmek amacıyla, Şekil 4.32’de görüldüğü gibi dik asılmıştır.

Bölüm 4.2.2’de anlatıldığı üzere, yapının cevabı sabit bir noktadan llecek ve yapı farklı noktalardan modal eki ile tahrik edilerek elde edilen farklı frekans tepki fonksiyonlardan sönüm değerleri hesaplanarak, yapının genel sönüm karakteristiği elde edilmeye çalışılacaktır. Bu sebeple Şekil 4.33’de görüldüğü üzere, 48 numaralı ölçüm noktasına yansıtıcı kağıt yapıştırılarak lazer titreŐimler tarafından temiz bir veri alınmasına çalışılmıştır. Lazer titreŐimler kullanılarak malzeme sönümü elde edilmesi için kullanılan lm düzeneği Şekil 4.34’de görülmektedir.



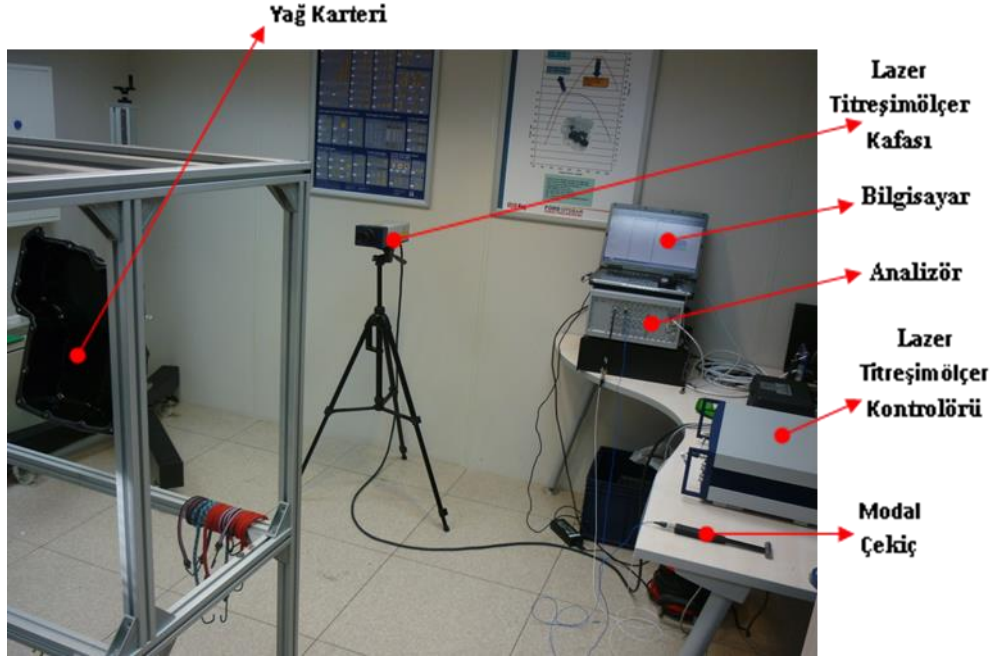
Şekil 4.32 : Sırasıyla doğal frekans & mod şekli elde etmek amacıyla yapılan ve malzeme sönümü elde etmek amacıyla yapılan modal testler sırasında yağ karteri'nin farklı asılış biçimleri.



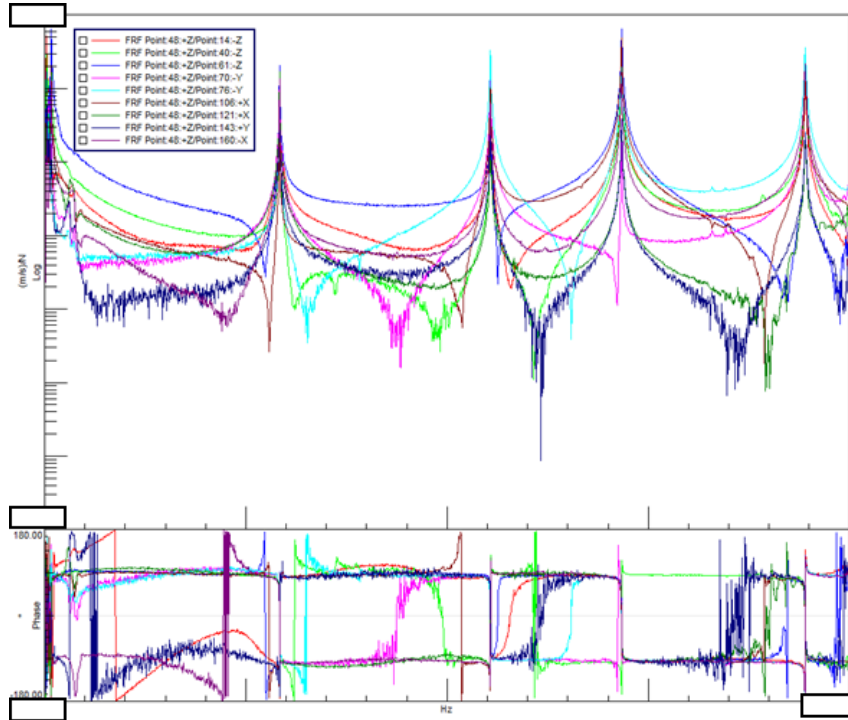
Şekil 4.33 : Lazer titreşimölçer kullanılarak sistem cevabının elde edilmesi.

Lazer titreşimölçer 48 numaralı ölçüm noktasında sabit tutularak yapının, 9 farklı ölçüm noktasından modal çekiç ile tahrik edilmesi sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonları Şekil 4.35'de görülmektedir. Daha önce belirtildiği gibi yapının genel sönüm karakteristiğinin elde edilmesi amacıyla, yapının farklı noktalarından tahrik edilmesi sonucu elde edilen bu 9 adet frekans tepki fonksiyonundan malzeme sönümü değerleri ayrı ayrı elde edilmiştir. Ayrıca bu 9 adet frekans tepki fonksiyonunun tamamını temsil eden toplam frekans tepki fonksiyonundan da sönüm değeri hesaplanarak, ayrı ayrı bulunan değerlerin toplam frekans tepki fonksiyonundan hesaplanan değerler ile karşılaştırılması suretiyle, her bir frekans tepki fonksiyonunun yapının sönüm karakteristiğini ne ölçüde temsil ettiği anlaşılmaya çalışılmıştır. Her bir frekans tepki fonksiyonundan elde edilen sönüm değerinin, yapının genel sönüm karakteristiğini ne ölçüde temsil ettiğini anlayabilmek için, ladder frame parçası için de hesaplanan aritmetik ortalama yolu da tercih edilmiştir. Her bir noktadan elde edilen sönüm değerlerinin aritmetik ortalaması alınmış ve tekil değerlerin ortalamadan ne kadar saptığına bakılmıştır. Ölçüm sonuçları ve aritmetik ortalama değerleri Çizelge 4.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.2'deki tüm doğal frekans ve sönüm oranı değerleri, 40 numaralı noktadan vurulması sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonunun 1. moduna karşılık gelen doğal frekans ve sönüm oranı değerlerine göre normalize edilerek verilmiştir.



Şekil 4.34 : Yağ karteri malzeme sönümü için gerçekleştirilen modal test düzeneği.



Şekil 4.35 : Yağ karteri malzeme sönümü modal test sonucu elde edilen 9 adet frekans tepki fonksiyonu.

Çizelge 4.2 incelendiğinde, yağ karteri için elde edilen sonuçların motor bloğu ve ladder frame için elde edilenler ile benzer olduğu görülmektedir. Her bir frekans tepki fonksiyonundan hesaplanan malzeme sönümü değerlerinin, yapının genel malzeme sönümü değerlerine yakın olduğu ve yapının genel sönüm karakteristiğinin tek bir frekans tepki fonksiyonunun incelenmesi ile elde edilebileceği anlaşılmaktadır. Şekil 4.36'da yapının tahrik edildiği ölçüm noktalarından bazıları görülmektedir.

Çizelge 4.2 : Yağ karteri modal test sonucu elde edilen malzeme sönümü değerleri (Ölçüm noktası 40 ilk doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranı değerlerine göre normalize edilmiştir).

	1. Mod		2. Mod		3. Mod		4. Mod	
	Doğal Frekans (Wn) (Hz)	Sönüm Oranı (ζ) (%)	Doğal Frekans (Wn) (Hz)	Sönüm Oranı (ζ) (%)	Doğal Frekans (Wn) (Hz)	Sönüm Oranı (ζ) (%)	Doğal Frekans (Wn) (Hz)	Sönüm Oranı (ζ) (%)
Ölçüm Noktası 14	1,000	0,950	1,897	1,005	2,455	1,006	3,237	0,924
Ölçüm Noktası 40	1,000	1,000	1,898	0,974	2,456	0,736	3,237	0,887
Ölçüm Noktası 61	1,000	0,819	1,898	0,770	2,456	1,206	3,237	0,929
Ölçüm Noktası 70	1,000	1,023	1,897	0,838	2,455	0,269	3,237	0,855
Ölçüm Noktası 76	1,000	0,901	1,897	1,474	2,456	0,772	3,237	0,921
Ölçüm Noktası 106	1,000	0,896	1,898	0,703	2,456	0,741	3,237	0,933
Ölçüm Noktası 121	1,000	0,914	1,897	0,663	2,456	1,183	3,237	0,861
Ölçüm Noktası 143	1,000	0,804	1,898	0,820	2,456	0,886	3,237	0,889
Ölçüm Noktası 160	1,000	0,860	1,898	0,745	2,456	0,774	3,237	0,897
Toplam Frekans Tepki Fonksiyonu	1,000	0,981	1,897	0,946	2,456	0,654	3,237	0,987
Aritmetik Ortalama	1,000	0,907	1,897	0,888	2,456	0,842	3,237	0,899



Şekil 4.36 : Ladder frame malzeme sönümü, modal test ölçüm noktaları sırasıyla 14, 40, 61, 70, 76, 106, 121, 160.

4.3 Sayısal Çalışmalar ve Sonuçların Karşılaştırılması

Çalışmanın bu aşamasında, bölüm 4.2’de gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları kullanılarak, motor parçalarının hassas sayısal modelleri elde edilmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları kullanılarak, analizler için gerekli malzeme bilgileri güncellenmiş ve bu şekilde test sonuçlarıyla korele olmuş sayısal modeller elde edilmeye çalışılmıştır. Böylece gelecek çalışmalarda yapılması planlanan, montaj halindeki motor parçalarının temas yüzeylerini de içeren sayısal modellerinin kurulması çalışmaları için her bir parçanın hassas sayısal modelleri elde edilmiştir. Bir diğer çalışma ise yine bölüm 4.2’de elde edilen malzeme sönüm değerleri kullanılarak koşturulan analiz sonuçları ile empirik sönüm değerleri kullanılarak koşturulan analiz sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Bu sırada, deneysel çalışmalar için kullanılan ticari programın malzeme sönümü olarak verdiği değer, literatürdeki karşılığı ve sayısal çalışmalar için kullanılan ticari programa bu deneysel malzeme sönümünün nasıl girilmesi gerektiği incelenmiştir. Çalışma sırasında Hypermesh programı kullanılarak sayısal modeller oluşturulmuş ve Nastran programı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 Modal parametrelerin belirlenmesi (Doğal Frekans & Mod Şekli)

Bu bölümde, motor parçalarının sayısal modelleri kurulduktan sonra, gerçek malzeme bilgileri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sırasında deneysel ve sayısal sonuçların birbirlerine yakın çıkmasının sağlanması amacıyla, aşağıda belirtilen klasik yol takip edilmiştir;

- Parçanın sayısal modeli 2-D veya 3-D eleman kullanılarak oluşturulmuştur.
- Parçanın kütlesi tartı kullanılarak ölçülmüştür.
- Ölçüm sonucundaki kütle değerini sağlayacak yoğunluk değeri, malzeme bilgisi olarak girilmiştir. Girilen malzeme yoğunluk değerinin ilgili malzeme için kullanılan empirik yoğunluk değerinden ne kadar uzaklaştığı kontrol edilmiştir.
- Empirik elastisite modülü değeri kullanılarak modal analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu elde edilen doğal frekans değerleri ile deneysel ölçüm sonucu elde edilen doğal frekans değerleri

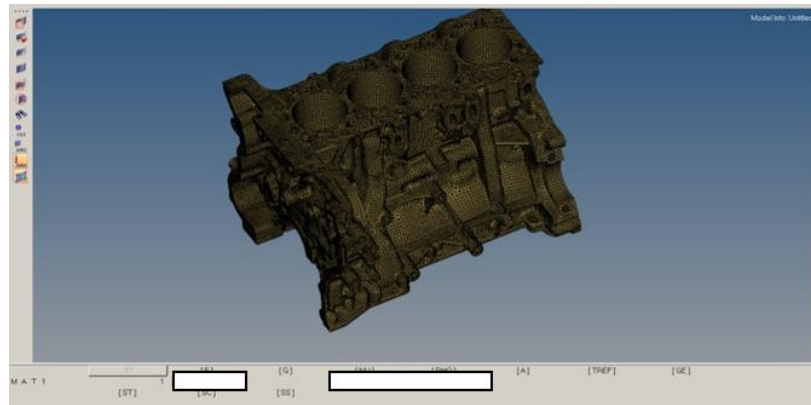
karşılaştırılarak, elastisite modülü değeri güncellenmiş ve bu şekilde devam eden iterasyon çalışması sonucunda gerçek (yani analiz sonucu, deneysel ölçüm yapılarak elde edilen doğal frekans değerlerinin elde edildiği elastisite modülü) elastisite modülü değeri hesaplanmıştır.

- Parça malzemesine ait empirik poission oranı değeri kullanılmıştır.
- Yukarıdaki maddelerde anlatıldığı şekilde elde edilen malzeme bilgileri kullanılarak analiz tekrar gerçekleştirilmiş ve elde edilen doğal frekans ve mod şekilleri, deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Gelecek bölümlerde motor parçalarına ait sayısal analiz sonuçları, deneysel çalışma sonuçlarıyla beraber verilerek, doğal frekans ve mod şekli açısından karşılaştırma yapılmıştır. Doğal frekans sonuçları, deneysel çalışma sonucu elde edilen 1. moda ait doğal frekans değerine göre normalize edilmiştir. Ayrıca deneysel ve sayısal çalışmalar arasındaki fark, deneysel çalışma sonuçlarına göre yüzde olarak verilmiştir.

4.3.1.1 Motor bloğu

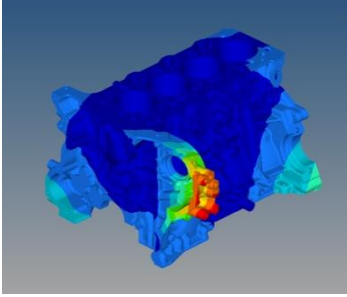
Motor bloğuna ait malzeme bilgilerinin girildiği ekran Şekil 4.37’de görülmektedir. Şekil 4.38’de ise, deneysel ve sayısal olarak elde edilen doğal frekans ve mod şekli karşılaştırmaları görülmektedir. Doğal frekans sonuçları, deneysel olarak elde edilen 1. mod’a karşılık gelen doğal frekans değerine göre normalize edilmiştir.



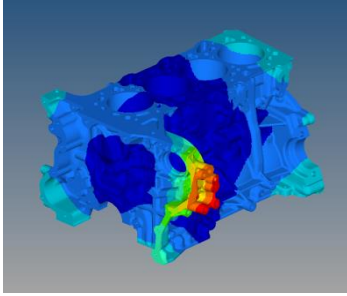
Şekil 4.37 : Malzeme bilgilerinin girildiği ekran (sırasıyla, elastisite modülü – yoğunluk – poission oranı).

Modal Analiz

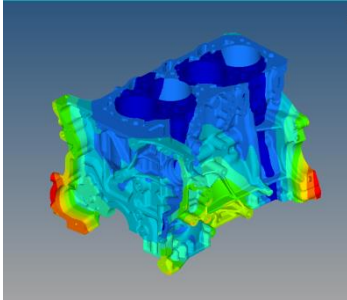
1. Mod: 1.018 (%1.8)



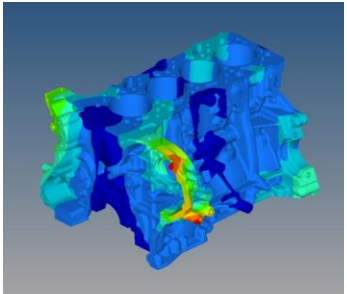
2. Mod: 1.040 (%0.0)



3. Mod: 1.916 (%-3.7)

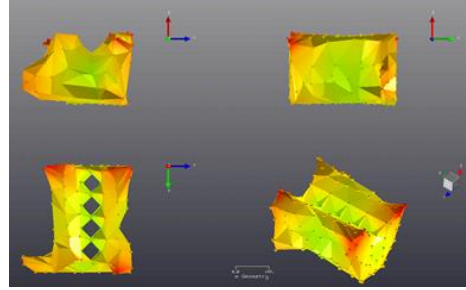


4. Mod: 2.554 (%1.4)

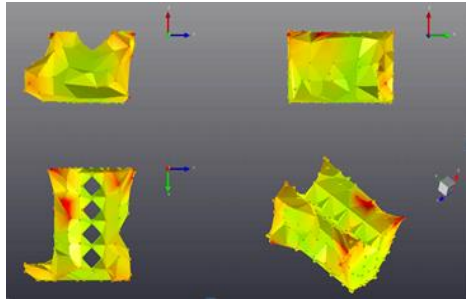


Modal Test

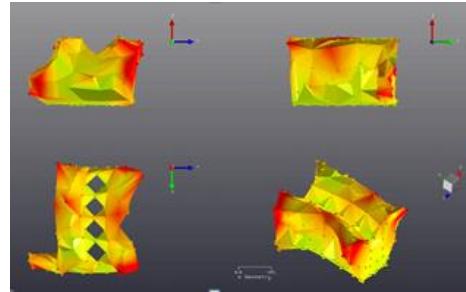
1.Mod: 1.000



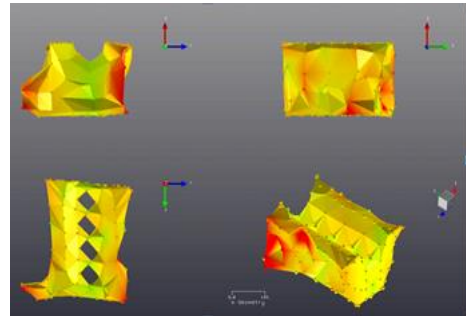
2. Mod: 1.040



3. Mod: 1.990



4. Mod: 2.518

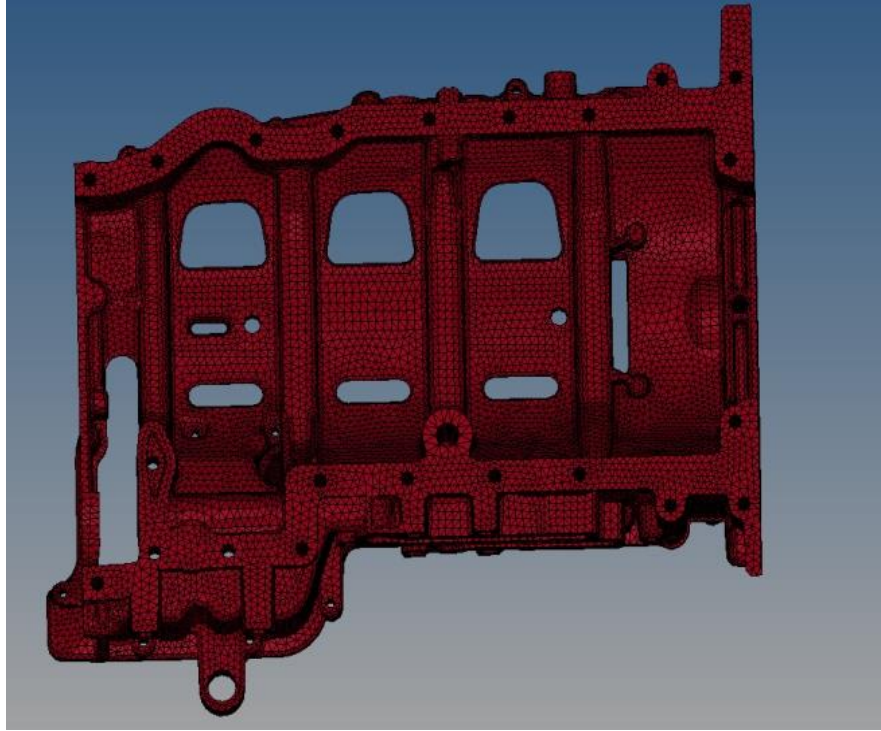


Şekil 4.38 : Sayısal analiz ve deneysel olarak elde edilen doğal frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılması (Normalize edilmiş doğal frekanslar).

İlk 4 moda ait sonuçlar incelendiğinde, analiz sonucu bulunan doğal frekansların, test sonuçlarına göre en fazla %3.75 farklılık gösterdiği görülmektedir ki bu değer kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmaktadır. Mod şekilleri dikkatlice incelendiğinde ise, her bir doğal frekansa karşılık gelen mod şeklinin birbirinin aynısı olduğu görülmektedir.

4.3.1.2 Ladder frame

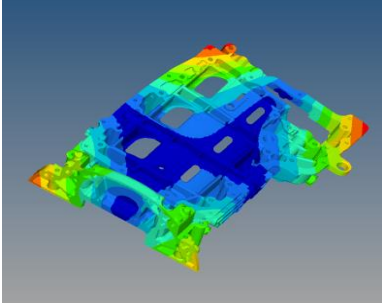
Şekil 4.39’da ladder frame parçasına ait sayısal model verilmiştir. Şekil 4.40’da ise doğal frekans ve mod şekli karşılaştırmaları bulunmaktadır. Doğal frekans sonuçları, deneysel olarak elde edilen 1. moda karşılık gelen doğal frekans değerine göre normalize edilmiştir.



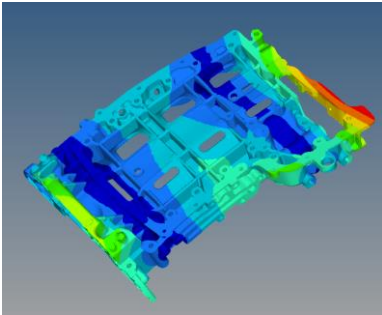
Şekil 4.39 : Malzeme bilgilerinin girildiği ekran (sırasıyla, elastisite modülü – poisson oranı – yoğunluk).

Modal Analiz

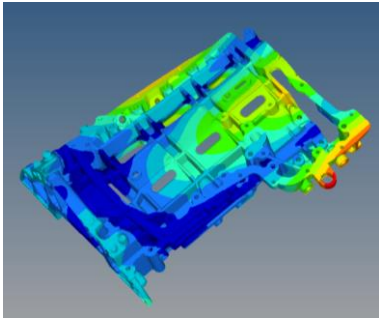
1. Mod: 0.991 (%-0.9)



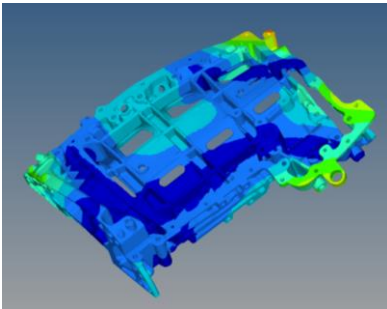
2. Mod: 2.614 (%0.8)



3. Mod: 2.912 (%-2.0)

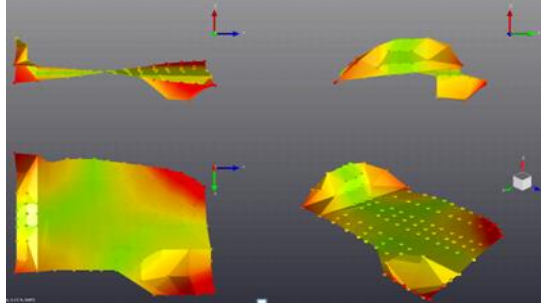


4. Mod: 3.338 (%0.1)

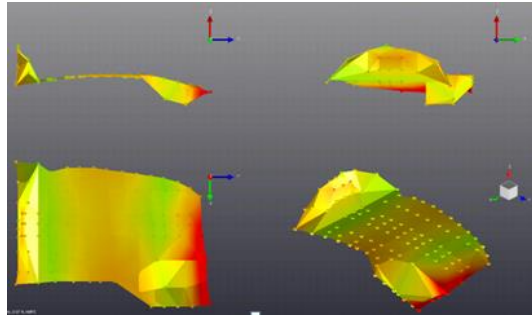


Modal Test

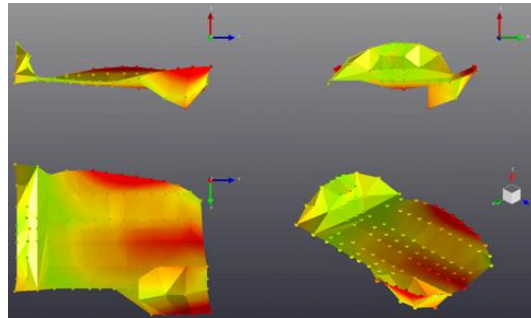
1. Mod: 1.000



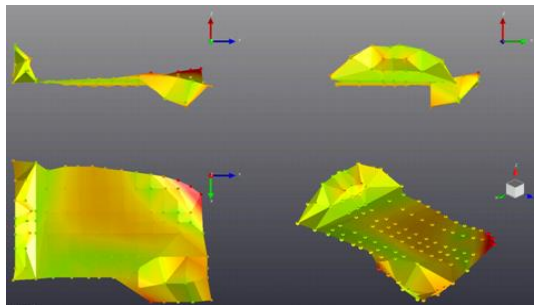
2. Mod: 2.592



3. Mod: 2.972



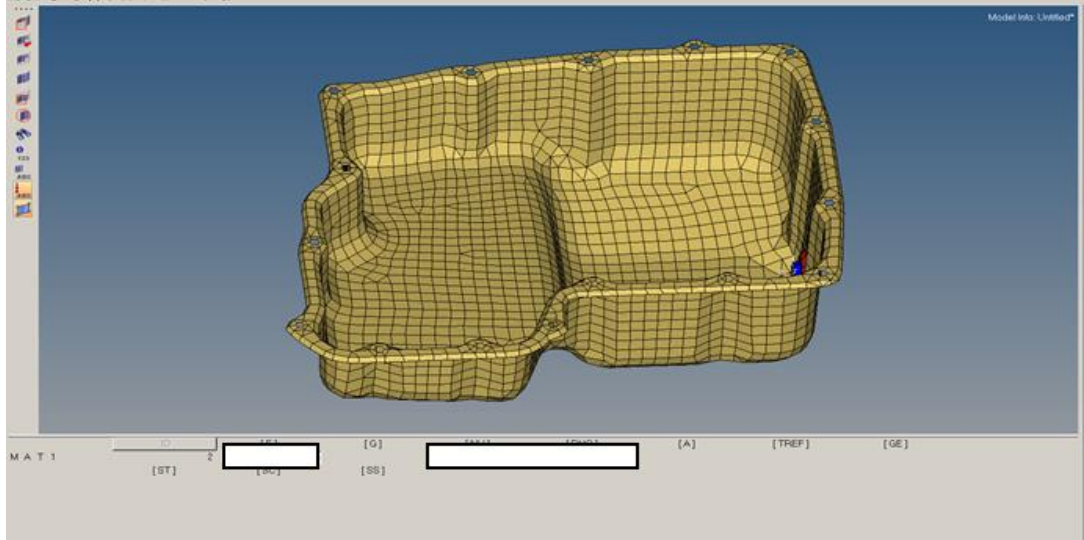
4. Mod: 3.332



Şekil 4.40 : Sayısal analiz ve deneysel olarak elde edilen doğal frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılması (Normalize edilmiş doğal frekanslar).

4.3.1.3 Yağ karteri

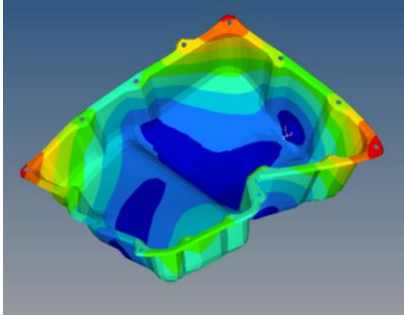
Yağ karterine ait malzeme bilgilerinin girildiği ekran Şekil 4.41’de görülmektedir. Şekil 4.42’de ise doğal frekans ve mod şekli karşılaştırmaları bulunmaktadır. Doğal frekans sonuçları, deneysel olarak elde edilen 1. moda karşılık gelen doğal frekans değerine göre normalize edilmiştir.



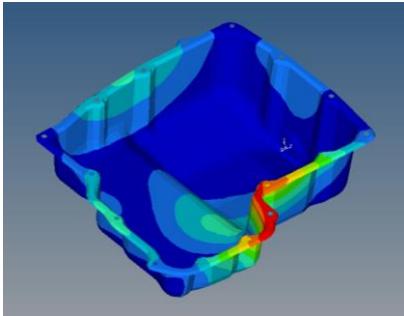
Şekil 4.41 : Malzeme bilgilerinin girildiği ekran (sırasıyla, elastiside modülü – poisson oranı – yoğunluk).

Modal Analiz

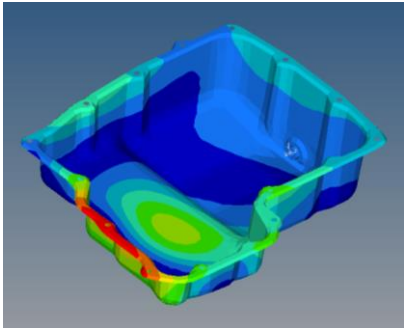
1. Mod: 1.000 (%0.0)



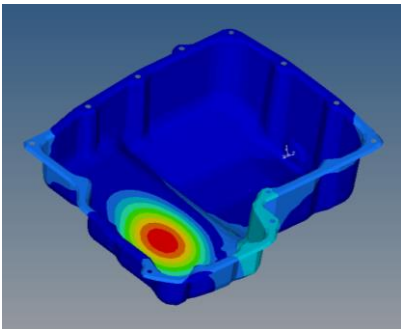
2. Mod: 1.889 (%0.9)



3. Mod: 2.415 (%-0.3)

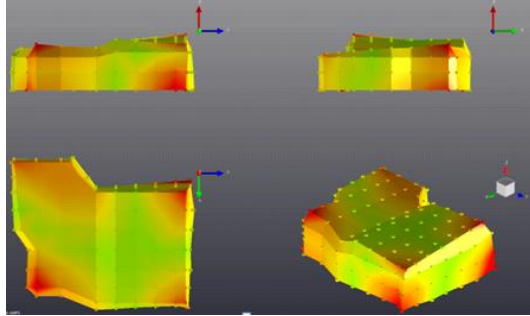


4. Mod: 3.288 (%2.9)

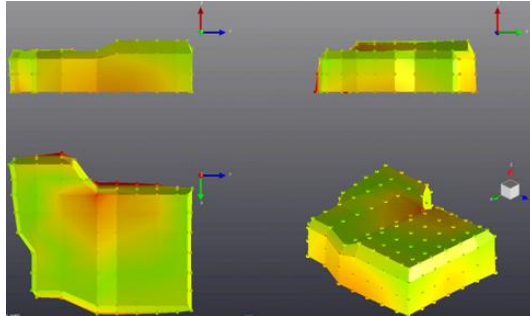


Modal Test

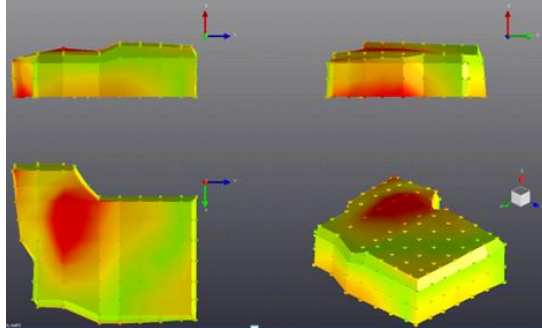
1. Mod: 1.000



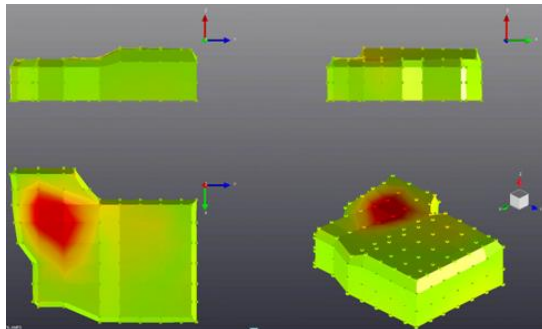
2. Mod: 1.872



3. Mod: 2.423



4. Mod: 3.194



Şekil 4.42 : Sayısal analiz ve deneysel olarak elde edilen doğal frekans ve mod şekillerinin karşılaştırılması (Normalize edilmiş doğal frekanslar).

4.3.2 Deneysel olarak elde edilen malzeme sönümünün analizlerde kullanılması

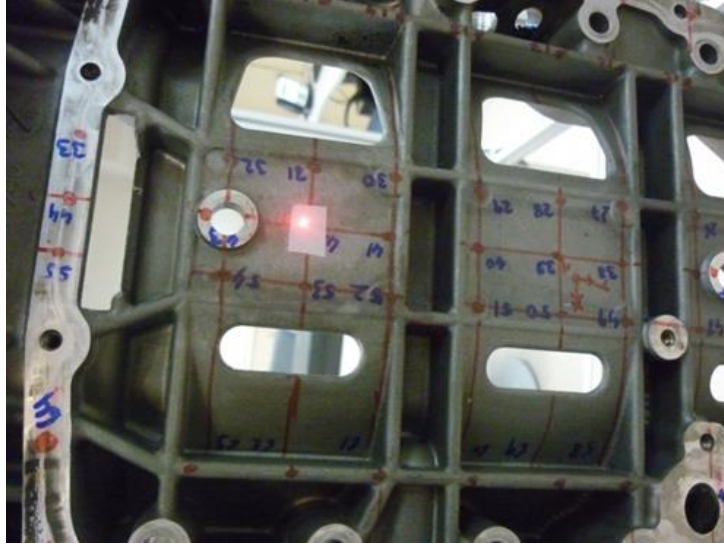
Çalışmanın bu bölümünde, bölüm 4.2.2’de deneysel olarak elde edilen malzeme sönümü değerleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde yapılması planlanan çalışmalar aşağıda verilmiştir;

- ✓ Malzeme sönümünün deneysel olarak elde edilmesi için kullanılan ticari programdan elde edilen sönüm değerlerinin literatürdeki karşılığının anlaşılması,
- ✓ Sayısal analiz için kullanılan ticari programda malzeme sönümünün girilmesi için mevcut olan pencereler ve bunların literatürdeki karşılığının anlaşılması,
- ✓ Deneysel olarak elde edilen malzeme sönümü kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları ile empirik malzeme sönümü kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçlarının karşılaştırılması,
- ✓ Tüm bu çalışmalar neticesinde, ilgilenilen motor parçalarının sayısal modellerinin titreşim genliği açısından da doğru sonuçlar verdiğinin deneysel sonuçlar yardımıyla anlaşılması.

Çalışmanın bu bölümünde, ladder frame parçası ve yağ karteri üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde verilen titreşim genliği ve doğal frekans değerleri deneysel çalışma sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonunda 1. moda karşılık gelen titreşim genliği ve doğal frekans değerlerine göre normalize edilmiştir.

4.3.2.1 Ladder frame

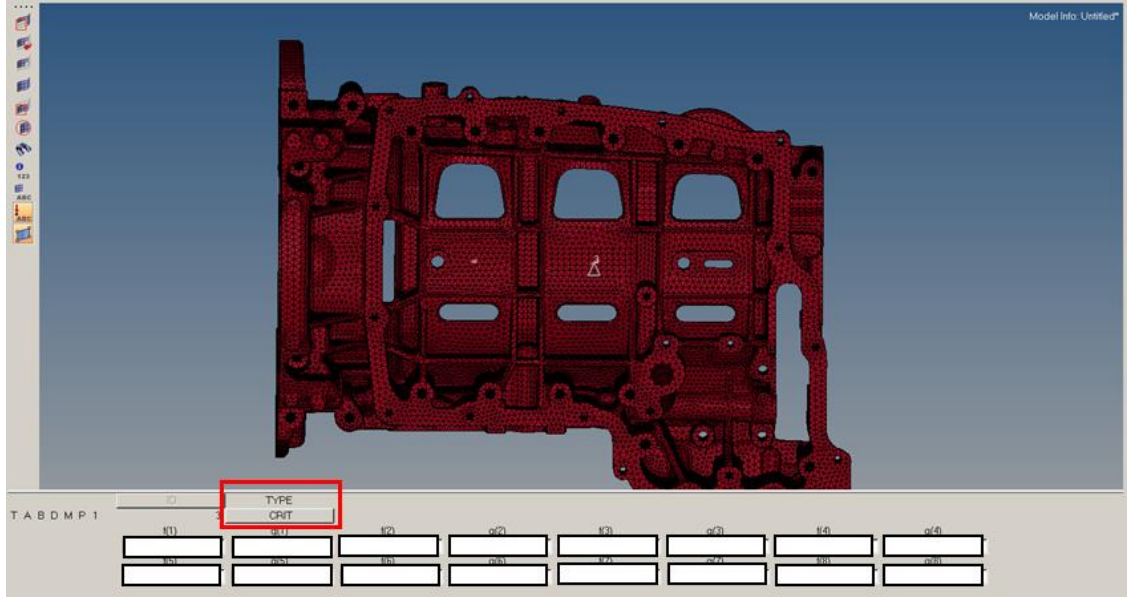
Bölüm 4.2.2.1’de belirtildiği üzere, 42 numaralı ölçüm noktasından lazer titreşimölçer kullanılarak yapının cevabı alınırken, yapı pek çok noktasından tahrik edilmiştir ve 15 adet frekans tepki fonksiyonu elde edilmiştir. Bu frekans tepki fonksiyonları kullanılarak Çizelge 4.1’deki malzeme sönümü değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde yapılacak analizler için ise Şekil 4.43’de görüldüğü üzere yapının 39 numaralı noktasından tahrik edilmesi ve 42 numaralı noktasından cevabının elde edilmesi yoluyla elde edilen FTF’den hesaplanan sönüm değerleri kullanılacaktır.



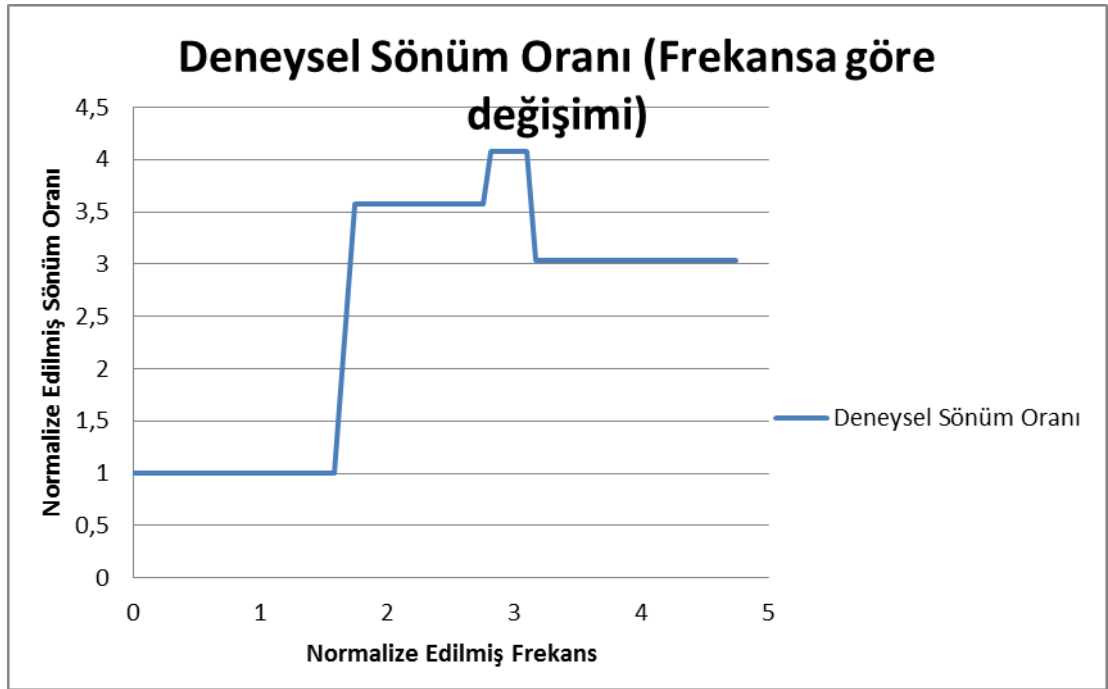
Şekil 4.43 : Sayısal analiz çalışmalarında kullanılacak malzeme sönümü değerlerinin hesaplandığı FTF noktaları.

Yapılan araştırma sonucunda, malzeme sönümlerinin elde edildiği ve hesaplandığı LMS Test Lab programı Polymax modülünün malzeme sönümü olarak verdiği değer, literatürdeki karşılığının sönüm oranı olduğu anlaşılmıştır. Çalışmanın bundan sonraki aşamalarında, deneysel olarak elde edilen sönüm değerlerinin “ % olarak sönüm oranı “ olduğu kabul edilecektir. Programın bize verdiği sönüm değerininin 100’e bölünmesi ile birlikte Nastran analiz programına girilebilecek durumda “sönüm oranı” değeri elde edilmiş olunacaktır.

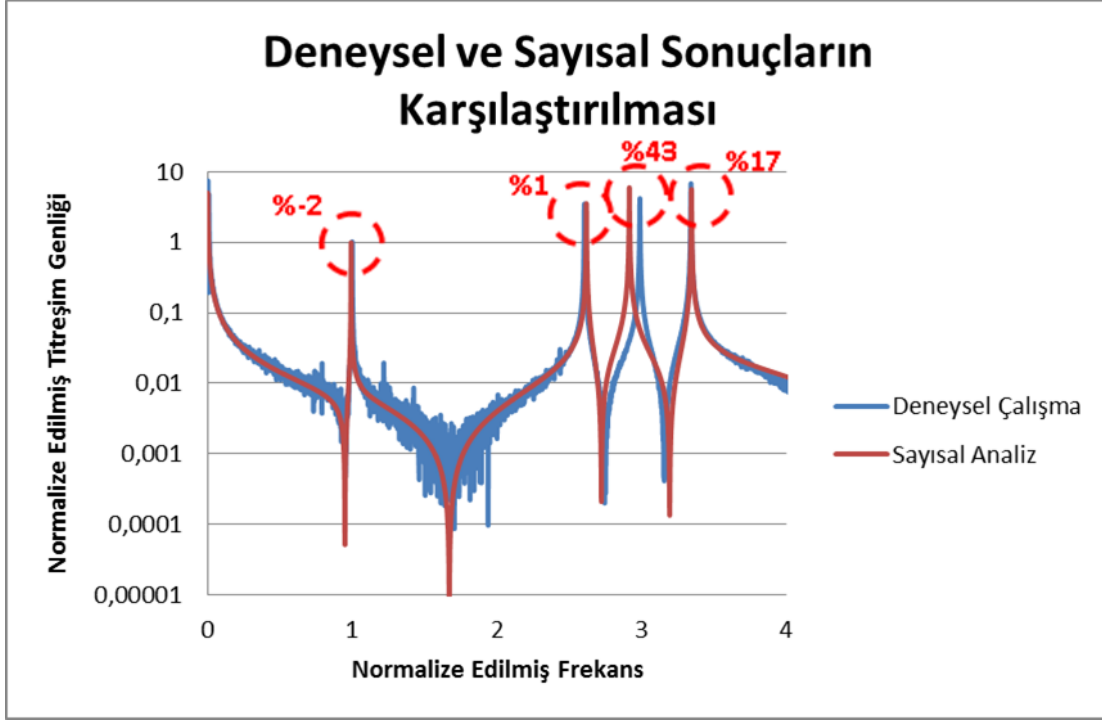
Nastran programının incelenmesi sonucu, Şekil 4.44’de görüldüğü gibi TABDMP 1 kartı kullanılarak frekansa bağlı olarak sönüm girilebildiği anlaşılmıştır. Deneysel çalışma sonucu frekansa bağlı olarak elde edilen sönüm oranı değerleri bu şekilde analizlere girilebilmiştir. Eğer TYPE sekmesi altında “CRIT” yerine “G” seçildiği takdirde deneysel sönüm değerlerinin, sönüm oranının iki katı olan kayıp faktörü şeklinde girilmesi gerekmektedir. Şekil 4.45’de analize girilen sönüm oranı değerlerinin frekansa bağlı değişimi görülmektedir. TABDMP 1 kartı kullanılarak frekansa bağlı sönüm oranlarının girilmesi sonucunda elde edilen analiz sonucu ise Şekil 4.46’da deneysel olarak aynı noktalardan elde edilen FTF ile beraber verilmiştir. Şekil 4.46’daki grafikte frekans değerleri, deneysel olarak elde edilen FTF’deki 1. doğal frekansa göre ve titreşim genliği değerleri (mm/s), deneysel olarak elde edilen FTF’deki 1. doğal frekansına karşılık gelen titreşim genliği değerine göre normalize edilmişlerdir.



Şekil 4.44 : Nasrtan programında TABDMP 1 ile frekansa bağlı olarak sönüm girilebilmesi.



Şekil 4.45 : TABDMP 1 kartı kullanılarak analize girilen sönüm oranı değerlerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF'na ait ilk doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranına göre normalize edilmiştir.).



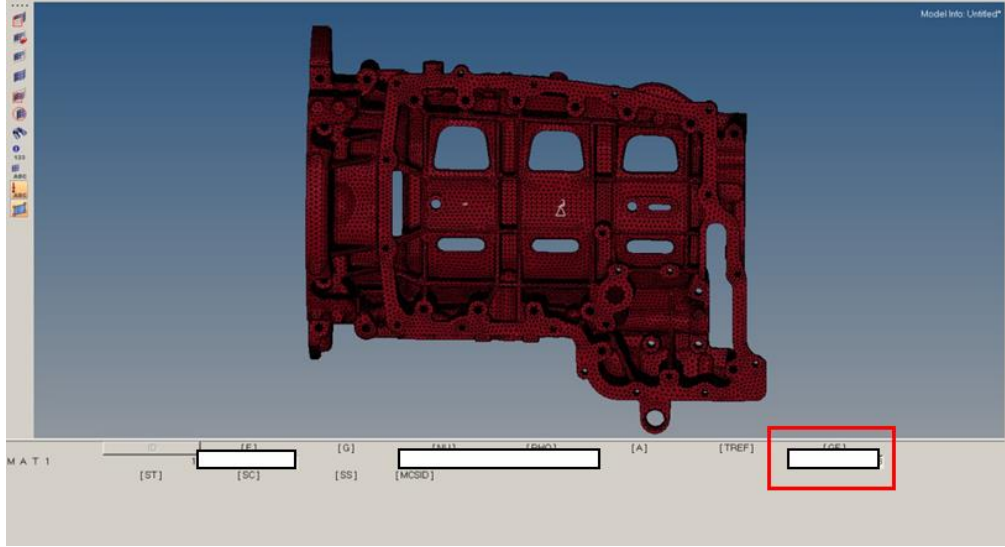
Şekil 4.46 : Ladder frame parçası için deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF'ye ait ilk doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).

Analiz sonucu hesaplanan titreşim genliklerinin, deneysel olarak elde edilen titreşim genliklerine göre farkı Şekil 4.46'da yüzde olarak verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, titreşim genliği bakımından analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile oldukça iyi korele olduğu söylenebilir.

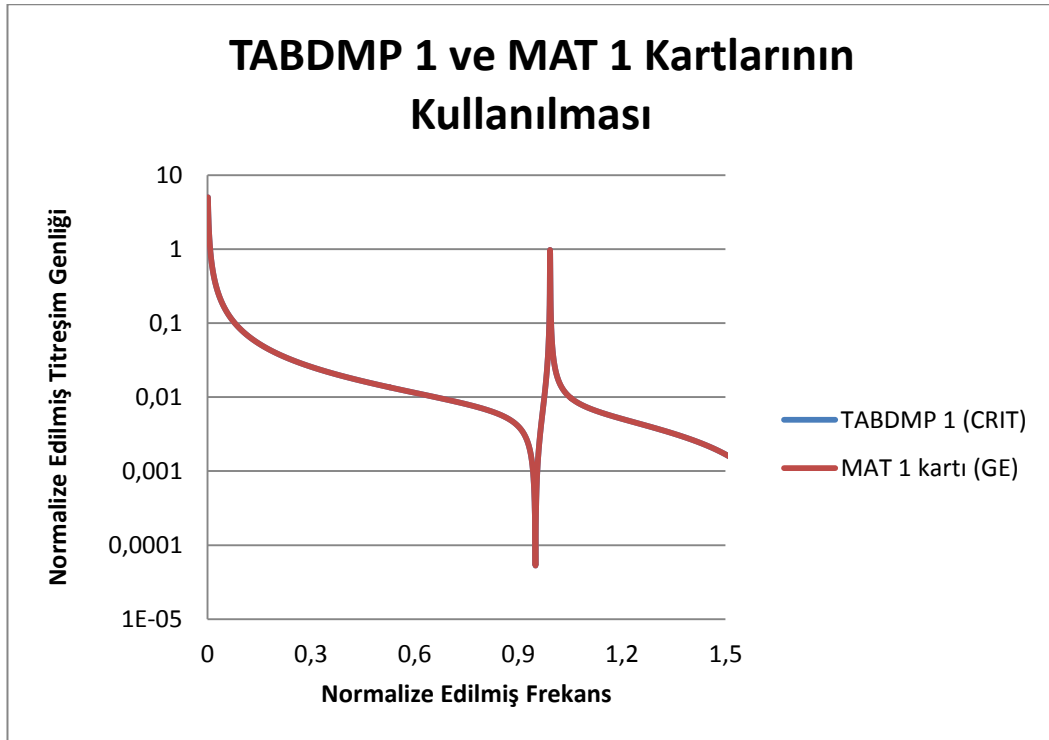
Malzeme sönümünün deneysel bir şekilde elde edilmediği durumlarda, empirik malzeme sönümü değerleri kullanılmaktadır. Nastran programının incelenmesi sonucu, bu değerler literatürde kayıp faktörü olarak adlandırılan malzeme sönümü olduğu ve Nastran programına Şekil 4.47'deki gibi MAT 1 kartı kullanılarak GE sekmesine girildiği görülmüştür.

TABDMP 1 kartındaki CRIT alanına girilen sönüm değerinin "sönüm oranı" ve MAT 1 kartındaki GE alanına girilen sönüm değerinin "kayıp faktörü" olduğunun kontrol edilmesi için, deneysel olarak elde edilen 1. doğal frekansa karşılık gelen sönüm oranı değeri, MAT 1 kartındaki GE alanına kayıp faktörü şeklinde girilmiş (deneysel olarak elde edilen sönüm oranı değeri, 2 ile çarpılarak kayıp faktörü elde edildikten sonra) ve analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.48'de TABDMP 1 - CRIT alanı ve MAT 1 - GE alanına deneysel olarak elde edilen 1. doğal frekansa ait sönüm oranı, sırasıyla sönüm oranı ve kayıp faktörü cinsinden girildikten sonra

gerçekleştirilmiş analiz sonuçları görülmektedir. Beklenildiği üzere, her iki analiz sonucu elde edilen frekans tepki fonksiyonları üst üste gelmiş ve genlik değerleri birbirisinin aynısı çıkmıştır. Böylece TABDMP 1 ve MAT 1 kartlarına girilen sönüm değerlerinin ne anlama geldiği doğrulanmıştır.

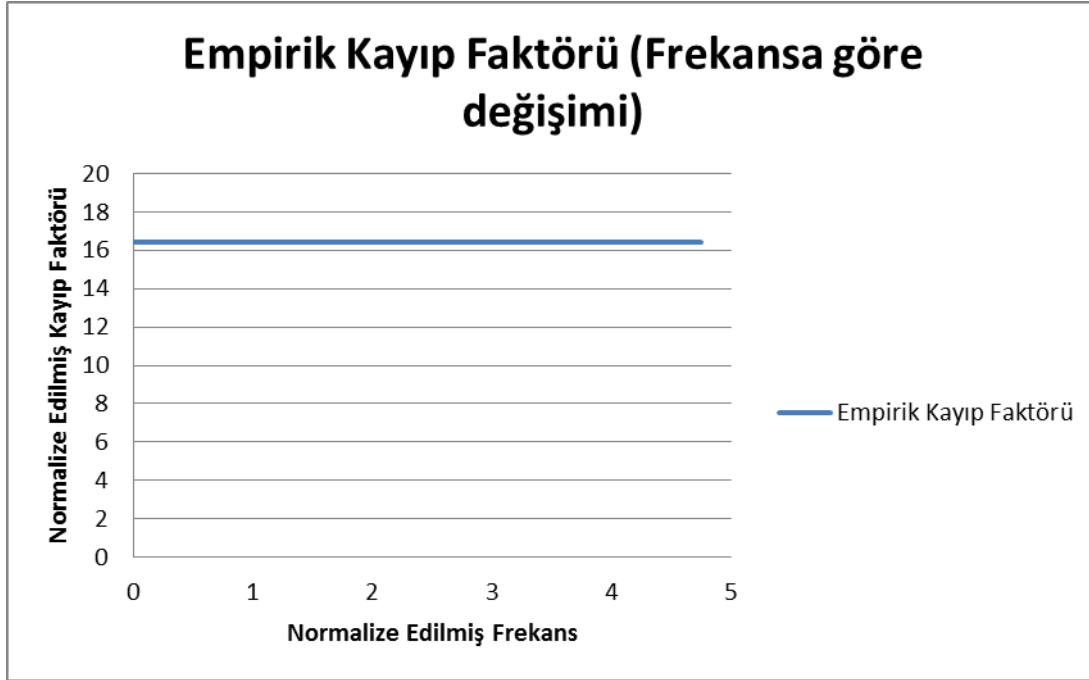


Şekil 4.47 : Nasrtan programında MAT 1 ile sönüm girilebilmesi.

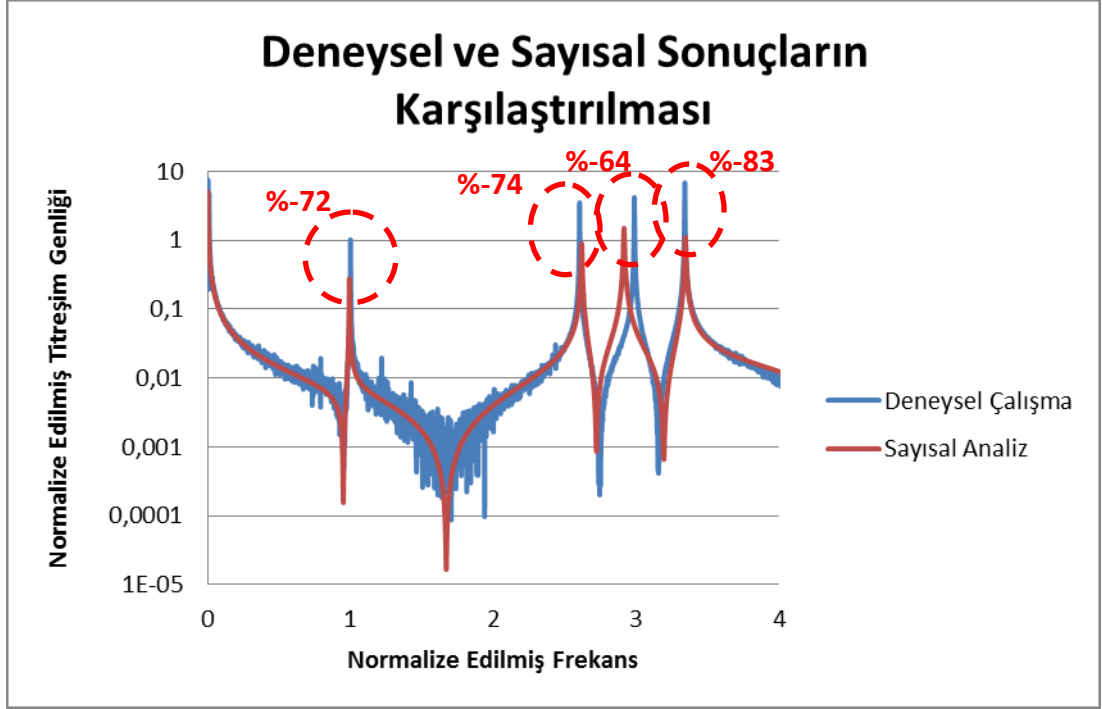


Şekil 4.48 : Deneysel olarak elde edilen 1. doğal frekansa karşılık gelen sönüm değerinin, TABDMP 1 ve MAT 1 kartlarına girilmesi sonucu gerçekleştirilen analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).

Şekil 4.49'dan görüldüğü üzere empirik malzeme sönümünün kullanılması sırasında, sönüm değeri deneysel olarak elde edilen sönümün aksine frekansdan bağımsız, sabit bir değerdir. Şekil 4.49'da kayıp faktörü olarak verilen malzeme sönümü, deneysel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranına göre normalize edilmiştir. MAT 1 kartı kullanılarak frekansdan bağımsız kayıp faktörü değerinin kullanılması sonucunda elde edilen analiz sonucu ise Şekil 4.50'de deneysel olarak aynı noktalardan elde edilen FTF ile beraber görülmektedir. Analiz sonucu hesaplanan titreşim genliklerinin, deneysel olarak elde edilen titreşim genliklerine göre farkı Şekil 4.50'de yüzde olarak verilmiştir. Şekil 4.50 incelendiğinde, analizlerde frekansdan bağımsız ve sabit empirik sönüm değerlerinin kullanılmasının, deneysel olarak elde edilen frekansa bağlı sönüm değerlerinin kullanılması kadar başarılı olmadığı görülmektedir.



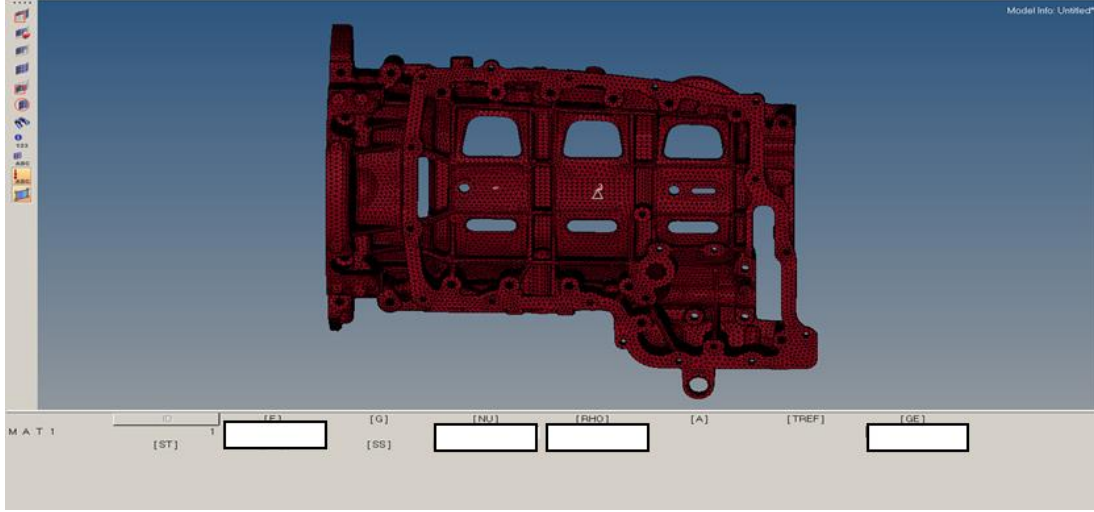
Şekil 4.49 : MAT 1 kartı kullanılarak analize girilen empirik kayıp faktörü değerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen kayıp faktörüne göre normalize edilmiştir.).



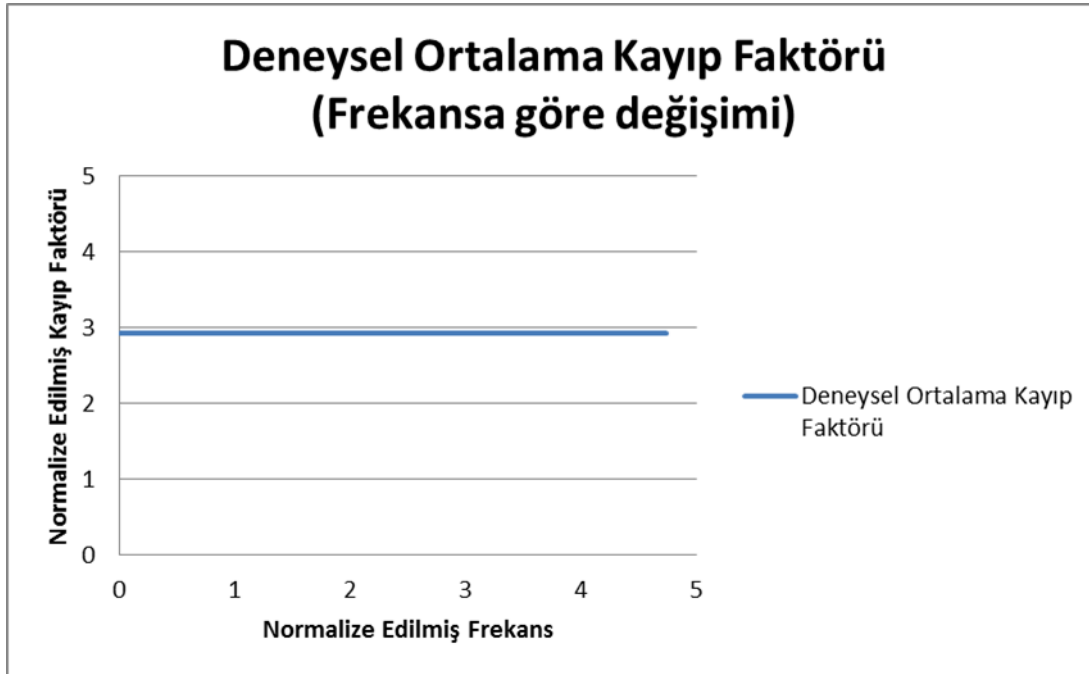
Şekil 4.50 : Frekansdan bağımsız empirik kayıp faktörü değerinin MAT 1 kartı ile girildiği analiz sonucunun deneyisel çalışma ile karşılaştırılması (Deneyisel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).

Otomotiv ve benzer alanlarda yapılan sayısal analiz çalışmaları, genellikle birden fazla parçayı içerir. Nastran programında TABDMP 1 kartı sadece tek bir parçanın analizi sırasında frekansa bağlı sönüm girilmesine izin verir. Birden çok fazla parçanın analizi sırasında frekansa bağlı sönüm girmenin mümkün olduğu bilinmesine rağmen, oldukça zahmetli ve piyasada pratik olarak uygulanabilir değildir. Bu sebeple bu çalışmada, deneyisel çalışma ile frekansa bağlı olarak elde edilen sönüm değerlerinin Şekil 4.51'de gösterildiği gibi MAT 1 kartı aracılığıyla analizlerde en uygun nasıl kullanılacağı incelenmiştir. Bunun için öncelikle deneyisel olarak frekansa bağlı şekilde elde edilen sönüm oranı değerlerinin aritmetik ortalaması hesaplanmıştır. Ardından bu değer iki ile çarpılarak ortalama kayıp faktörü elde edilmiş ve Şekil 4.51'de gösterilen MAT 1 kartındaki GE alanına kayıp faktörü olarak girilmiştir. Analize girilen kayıp faktörü cinsinden sönüm değeri Şekil 4.52'de görüldüğü gibi frekansdan bağımsızdır. Şekil 4.52'de kayıp faktörü olarak verilen malzeme sönümü, deneyisel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen kayıp faktörüne göre normalize edilmiştir. Analiz sonucu hesaplanan titreşim genliklerinin, deneyisel olarak elde edilen titreşim genliklerine göre farkı Şekil 4.53'de yüzde olarak verilmiştir. Şekil 4.53 incelendiğinde, analizde deneyisel

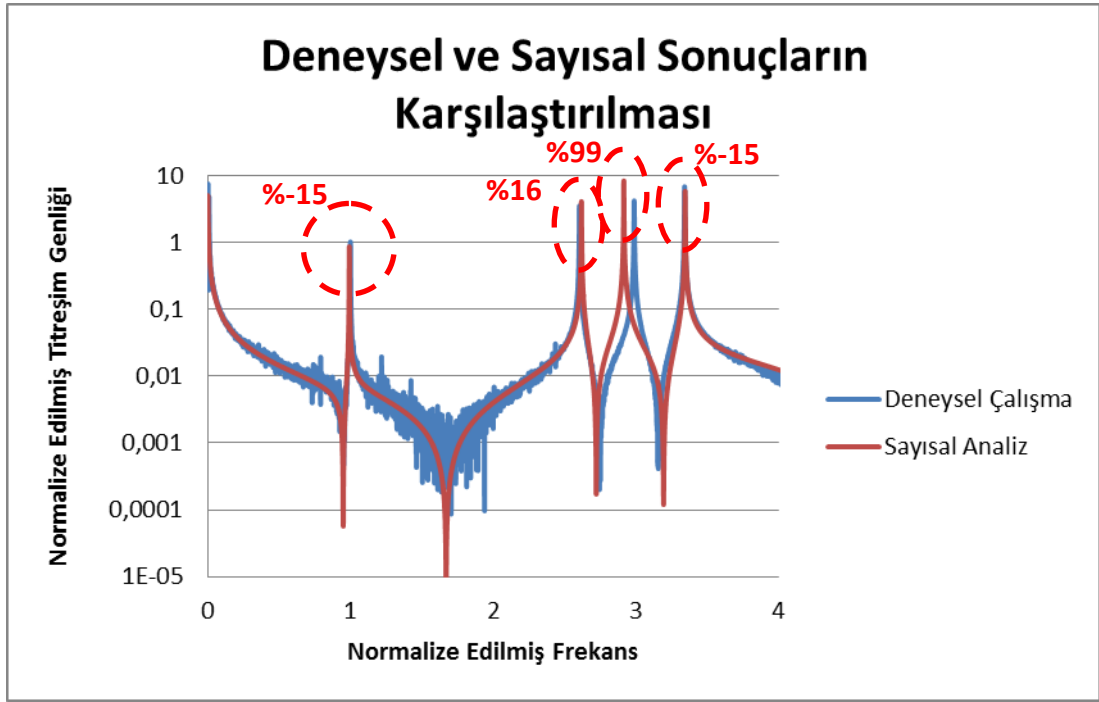
ölçüm sonucu frekansa bağlı olarak elde edilen sönüm değerlerinin aritmetik ortalaması kullanılmasına rağmen yine de empirik sönüm değerinin kullanıldığı analize kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 4.51 : Deneysel çalışma sonucu frekansa bağlı olarak elde edilen sönüm oranı değerlerinin aritmetik ortalamasının kayıp faktörü şeklinde Nastran programına MAT 1 kartı ile girilmesi.



Şekil 4.52 : MAT 1 kartı kullanılarak analize girilen deneysel ortalama malzeme sönümü değerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen kayıp faktörüne göre normalize edilmiştir.).



Şekil 4.53 : Frekansdan bağımsız deneysel ortalama kayıp faktörü değerinin MAT 1 kartı ile girildiği analiz sonucunun deneysel çalışma ile karşılaştırılması (Deneyisel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).

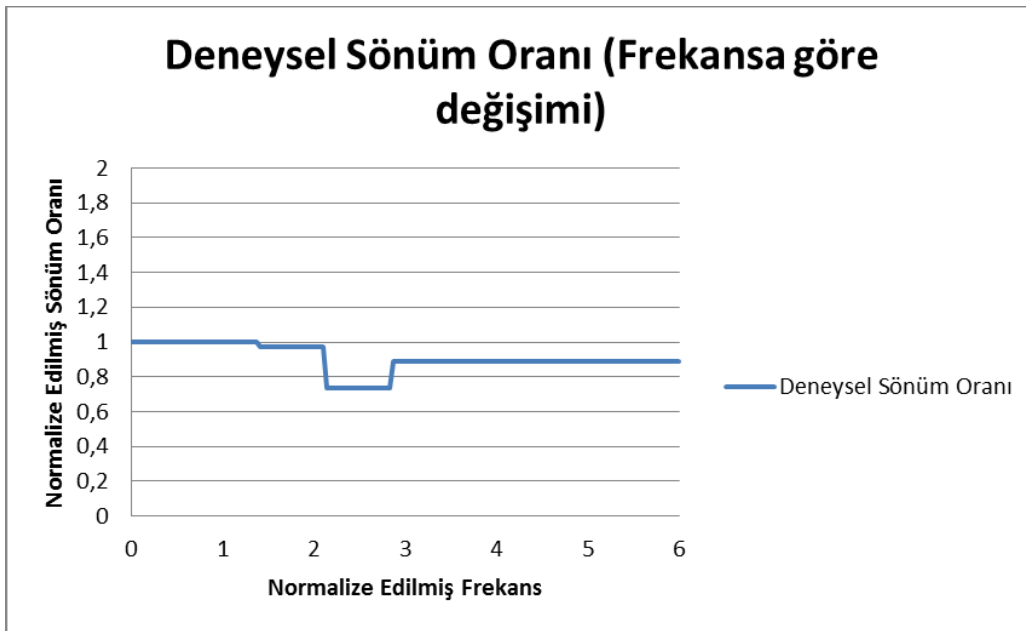
4.3.2.2 Yağ karteri

Bölüm 4.2.2.2'de belirtildiği üzere, 48 numaralı ölçüm noktasından lazer titreşimölçer kullanılarak yapının cevabı alınırken yapı pek çok noktasından tahrik edilerek 9 adet frekans tepki fonksiyonu elde edilmiştir. Bu frekans tepki fonksiyonları kullanılarak Çizelge 4.2'deki malzeme sönümü değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde yapılacak analizler için ise Şekil 4.54'de gösterildiği üzere yapının 40 numaralı noktasından tahrik edilmesi ve 48 numaralı noktasından cevabının elde edilmesi yoluyla elde edilen FTF'den hesaplanan sönüm değerleri kullanılacaktır.

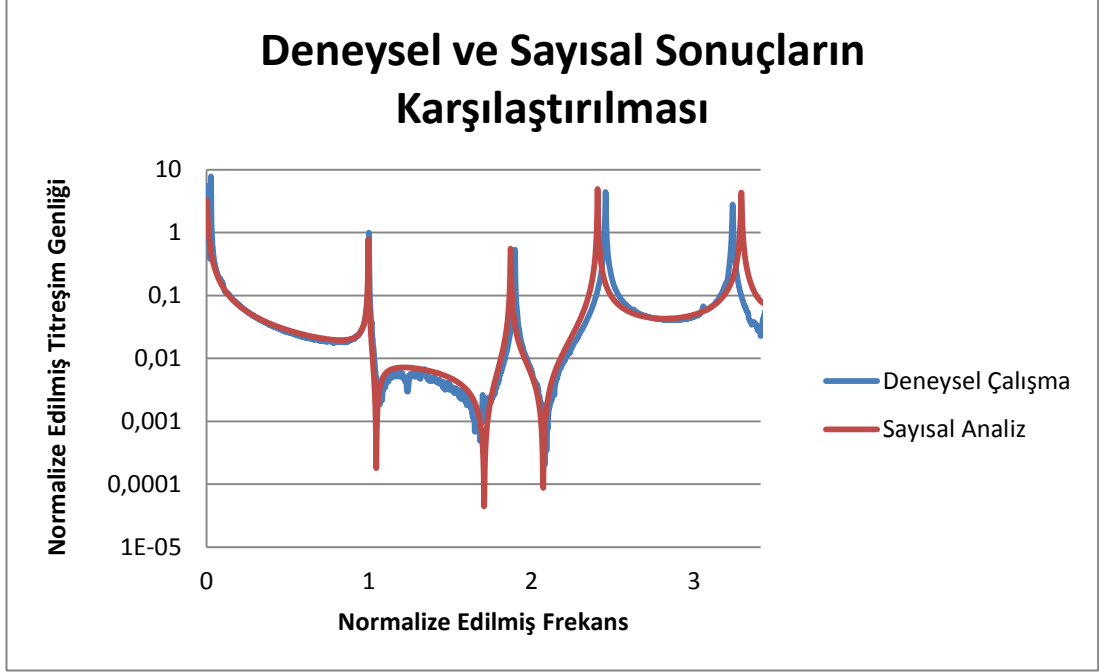


Şekil 4.54 : Sayısal analiz çalışmalarında kullanılacak malzeme sönümü değerlerinin hesaplandığı FTF'nin elde edildiği ölçüm noktaları.

Şekil 4.55'de analize girilen sönüm oranı değerlerinin frekansa bağlı değişimi görülmektedir. TABDMP 1 kartı kullanılarak frekansa bağlı sönüm oranlarının girilmesi sonucunda elde edilen analiz sonucu ise Şekil 4.56'da deneysel olarak aynı noktalardan elde edilen FTF ile beraber görülmektedir. Şekil 4.56'daki grafikte frekans değerleri deneysel olarak elde edilen FTF'daki 1. doğal frekans'a göre ve titreşim genliği değerleri (mm/s) deneysel olarak elde edilen FTF'daki 1. doğal frekansına karşılık gelen titreşim genliği değerine göre normalize edilmişlerdir.

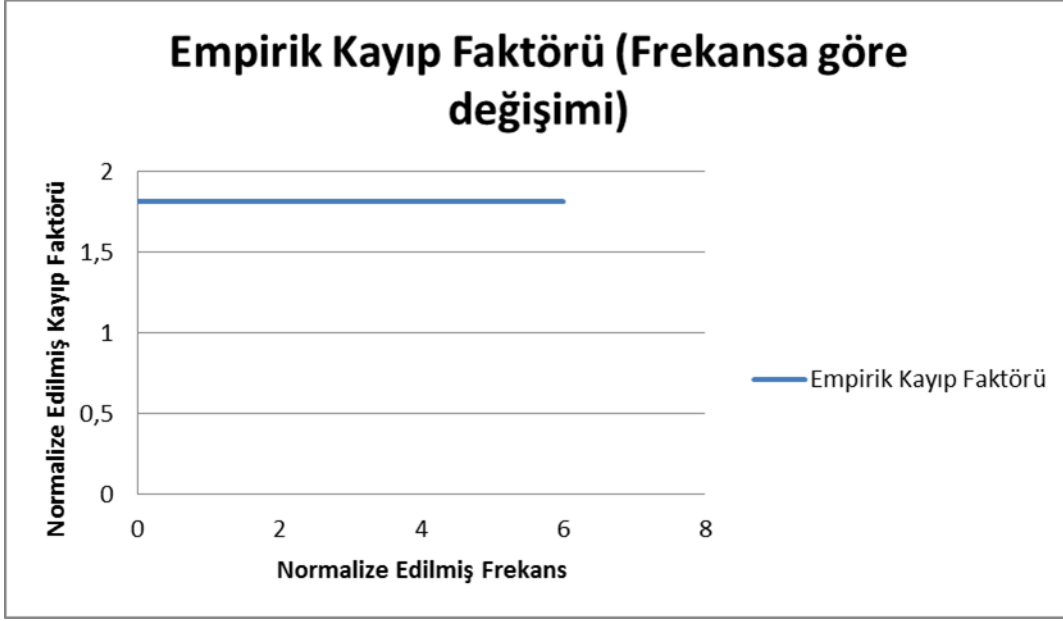


Şekil 4.55 : TABDMP 1 kartı kullanılarak analize girilen sönüm oranı değerlerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranına göre normalize edilmiştir.).



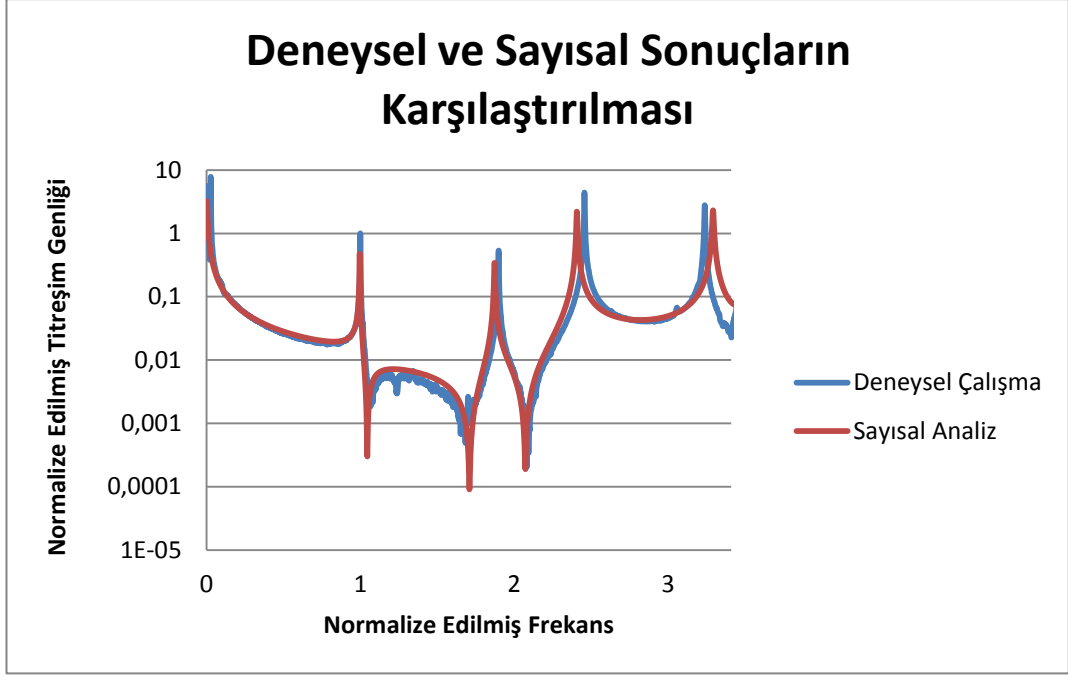
Şekil 4.56 : Deneysel olarak elde edilen frekansa bağlı sönüm değerlerinin kullanıldığı analiz sonucunun deneysel çalışma ile karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).

Deneysel sönüm değerinin elde edilememesi durumunda kullanılacak olan empirik kayıp faktörünün analize girilmesi halinde elde edilen titreşim genlikleri, deneysel olarak aynı noktalardan elde edilen FTF ile beraber Şekil 4.58'de görülmektedir. Şekil 4.57'den görüldüğü ve daha önce belirtildiği üzere empirik malzeme sönümü, deneysel olarak elde edilen sönümün aksine frekansdan bağımsız, sabit bir değerdir. Şekil 4.57'de kayıp faktörü olarak verilen malzeme sönümü, deneysel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen kayıp faktörüne göre normalize edilmiştir.

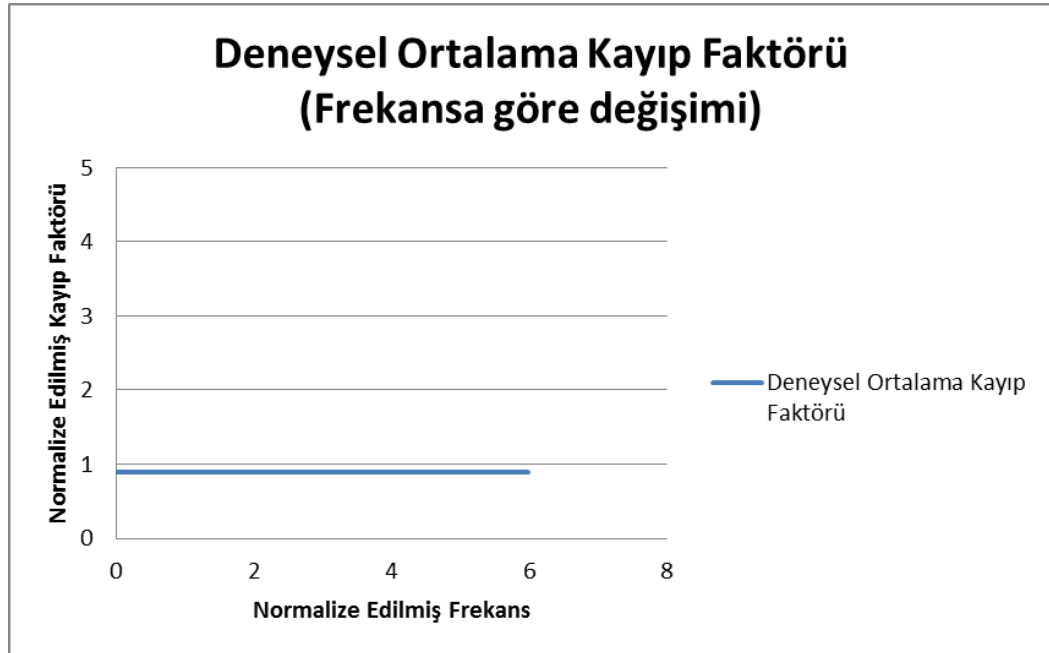


Şekil 4.57 : MAT 1 kartı kullanılarak analize girilen empirik kayıp faktörü değerinin frekansa göre değişimi (Deneyssel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen sönüm oranına göre normalize edilmiştir.).

Şekil 4.56 ve 4.58 incelendiğinde, ladder frame parçasında olduğu gibi yağ karterinde de, deneyssel olarak elde edilen frekansa bağlı malzeme sönümünün kullanıldığı analiz sonuçlarının, deneyssel sonuçlar ile daha iyi korele olduğu görülmektedir. Ancak bölüm 4.3.2.1'de de belirtildiği üzere, birden fazla parça içeren yapıların analizlerinde, TABDMP 1 kartı kullanarak frekansa bağlı sönüm değeri girilmesi zahmetlidir. Bu sebeple, deneyssel olarak frekansa bağlı olarak elde edilen sönüm değerlerinin aritmetik ortalamasının analizlerde kullanılması yöntemi denenmiş ve empirik sönüm değeri kullanılmasına göre daha başarılı sonuçlar verdiği bölüm 4.3.2.1'de görülmüştür. Şekil 4.59'da deneyssel olarak elde edilen sönüm değerlerinin aritmetik ortalaması, deneyssel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen kayıp faktörüne göre normalize edilmiş şekilde verilmiştir.



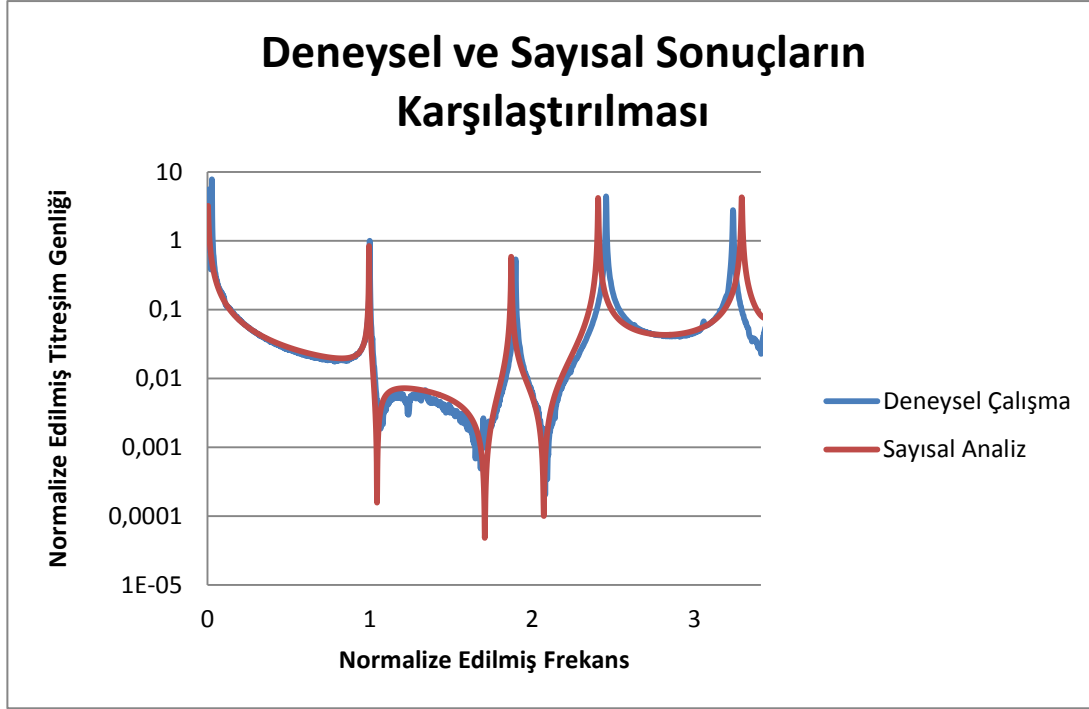
Şekil 4.58 : Frekansdan bağımsız empirik kayıp faktörü değerinin MAT 1 kartı ile girildiği analiz sonucunun deneysel çalışma ile karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).



Şekil 4.59 : MAT 1 kartı kullanılarak analize girilen deneysel ortalama malzeme sönümü değerinin frekansa göre değişimi (Deneysel olarak elde edilen FTF'ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen kayıp faktörüne göre normalize edilmiştir.).

MAT 1 kartı kullanılarak deneysel ortalama sönüm değerlerinin kullanılması sonucunda elde edilen analiz sonucu ise Şekil 4.60'da deneysel olarak aynı

noktalardan elde edilen FTF ile beraber görülmektedir. Şekil 4.60’da verilen grafikte, frekans değerleri deneysel olarak elde edilen FTF’deki 1. doğal frekansa göre ve titreşim genliği değerleri (mm/s) deneysel olarak elde edilen FTF’deki 1. doğal frekansa karşılık gelen titreşim genliği değerine göre normalize edilmişlerdir.



Şekil 4.60 : Frekansdan bağımsız deneysel ortalama kayıp faktörü değerinin MAT 1 kartı ile girildiği analiz sonucunun deneysel çalışma ile karşılaştırılması (Deneysel olarak elde edilen FTF’ye ait 1. doğal frekans ve karşılık gelen titreşim genliğine göre normalize edilmiştir.).

Şekil 4.60 incelendiğinde, ladder frame parçasında olduğu gibi yağ karteri içinde, analizlerde empirik sönüm değeri kullanılması yerine deneysel ölçüm sonucu frekansa bağlı olarak elde edilen malzeme sönümü değerlerinin aritmetik ortalamasının kullanılmasının, deneysel sonuçlar ile daha iyi korele olan sonuçlar verdiği görülmüştür.

5. KURU SÜRTÜNMELİ TEMAS PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

5.1 Giriş

Çalışmanın bu bölümünde, otomotiv alanında çoğunlukla karşılaşılan cıvatalı bağlantılarda meydana gelen temas yüzeylerindeki temas parametrelerinin yani temas direngenliği ve temas yüzeyindeki sürtünme sönümünün deneysel olarak elde edilmesi için çalışılmıştır. Bölüm 2’de bahsedildiği üzere, literatürde temas parametreleri ile ilgili yapılan deneysel çalışmaların birçoğu cıvatalı bağlantılı temas durumları için değildir. Otomotiv alanında karşılaşılan cıvatalı bağlantılarda meydana gelen temas yüzeylerini gerçekçi olarak temsil eden ve literatürde bulunan diğer test düzeneklerine göre daha pratik bir şekilde uygulanabilir olan bir deneysel ölçüm düzeneğinin tasarlanması hedeflenmiştir. Böylece bu düzenek ile pratik olarak elde edilebilecek temas parametreleri, gelecek çalışmalarda yapılması planlanan kuru sürtünme yüzeylerinin sayısal modellenmesi çalışmalarında analizlere girdi olarak sağlanabilecek ve oluşturulan sayısal modelin geliştirilmesi ve doğrulanması için kullanılabilecektir. Ayrıca deneysel olarak elde edilen temas direngenliği ve kuru sürtünme sönümünün, temas halindeki iki yüzey arasında meydana gelen bağıl deplasmana göre değişimi incelenmiştir. Böylece temas parametrelerinin karakterinin bağıl deplasmana göre nasıl değiştiği elde edilmeye çalışılmıştır.

Otomotiv sektöründe karşılaşılan cıvatalı bağlantılardaki temas yüzeylerini gerçekçi olarak temsil edebilecek ve temas parametrelerinin pratik olarak ölçülmesine olanak sağlayacak bir test düzeneğinin geliştirilebilmesi, ölçümlerde kullanılacak cihazların belirlenebilmesi, testler sırasında ölçüm sonuçlarına etki edebilecek parametrelerin tespit edilebilmesi ve temas parametrelerinin hesaplanması için izlenecek yola karar verilebilmesi amacıyla konu hakkında şimdiye kadar yapılan birçok çalışma bölüm 2’de kapsamlı olarak incelenmiştir. Yapılan araştırma sonucu, deneysel ölçüm sırasında dikkat edilmesi gereken ana noktalar belirlenmiş ve bölüm 5.2.1’de maddeler halinde verilmiştir. Bölüm 5.2.2’de ise, bu çalışmada kullanılacak test

düzenegi hakkında ayrıntılı olarak bilgi verilmiştir ve bu sırada yapılan bazı kabuller belirtilmiştir. Temas parametrelerinin hesaplanması amacıyla test düzeneğinde kullanılan sensörler ve bu sensörlerden elde edilen ham veriler bölüm 5.2.3’de verilmiştir. Bölüm 5.3’de ise temas parametrelerinin elde edilmesi için ölçümler sırasında etkili olan parametreler açıklanmış ve yapılan ölçümler ait sonuçlar sunulmuştur.

5.2 Kuru Sürtünme Test Düzeneği ve Ölçüm Zinciri

5.2.1 Giriş

Temas yüzeylerini karakterize eden temas parametrelerinin deneysel olarak belirlenebilmesi için, literatürde kullanılan test düzenekleri kapsamlı olarak araştırılmıştır. Bu araştırma sonucu, kuru sürtünme test düzeneği geliştirilmesi sırasında dikkat edilmesi gereken ana noktalar belirlenmiş ve aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- ✓ Temas yüzeylerinde meydana gelen bağıl hareketin sağlanması için gerekli olan periyodik sarsıcı kuvvet, temas yüzeyi ile aynı düzlemde ve kütle merkezi ekseninde uygulanmaktadır. Uygulanan kuvvet genellikle piezoelektrik kuvvet sensörü kullanılarak ölçülmektedir.
- ✓ Temas yüzeyinde üniform bir basınç dağılımı oluşturmak için gerekli normal kuvvet genellikle iki şekilde elde edilmektedir;
 - Kütle merkezi ile aynı eksenden uygulanan ölü ağırlıklar kullanılarak elde edilir. Böylece istenilen küçük kuvvetler bile hassas olarak sağlanabilmektedir.
 - Cıvatalı bağlantıları daha gerçekçi temsil edebilen test düzeneklerinde ise cıvata kullanılarak elde edilir. Bu durumda da cıvata, kütle merkezi ile aynı ekseninde olmalıdır.
- ✓ Temas yüzeyinde meydana gelen bağıl deplasman, genel olarak aşağıda açıklandığı gibi iki şekilde elde edilmektedir. Ancak her iki durumda da bağıl deplasmanın hesaplanabilmesi için yapılması gereken ölçümler, mümkün olduğu kadar temas yüzeyine yakın bir noktadan yapılmaktadır;

- Her iki temas yüzeyinin hareket ettiği durumlarda, her iki tarafa yerleştirilen ivmeölçerler kullanılarak elde edilen ivme verisinin entegre edilmesiyle hesaplanan deplasman değerlerinin birbirlerinden çıkarılması sonucu bağıl deplasman elde edilir.
- Temas yüzeylerinden sadece birinin hareketli olduğu durumlarda, hareketli yüzeye doğrultulan lazer titreşimölçerden gelen hız verisinin entegre edilmesiyle veya hareket eden parçaya rijit bağlanmış bir kapasitans sensör kullanılarak bağıl deplasman elde edilir.
- ✓ Temas yüzeyinden iletilen sürtünme kuvveti genel olarak iki şekilde elde edilmektedir;
 - İletilen tarafa yerleştirilen kuvvet sensörü yardımıyla iletilen kuvvet doğrudan ölçülür.
 - İletilen tarafa yerleştirilen ivmeölçerden gelen ivme değeri ile iletilen tarafın kütlelerinin çarpımı sonucu iletilen kuvvet hesaplanır.
- ✓ Kütle merkezi aşağıdaki her iki durumda da sürtünme yüzeyi ile aynı düzlemde olmalıdır;
 - Her iki parçanın da hareketli olduğu düzeneklerde tüm test düzeneğinin kütle merkezi sürtünme yüzeyi ile aynı düzlemde olmalıdır.
 - Tek tarafın hareket ettiği test düzeneklerinde ise hareketli taraf ve varsa ona bağlı diğer parçaların toplamının kütle merkezi sürtünme yüzeyi ile aynı düzlemde olmalıdır.
- ✓ Temas parametrelerinin elde edilebileceği ve kuru sürtünme yüzeyinin karakterinin görülebileceği iletilen kuvvet – bağıl deplasman histeresis grafikleri elde edilmektedir.
- ✓ Testler sırasında farklı normal kuvvetler kullanılması durumunda, önce bağlantı çözülmekte ve daha sonra tekrar bir araya getirilerek yeni normal kuvvet uygulanmaktadır. Normal kuvvet uygulandıktan sonra yatay sarsıcı ile kuvvet uygulanmadan önce normal yönde durağan koşulların oluşması için bir süre beklenmektedir.
- ✓ Temas yüzeyinin stabil hale gelebilmesi için, veriler temas yüzeyinde periyodik hareket sağlandıktan bir süre sonra alınmaya başlanmaktadır.

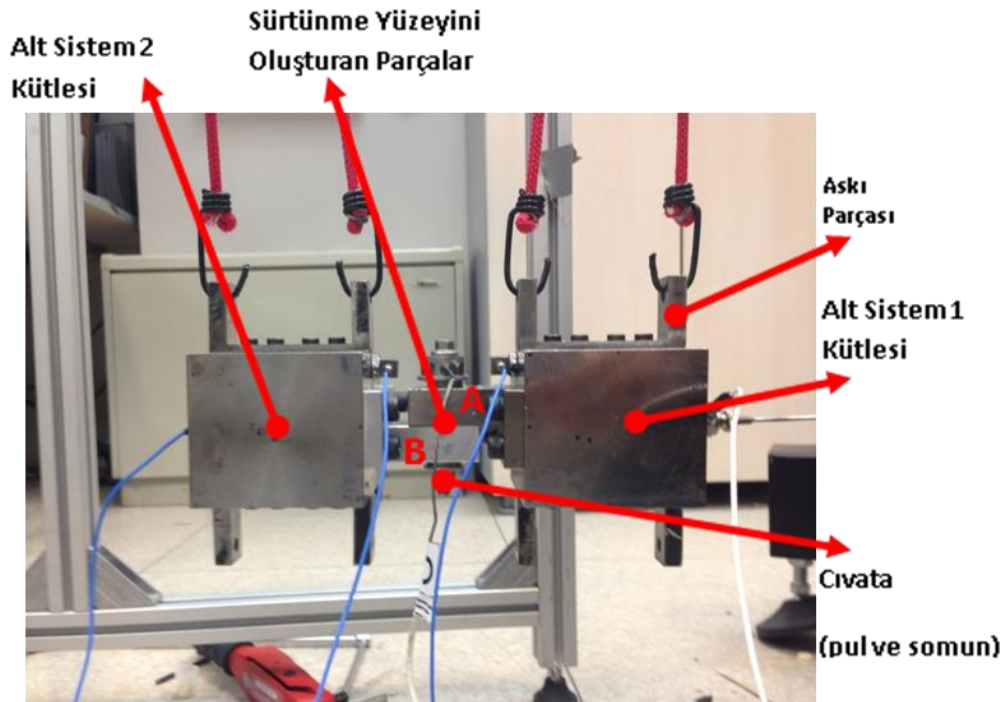
- ✓ Sarsıcı kuvvet genliği, normal kuvvet genliği, temas yüzeylerinin kalitesi ve temas yüzeyini oluşturan yüzeylerin malzemesi, elde edilen kuru sürtünme sönümü ve temas direngenliği üzerinde etkili olmaktadır.

5.2.2 Kuru sürtünme test düzeneği

Yapılan literatür araştırması sonucu elde edilen ve bölüm 5.2.1’de paylaşılan ana noktalar dikkate alınarak geliştirilen test düzeneği Şekil 5.1’de görülmektedir. Daha önce bahsedildiği üzere, test düzeneğinin otomotiv sektöründe karşılaşılan cıvatalı bağlantılarda meydana gelen kuru sürtünme hareketlerini mümkün olduğu kadar temsil edebilmesi ve pratik bir şekilde temas parametrelerinin elde edilebilmesine olanak sağlaması başlıca amaç olmuştur. Bu bağlamda [30]’da sunulan çalışma, burada sunulan test düzeneğinin geliştirilmesinde en önemli referans olmuştur.

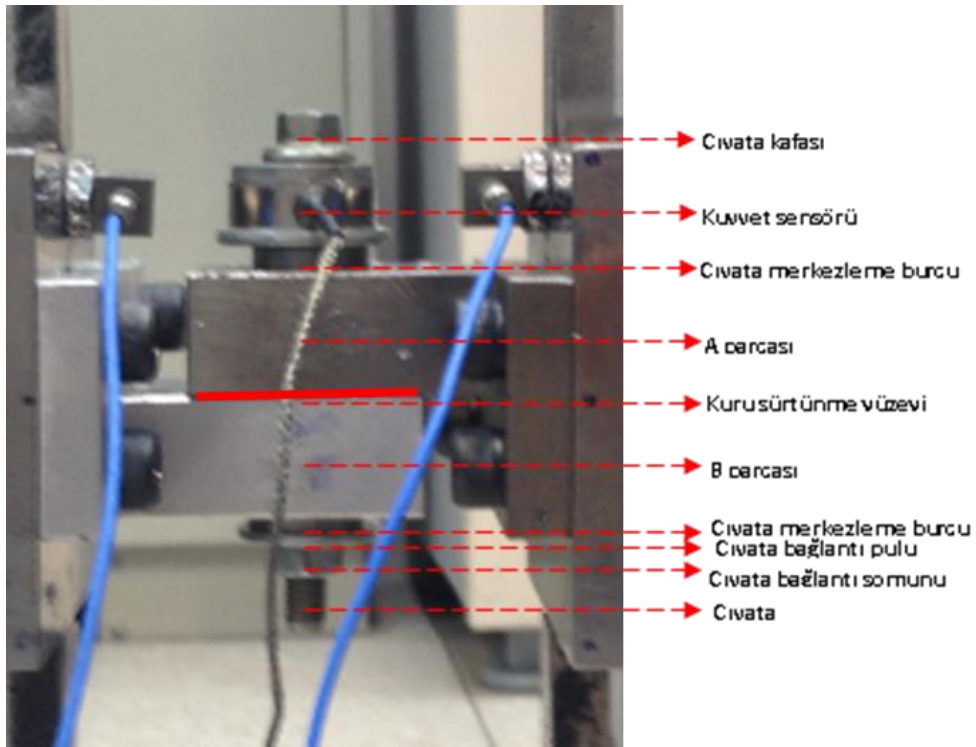
Şekil 5.1’de görülen test düzeneği aşağıda belirtilen parçalardan meydana gelmiştir;

1. Alt sistem 1 ve 2 kütleleri
2. Askı parçaları
3. Sürtünme yüzeyini oluşturan parçalar
4. Merkezleme burcu
5. Cıvata (Pul ve somun ile beraber)



Şekil 5.1 : Bu çalışmada kullanılan kuru sürtünme test düzeneği.

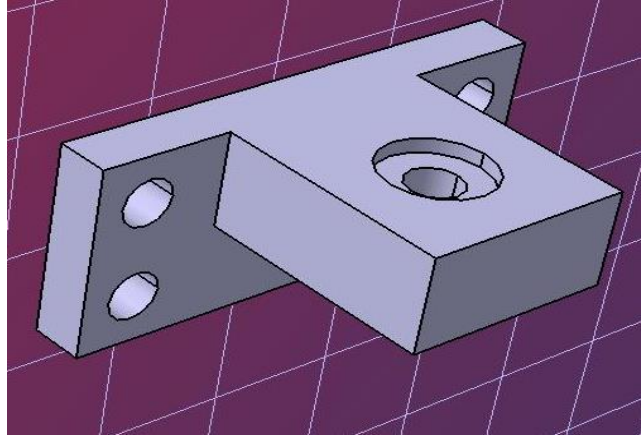
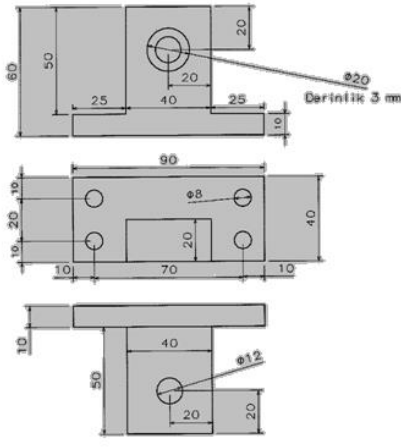
Şekil 5.1’den görülebildiği üzere test düzeneği esas olarak; alt sistem 1 kütlesi, askı parçaları ve sürtünme yüzeyini oluşturan A parçası ve yine alt sistem 2 kütlesi, askı parçaları ve sürtünme yüzeyini oluşturan B parçası olmak üzere kendi içinde rijit kabul edilen iki adet alt sistemden oluşmaktadır. Bunun anlamı, her bir alt sistemdeki askı parçaları ve sürtünme yüzeyini oluşturan parçalar alt sistemin ana kütlesine rijit bağlı ve aralarında hiçbir bağıl hareket olmadığı varsayılmaktadır. Bir başka deyişle; sistemdeki direngenlik ve sönümün sadece A ve B parçaları arasında meydana gelen temas nedeni ile oluştuğu kabul edilmektedir. Temas yüzeyini oluşturan bölgenin detaylı görüntüsü Şekil 5.2’de sunulmuştur



Şekil 5.2 : Temas bölgesinin detaylı görüntüsü.

İki sistemi, yani A ve B parçalarını birbirine bağlamak için A ve B parçalarındaki $\varnothing 12$ delikten M8 civata geçirilmiş ve böylece testler sırasındaki en önemli parametrelerden biri olan temas yüzeyindeki basınç, civata sıkma momenti yardımıyla ayarlanmıştır. Şekil 5.3’de verilen A ve B parçalarının her ikisine de ait teknik resimden de görülebileceği üzere, A ve B parçaları boyut olarak birbirinin aynısı olup sadece farklı malzemelerden üretilmiştir. M8 civatanın $\varnothing 12$ delikte merkezlenebilmesi için A ve B parçalarına 3mm derinliğinde yuvalar açılıp, bu yuvalara civatanın merkezlenmesi amacıyla burçlar üretilmiştir ve sıkı geçme olarak çakılmıştır. Burçların sıkı geçme çakılması sebebiyle, A ve B parçaları ile burçlar

arasında da bağıl hareket meydana gelmeyeceği kabul edilmiştir. Ayrıca merkezleme burçları, iç çapları cıvataya temas etmeyecek şekilde artı tolerans ile üretilmişlerdir. Normal kuvvet meydana getirmek için kullanılan cıvatanın A ve B parçalarına temas etmemesi sebebiyle, A ve B parçaları ile cıvata arasında da bağıl hareket meydana gelmeyeceği kabulü yapılmıştır. Yatay kuvvet çok büyük oranda A parçasından B parçasına kuru sürtünme yüzeyi üzerinden aktarılacağından, diğer temas yüzeylerinde oluşabilecek sönümün küçük olacağı kabulü de yapılmıştır.



Şekil 5.3 : Sürtünme yüzeyini oluşturan A ve B parçalarının teknik resmi ve 3-D görüntüsü.

Birbirlerine göre bağıl hareket etmesi istenilen A ve B parçalarını barındıran iki alt sistemin oluşturduğu düzeneğin ağırlık merkezlerinin, cıvata eksen ve sürtünme yüzeyi eksenlerinin kesiştiği noktada olması hedeflenmiştir. Bu sebeple, alt sistem 1 kütlesi ve alt sistem 2 kütlesi ile kullanılan askı parçaları kendi aralarında boyut ve malzeme olarak eş parçalardır. Temas yüzeyini meydana getiren bağlantı parçaları ise gerçek motor parçalarını doğru temsil edebilmek için farklı malzemelerden yapılmışlardır. Alt sistem 1 tarafındaki A parçası dökme demir, alt sistem 2 tarafındaki B parçası ise alüminyum malzemeden üretilmiştir. Bu sebeple ağırlık merkezinin bir miktar kaydığı bilinmesine rağmen, A ve B parçalarının ağırlıklarının test düzeneğinin geri kalanına göre oldukça küçük olması sebebiyle, ağırlık merkezindeki bu kayma ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Cıvata, kuvvet sensörü, merkezleyici burçlar, pul ve somun ise dikey yönde ağırlık merkezi ekseninde olduklarından, ağırlık merkezini yatay yönde değiştirmemişlerdir. Dikey yönde ise, ağırlık merkezine etkileri ihmal edilebilecek düzeydedir.

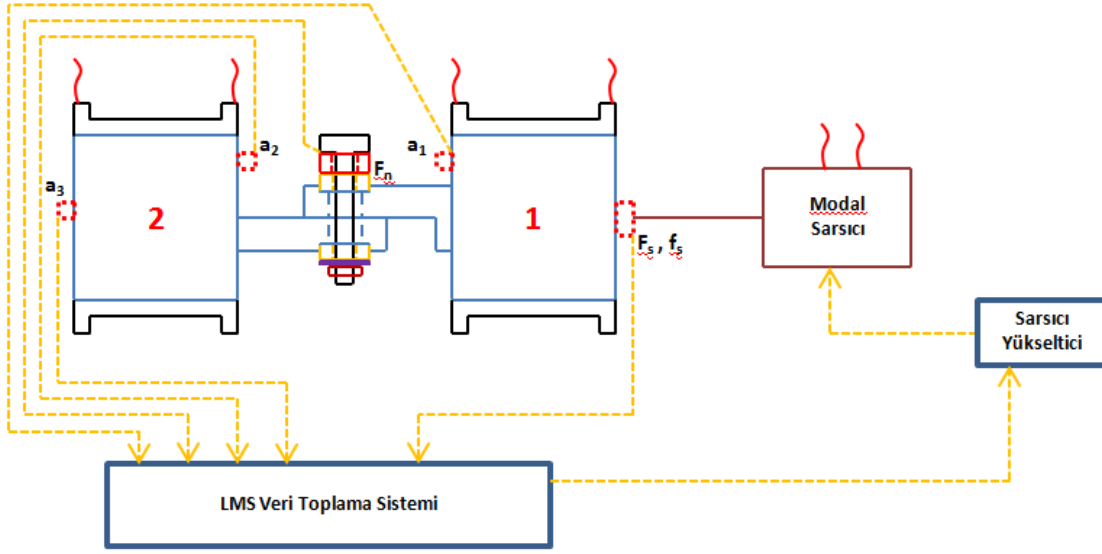
Daha önce bahsedildiği üzere bu çalışmanın başlıca amacı, basit ve pratik bir test düzeneği kullanarak otomotiv sektöründe karşılaşılan cıvatalı bağlantılardaki temas parametrelerinin deneysel olarak elde edilmesidir. Test düzeneği, elde edilecek verilerin gelecek çalışmalarda, otomotiv sektöründeki motor ve motor alt sistemlerinin bilgisayar destekli analizlerinde, temas yüzeylerinin modellenmesi çalışmalarında kullanılacağı planlanarak tasarlanmıştır. Bu sebeple farklı temas yüzeylerine ait temas parametrelerinin elde edilebilmesi amacıyla, sürtünme yüzeyi oluşturan parçaların değiştirilebilir olabilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada, A parçası yukarıda da bahsedildiği üzere motor bloğu malzemesi olan dökme demir ve B parçası da motor bloğunun hemen altında bulunan ve bloğa cıvatalı bağlantı ile bağlanan ladder frame parçası malzemesi olan alüminyum malzemeden üretilmişlerdir. Test düzeneğinin sağlıklı veriler ürettiği olması durumunda, gelecekte temas halinde bulunan diğer motor parçalarının malzemelerinden de bağlantı parçaları ürettirilerek benzer testler gerçekleştirilebilir.

Az önce bahsedildiği üzere, gerçek temas durumlarının test düzeneği üzerinde mümkün olduğu kadar gerçekçi temsil edilebilmesi amacıyla, A ve B parçalarını bağlayabilmek için kullanılan cıvata olarak da, gerçekte motor bloğu ve ladder frame parçalarını birbirlerine bağlamak için kullanılan orijinal cıvata kullanılmıştır. Böylece cıvata sıkma momenti ile cıvata normal kuvveti arasındaki ilişkinin yaklaşık olarak aynı kalması sağlanarak, test düzeneğindeki tek değişken parameter olarak cıvata sıkma moment dikkate alınmıştır. Motor bloğu ve ladder frame'in bağlanması için piyasada kullanılan cıvata sıkma momenti ile testler gerçekleştirilerek elde edilen direngenlik ve sürtünme sönümü değerleri, gelecek çalışmalarda motor bloğu & ladder frame bağlantısındaki temas yüzeylerinin modellenmesi için kullanılabilecektir.

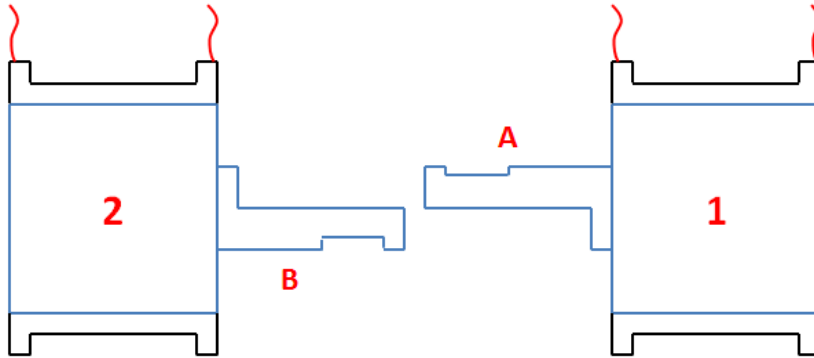
5.2.3 Ölçüm zinciri

Temas parametrelerinin elde edilmesi için kullanılan test düzeneğinin şematik görüntüsü Şekil 5.4'de sunulmuştur. Temas direngenliği ve kuru sürtünme sönümünün elde edilmesi için gerekli olan veriler (a_1 , a_2 , a_3) ile temas direngenliği ve kuru sürtünme sönümü değerleri üzerinde etkili olan parametreler (F_n , F_s , f_s) Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Bu parametreler hakkında detaylı bilgi ve bu verilerin temas

parametrelerinin hesaplanması için kullanılabilecek hale getirilmesi için gerekli bilgiler aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 5.4 : Kuru sürtünme test düzeneği ve ölçüm zinciri.



Şekil 5.5 : A ve B parçalarının bağlı olduğu rijit sistemler (Alt sistem 1 ve 2).

- **Sarsıcı kuvvet genliği ve frekansı ($F_s - f_s$)**

Şekil 5.4 ve 5.5’de görüldüğü üzere, birbirlerine cıvatalı bir bağlantı ile bağlanan ve aralarında kuru sürtünme yüzeyi oluşturan A ve B parçalarını barındıran alt sistem 1 ve alt sistem 2, modal sarsıcının sistem 1 tarafına bağlanması ve sinüs sinyali verilmesi yoluyla sarsılmaktadır. Temas yüzeyinde tek doğrultuda bağıl deplasman elde edilebilmesi amacıyla, modal sarsıcının istenilen genlikte sistemi tahrik edebilmesi için, analizörden çıkan sinyali kuvvetlendirmek ve modal sarsıcı ile analizör arasındaki gerekli elektriksel bağlantıyı sağlamak üzere sinyal yükseltici kullanılmıştır. Sistem, modal sarsıcı ile sarsıldıktan sonra sarsıcı kuvvetin genliğinin

kuvvet biriminde elde edilebilmesi için, alt sistem 1 üzerinde kuvvet sensörü kullanılmıştır.

F_s : Sarsıcı kuvvet genliği (N)

f_s : Sarsıcı kuvvet frekansı (Hz)

- **Bağıl Deplasman (Δd)**

Modal sarsıcı ile sarsılan sistemde, A ve B parçaları yani alt sistem 1 ve alt sistem 2 arasındaki bağıl deplasmanın hesaplanabilmesi amacıyla Şekil 5.4’de görülen a_1 ve a_2 ivmeölçerleri kullanılmıştır. Bu ivmeölçerlerden toplanan ivme verileri (m/s^2) iki defa entegre edilerek deplasmana geçilmiş ve A ve B parçalarının deplasman değerleri d_1 ve d_2 (m) hesaplanmıştır.

a_1 : Alt sistem 1 tarafında elde edilen ivme değeri (m/s^2)

a_2 : Alt sistem 2 tarafında elde edilen ivme değeri (m/s^2)

d_1 : Alt sistem 1 tarafında elde edilen deplasman değeri (m)

d_2 : Alt sistem 2 tarafında elde edilen deplasman değeri (m)

Lineer olmayan bir sistemde, sistem sarsıcı tarafından sinusoidal bir şekilde sarsıldığı için, a_1 ve a_2 ivmeölçerlerinden elde edilen ivme değerlerinin tam olarak sinusoidal olması beklenmemekle birlikte, düşük genlikli titreşim durumunda bu ivme verilerinin iki defa entegre edilmesi sonucu elde edilecek deplasmanların sinusoidal fonksiyona çok yakın olması beklenmektedir. İlerleyen bölümlerde, ölçülen ivme sinyallerinin de sinusoidal fonksiyona çok yakın olacağı görülecektir. Ölçülen ivme değerinin de (5.1)’deki gibi periyodik olduğu kabul edilirse;

$$a = A \sin (\omega t) \quad (5.1)$$

İvme verisinin okunduğu noktadaki deplasman değeri;

$$d = \iint A \sin (\omega t) = - \frac{A}{\omega^2} \sin (\omega t) \quad (5.2)$$

olarak elde edilebilir. Eğer deplasman verisinin (5.3)’teki gibi olduğu kabul edilirse;

$$d = D \sin (\omega t) \quad (5.3)$$

$$D_1 = - \frac{A_1}{\omega^2} \text{ ve } D_2 = - \frac{A_2}{\omega^2} \quad (5.4)$$

olarak hesaplanabilir. Burada A_1 ve A_2 sırasıyla a_1 ve a_2 ivmeölçerlerinden elde edilen ivme değerlerinin genlikleridir. Böylece;

$$d_1 = D_1 \sin(\omega t) \text{ ve } d_2 = D_2 \sin(\omega t) \quad (5.5)$$

olarak elde edilebilir. Sonuç olarak;

Δd : Bağlı deplasman (m) olmak üzere,

$$\Delta d = d_1 - d_2 \quad (5.6)$$

olarak hesaplanabilir.

- **İletilen Kuvvet (Sürtünme Kuvveti) (F_i)**

Şekil 5.4’de görülen a_3 ivmeölçeri, kuru sürtünme yüzeyi aracılığıyla alt sistem 2 tarafına iletilen kuvveti aşağıdaki gibi basitçe hesaplayabilmek amacıyla kullanılmıştır. Sistem, modal sarsıcı tarafından tam olarak sistemin ağırlık merkezi ekseninde, tek doğrultuda hareket sağlayacak şekilde sarsılmış ve sarsıcı kuvvetin ölçüldüğü kuvvet sensörü tam olarak alt sistem 1 kütlesinin sarsıcı tarafındaki yüzeyinin merkezinde bulunmaktadır. Bu sebeple iletilen kuvveti ölçmek için kullanılan a_3 ivmeölçeri de, alt sistem 2 kütlesinin yüzey merkezine yerleştirilmiştir. Testler sırasında kullanılan sensör konumları Şekil 5.6’da görülmektedir. İletilen kuvvet, a_3 ivmeölçerinden elde edilen ivme verisi kullanılarak (5.7) denklemi yardımıyla hesaplanmıştır. Burada;

a_3 : Alt sistem 2 tarafında ağırlık merkezi ekseninde elde edilen ivme değeri (m/s^2)

F_i : Alt sistem 2 tarafına iletilen sürtünme kuvveti (N)

m_2 : Sistem 2 kütlesi (kg) (dikey doğrultuda ağırlık merkezi doğrultusu üzerinde bulunan cıvata, kuvvet sensörü, merkezleyici burçlar, pul ve somun kütleleri dahil değildir.)

$$F_i = m_2 a_3 = 5.7 * a_3 \quad (5.7)$$

- **Cıvata Basma Kuvveti (F_n)**

Cıvata basma kuvveti Şekil 5.4’den de görüldüğü üzere, cıvata kafasının hemen altında bulunan kuvvet sensörü aracılığıyla ölçülmekte ve veri toplama sisteminde direk olarak Newton biriminde elde edilmektedir.



Şekil 5.6 : Kuru sürtünme test düzeneği üzerinde kullanılan sensör konumları.

5.3 Kuru Sürtünme Testleri

Kuru sürtünme test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilecek deneysel çalışma sonunda, aşağıda verilen sonuçların elde edilmesi amaçlanmaktadır;

- ✓ Temas yüzeyindeki direngenlik ve kuru sürtünme sönümünün, temas yüzeyini oluşturan parçaların birbirlerine göre olan bağıl deplasmanına göre değişiminin elde edilmesi,
- ✓ Temas yüzeyindeki direngenlik ve kuru sürtünme sönümünün, cıvata basma kuvvetine göre değişiminin elde edilmesi.

Yukarıda bahsedilen bağıl deplasman değerinin değiştirilebilmesi için aşağıdaki parametrelerin etkili olduğu, yapılan literatür araştırması sonucu bilinmektedir;

- Cıvata basma kuvveti (bağıl deplasman ile ters orantılı)
- Sarsıcı kuvvet genliği (bağıl deplasman ile doğru orantılı)

Temas parametrelerinin bağıl deplasmana göre değişiminin elde edilmesi amaçlandığından dolayı, testler sırasında mümkün olan maksimum bağıl deplasman değerinin elde edilmesine çalışılmıştır. Ancak bu çalışmada kullanılan test düzeneğinin, otomotiv alanında karşılaşılan temas durumunu gerçekçi olarak yansıtabilmesi ve temas özelliklerinin pratik olarak elde edilmesine imkan vermesine rağmen bazı dezavantajları da mevcuttur. Temas yüzeyindeki basma kuvvetinin

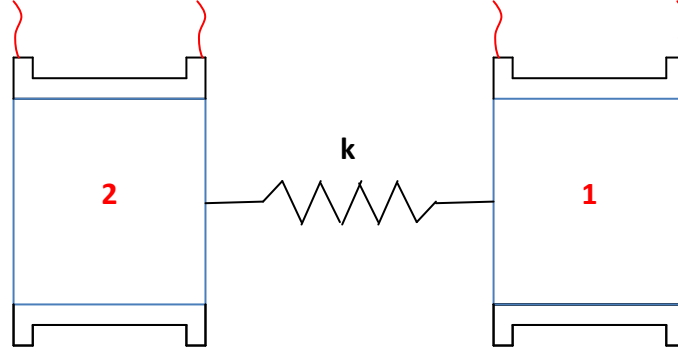
cıvata kullanılarak sağlanması nedeniyle, test düzeneğinin dinamik davranışının değişmemesi için, cıvata basma kuvvetinin minimum değeri oldukça yüksek olmalıdır (Pratik uygulamalarda da bu kuvvet oldukça yüksektir). Cıvata sıkma momenti yeteri kadar yüksek olmadığı zaman, yani düşük cıvata basma kuvveti oluştuğunda, sistem çözülmekte ve testler gerçekleştirilememektedir. Yukarıda bahsedildiği üzere, cıvata sıkma kuvvetinin çok düşük olamaması nedeniyle yeterli büyüklükte bağıl deplasman hareketi yaratılamamaktadır. Bağıl deplasman üzerinde etkili bir diğer parametre olan sarsıcı kuvvet genliğinin ise yapılan denemelerden sonra, kullanılan modal sarsıcının limitleri nedeniyle yeteri kadar yüksek değerlere çıkartılamayacağı anlaşılmıştır. Ancak, testlerin amacı doğrultusunda kullanılabilecek ve bağıl deplasmanların kontrol edilmesine hizmet edecek bir başka parametre de, sarsıcı ile uygulanan kuvvetin frekansıdır:

Literatürde yapılan araştırma sonucunda, kullanılacak sarsıcı kuvvet frekansı konusundaki ilk düşünce, tek yönlü bir bağıl hareket sağlamayan ve sistemin istenmeyen hareketler yapmasına neden olan frekanslardan uzak durmak şeklindeydi. Sarsıcı frekansı 40Hz seçilerek ilk testler yapılmış ve sonuçlar incelendiğinde, temas parametrelerinin karakterize ettiği bağıl deplasman – iletilen kuvvet histeresis grafiği sağlıklı bir şekilde elde edilememiştir. Bunun ardından, sistem üzerinde modal test gerçekleştirilmesine ve rijit kütle modları ile eğilme ve burulma modlarından uzak durulmasına karar verilmiş ve sistemin bu modlara karşılık gelen doğal frekanslarından uzak bir frekanda sarsılması ile sistemin istenmeyen titreşimler yapmasının engellenmesi amaçlanmıştır. Bu değerlendirmeler göz önüne alınarak sisteme ayrıntılı bir modal test yapılmış ve sistemin sağlıklı sarsılabileceği frekans aralığı belirlenmiştir.

5.3.1 Sarsıcı kuvvet frekansının belirlenmesi

Yukarıda bahsedildiği gibi yapılan ilk testler sonucu, sarsıcı kuvvet genliği ve cıvata tarafından sağlanan normal kuvvet değiştirilerek, temas parametrelerinin hesaplanması için yeterli bağıl deplasmanın elde edilemediği anlaşılmıştır. Bu sebeple test düzeneğinin, yeterli bağıl deplasmanın elde edilebileceği farklı bir sarsıcı kuvvet frekansında sarsılmasına karar verilmiştir. Test düzeneğinin Şekil 5.7’de gösterildiği gibi basit bir kütle-yay-kütle sistemi şeklinde düşünülmesi durumunda, sarsılma doğrultusundaki ilk gidip-gelme modunun, ana kütlelerin sarsılma

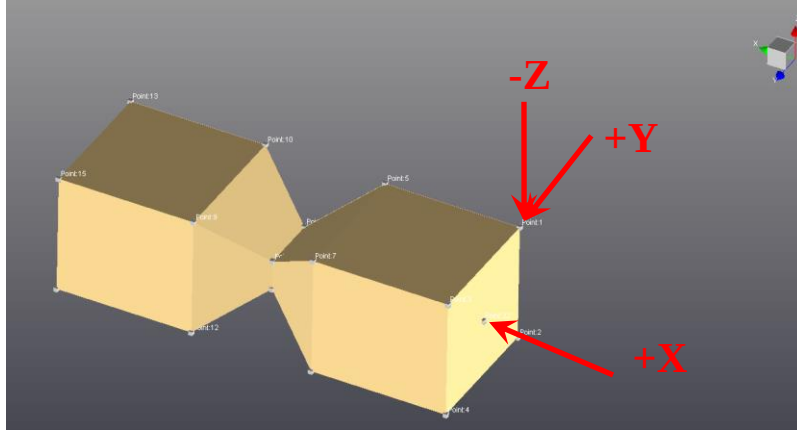
doğrultusunda ters fazda hareketi olduğu bilinmektedir. Test düzeneğinin, alt sistem kütlelerinin maksimum genlikle, ters fazda hareket etmesi sonucu maksimum bağıl deplasmanın elde edileceği bu doğal frekans değerinde sarsılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla test düzeneği üzerinde ayrıntılı bir şekilde modal test yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 5.7 : Test düzeneğinin basit kütle-yay-kütle sistemi olarak gösterimi.

Temas parametrelerinin elde edilmesi için yaklaşık olarak 1 Nm (Temas parametrelerinin elde edilebilmesi için yeterli bağıl deplasmanın sağlanması amacıyla mümkün olan en düşük cıvata sıkma momenti kullanılarak testlerin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Ancak torkmetrenin hassasiyetinin 1 Nm olmasından dolayı 1 Nm'den daha düşük cıvata sıkma momenti kullanılmasına rağmen cıvata sıkma moment yaklaşık olarak 1 Nm olarak kabul edilmiştir.) ve 10 Nm cıvata sıkma momenti kullanılarak testlerin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Cıvata normal kuvveti değiştikçe, yapının modlarına karşılık gelen doğal frekans değerleri de değişeceğinden, her iki normal kuvvet değerinde de modal test çalışması yapılmasına karar verilmiştir. İlk olarak, daha büyük bağıl deplasman değerlerinin elde edilebileceği 1 Nm cıvata sıkma momenti değerinde modal test gerçekleştirilmiştir. Yapılan modal test çalışmasında, test düzeneğini temsil etmesi için oluşturulan geometri Şekil 5.8'de görülmektedir. Yapılan modal test çalışmasında, bağıl deplasmanın maksimum olmasının beklendiği gidip-gelme modunun elde edilebilmesi için test düzeneği, modal çekiç kullanılarak Şekil 5.8'de gösterildiği gibi alt sistem 1 tarafından ve ok ile gösterilen noktadan X eksenine doğrultusunda tahrik edilmiştir. Test düzeneği, ayrıca 1. eğilme, 2. eğilme ve burulma modlarının belirlenebilmesi için yine Şekil 5.8'de oklar ile gösterilen noktadan Y ve Z eksenlerinde tahrik edilmiştir. Modal test, test düzeneğinin sabit bir noktadan tahrik edilmesi ve ivmeölçerlerin gezdirilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Üç boyutlu ivmeölçer kullanılarak ve her bir tahrik noktasına karşılık 21 adet noktadan üç boyutlu ivme verisi toplanılarak toplamda 189 adet frekans tepki fonksiyonu elde edilmiştir. Test düzeneğinin hangi nokta ve doğrultularda tahrik edildiği Şekil 5.9’da da gösterilmiştir.



Şekil 5.8 : Test düzeneği üzerinde yapılan modal test çalışması için oluşturulan geometri.



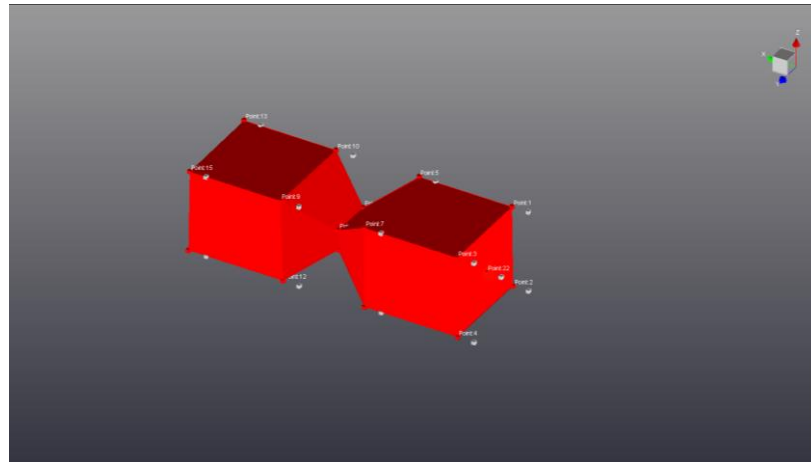
Şekil 5.9 : Modal test çalışmasındaki tahrik noktaları.

Yapılan modal test çalışması sonucu, temas parametrelerinin elde edileceği testler sırasında, X doğrultusunda aksenal hareket elde edilmesi amacıyla uzak durulması gereken rijit kütle modu ile eğilme ve burulma modları belirlenmiştir. Uzak durulması gereken gidip-gelme rijit kütle modu, 1. eğilme modu, burulma modu ve 2. eğilme modu sırasıyla Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de verilmiştir. Yapılan inceleme sonunda, test düzeneğinin X eksen doğrultusunda ters fazda gidip gelme hareketi yaptığı öngörülen 1. mod ise belirlenememiştir. Sarsma frekansı ile ilgili yapılan değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir:

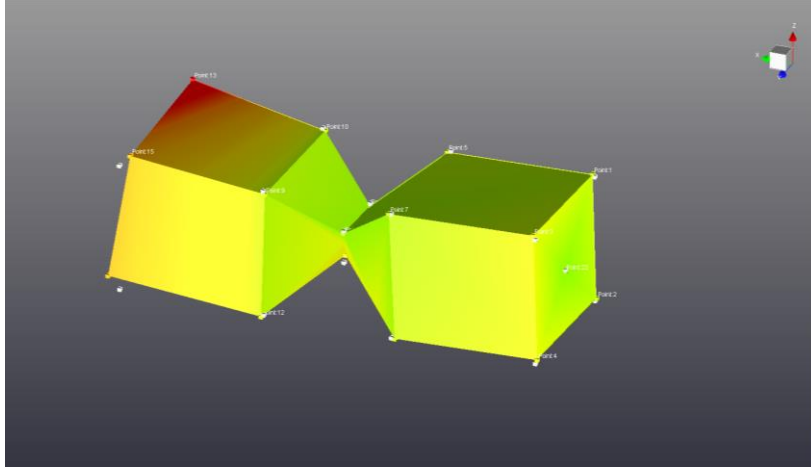
- Yaklaşık 600Hz’e kadar burulma ve eğilme modları mevcuttur. Daha yüksek frekanslardaki titreşim modları ise bu modların kombinasyonları şeklinde elde edilmektedir.

- Yapılan modal test öncesi, X eksenı doğrultusundaki gidip-gelme modunun yüksek frekanslarda çıkması beklenmekteydi. Bu sebeple, modal test 16000Hz'e kadar yapılmasına rağmen, test düzeneği sağlıklı olarak 4000Hz'e kadar tahrik edilebilmiştir. Ancak ilk modun 4000Hz'in üstünde olması durumunda bile test düzeneğinin temas parametrelerinin elde edilmesi için yapılacak testler sırasında bu kadar yüksek frekanslarda sarsılması, istenilen bağıl deplasman değerinin elde edilmesi için yeterli olmayacağına karar verilmiştir. Deplasman değerinin hesaplanması sırasında ivme değerinin sarsıcı kuvvet frekansının karesine bölünmesi nedeniyle, (Bölüm 5.2.3) frekans arttıkça elde edilen deplasman değeri düşecektir. Ayrıca kullanılan modal sarsıcının maksimum sarsma frekansı 5400Hz olduğundan, test düzeneğinin kullanılabilecek sarsıcı ile çok yüksek frekanslarda sarsılması mümkün değildir.

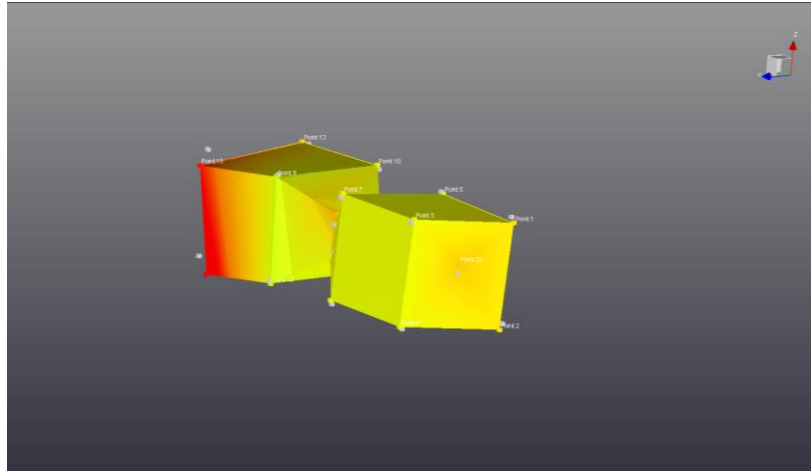
Yapılan modal test sonucu ve yukarıdaki değerlendirmeler neticesinde, temas parametrelerinin elde edilmesi amacıyla, test düzeneğinin eğilme ve burulma modlarından uzakta ancak yeterli bağıl deplasmanın elde edilebileceği en düşük frekansa sarsılmasına karar verilmiştir. Böylece, yapılan modal test çalışmasından da yararlanılarak ve test düzeneğinin sarsıcı tarafından farklı sarsıcı kuvvet frekanslarında sarsılması suretiyle deneme yanılma yoluna gidilerek, en uygun sarsma frekansının belirlenmesi planlanmıştır. Tüm bu bilgiler gözönüne alındığında ve yapılan deneme çalışmaları neticesinde, yeterli bağıl deplasman değerinin elde edildiği en uygun frekans yaklaşık olarak 940 Hz olarak belirlenmiştir.



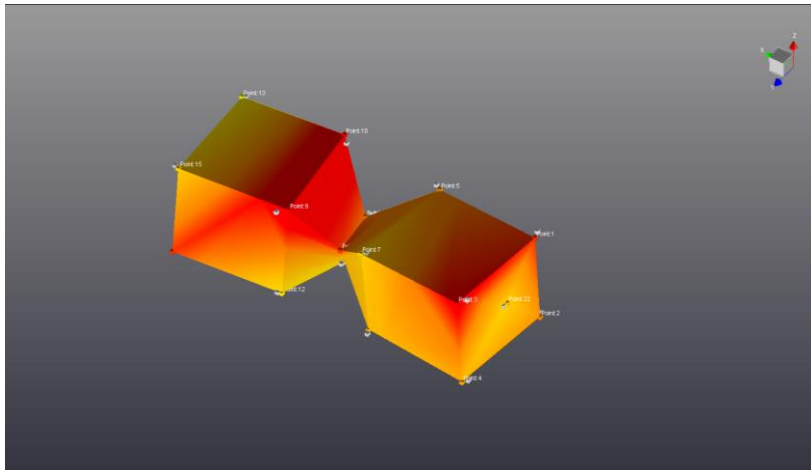
Şekil 5.10 : 1 Nm cıvata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş gidip-gelme rijit kütle moduna ait mod şekli (1.2 Hz).



Şekil 5.11 : 1 Nm cıvata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş 1. eğilme moduna ait mod şekli (294 Hz).

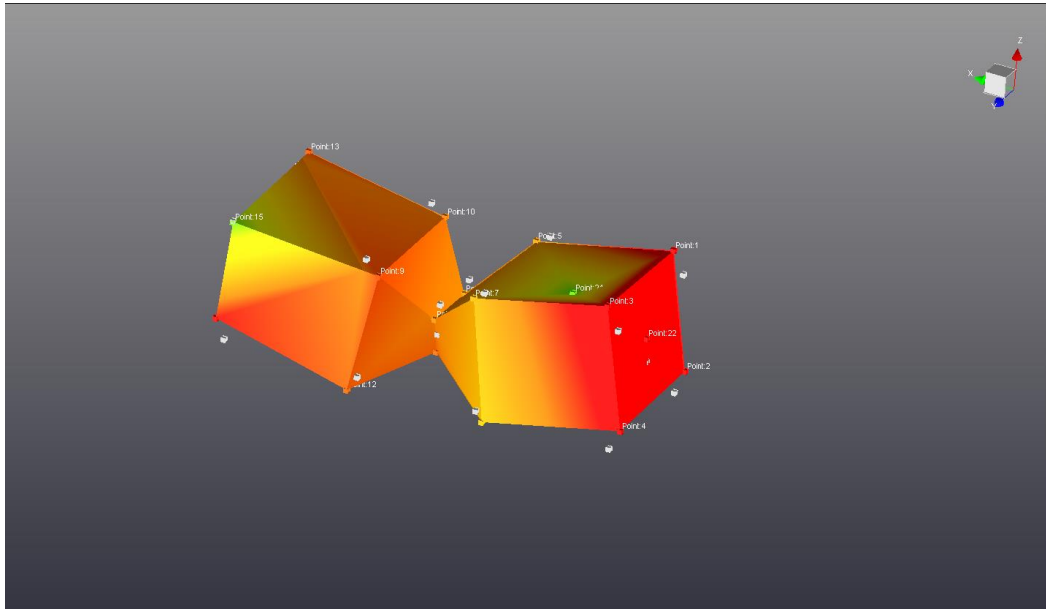


Şekil 5.12 : 1 Nm cıvata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş burulma moduna ait mod şekli (415 Hz).

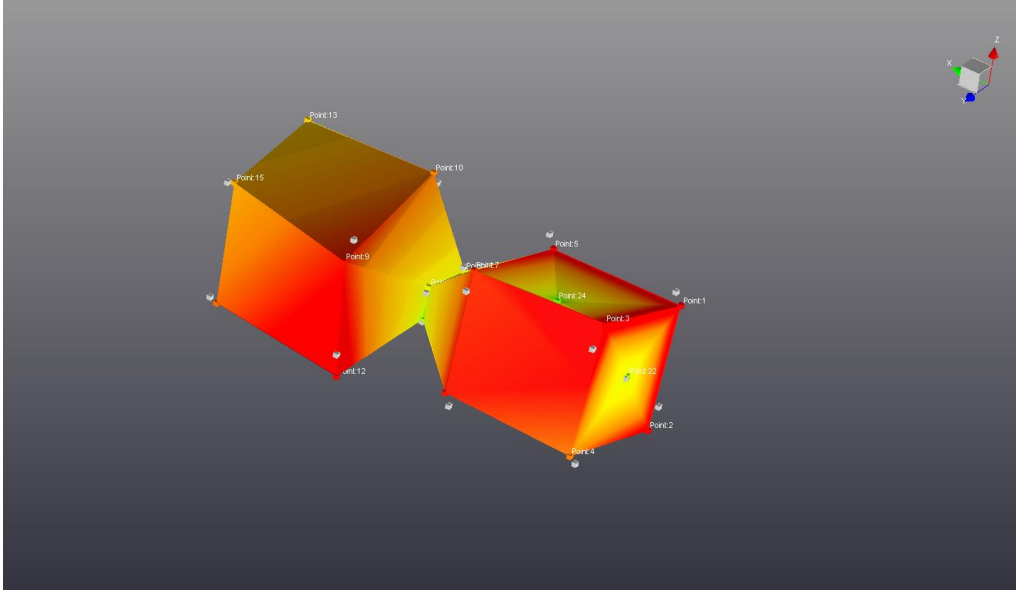


Şekil 5.13 : 1 Nm cıvata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş 2. eğilme moduna ait mod şekli (554 Hz).

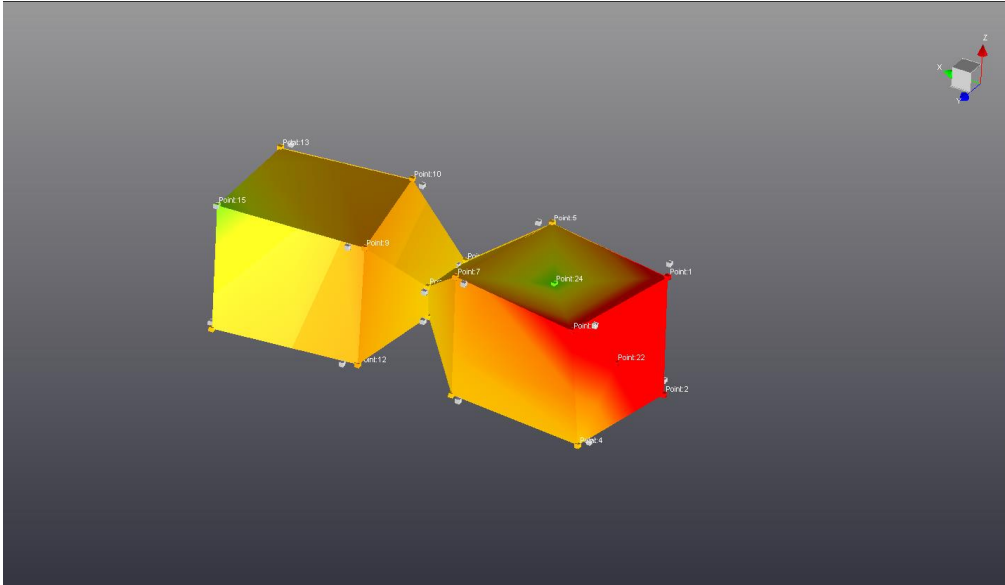
1 Nm cıvata sıkma momenti değeri için uygun sarsıcı kuvvet frekansı değeri belirlendikten sonra, cıvata 10 Nm sıkma momenti ile sıkılarak modal test tekrarlanmıştır. Modal test sonucunda elde edilen 1. eğilme, burulma ve 2. eğilme modları sırasıyla Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da görülmektedir. Test düzeneğinin 10 Nm cıvata sıkma momenti altında daha rijit davranacağı tahmin edilmekteydi. 1 Nm ve 10 Nm cıvata sıkma momentleri altında elde edilen modlara ait doğal frekans sonuçlarını özetleyen Çizelge 5.1 incelendiğinde, doğal frekans değerlerinin beklenildiği gibi 10 Nm cıvata sıkma momenti altında daha yüksek olduğu görülmektedir. 10 Nm cıvata sıkma momenti altında, temas parametrelerinin elde edilmesi için yeterli bağıl deplasmanın elde edilebileceği sarsıcı kuvvet frekansının bulunması amacıyla eğilme ve burulma modlarından uzakta yapılan frekans taraması sonucu en uygun frekans değerinin 1650 Hz olduğu belirlenmiştir. Böylece 1 Nm ve 10 Nm cıvata sıkma momenti için temas parametrelerinin elde edilmesi amacıyla test düzeneği, modal sarsıcı tarafından yukarıda belirlenen frekanslarda sarsılmış ve temas parametrelerinin sürtünme yüzeyini oluşturan parçalar arasındaki bağıl deplasmana göre değişimi elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.14 : 10 Nm cıvata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş 1. eğilme moduna ait mod şekli (360 Hz).



Şekil 5.15 : 10 Nm civata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş burulma moduna ait mod şekli (572 Hz).



Şekil 5.16 : 10 Nm civata sıkma momenti için test düzeneğinin deneysel olarak elde edilmiş 2. eğilme moduna ait mod şekli (697 Hz).

Çizelge 5.1 : 1 Nm ve 10 Nm civata sıkma momentleri için test düzeneği üzerinde yapılan modal test sonucunda elde edilen doğal frekans değerleri.

	Civata Sıkma Momenti	
	1 Nm	10 Nm
1. Eğilme modu doğal frekansı (Hz)	294	360
Burulma modu doğal frekansı (Hz)	415	572
2. Eğilme modu Doğal frekansı (Hz)	554	697

5.3.2 Temas parametrelerinin elde edilmesi ve sonuçlar

Temas yüzeylerindeki temas parametrelerinin bağıl deplasmana göre değişiminin elde edilebilmesi için, testler ilk olarak yaklaşık 1 Nm cıvata sıkma momenti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece mümkün olan en büyük bağıl deplasman elde edilerek, temas parametrelerinin bağıl deplasmana göre değişimi incelenebilecektir.

Bu bölümde ilk olarak, belirli bir bağıl deplasman değeri için temas direngenliği ve kuru sürtünme sönümü değerlerinin deneysel olarak elde edilen verilerden hesaplanması ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Daha sonra, farklı bağıl deplasman değerleri için temas parametreleri hesaplanarak, bağıl deplasmana göre değişimleri elde edilmiştir. Aynı zamanda yapılan ölçümlerin tekrarlanabilirliğinin anlaşılabilmesi için, aynı ölçümün farklı periyotlarından temas parametreleri hesaplanmış ve sonuçların tekrarlanabilirliği incelenmiştir. İlk olarak, 17,7 N sarsıcı kuvvet genliği için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamaların ilk adımı, deneysel olarak elde edilen verilerin, temas parametrelerinin elde edilmesi amacıyla uygun hale getirilmesi için gerekli işlemlerin yapılmasıdır. Literatür araştırmasında belirtildiği üzere, temas yüzeylerinin stabil bir hale gelebilmesi için sarsıcı çalıştırıldıktan en az 15 s sonra elde edilen veriler hesaplamalarda kullanılacaktır. İlk olarak, bir periyotluk veri kullanılarak yapılan işlemler açıklanacaktır. Verilerin, temas parametrelerini elde etmek için yapılacak hesaplamalar öncesi hazırlanması için gerekli ön işlemler, bölüm 5.2.3’de anlatılanlara benzer olarak Şekil 5.17’de özetlenmiştir. Şekil 5.17’de yeşil ile renklendirilmiş olan kolonlar test düzeneği üzerindeki sensörlerden elde edilen veya testlerin yapılması sırasında kontrollü olarak ayarlanabilen değerlerdir. Diğer sütünlarda yapılan hesaplamalar ise, sütun isimleri ve gerekli katsayılar kullanılarak ham verilerden türetilen yeni değerlerdir. Bölüm 5.2.3 ve Şekil 5.17 beraber incelendiğinde, yapılan işlemler daha açık olarak anlaşılabilir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Zaman (s)	a_1 (g)	a_1 (m/s ²)	a_2 (g)	a_2 (m/s ²)	f_s (Hz)	w (rad/s)	w^2 (rad/s) ²	d_1 (m)	d_2 (m)	Δd (μ m)	a_3 (g)	a_3 (m/s ²)	m_2 (kg)	F_1 (N)	F_s (N)
2			B2*9.81		-D2*9.81	940	2*pi*F2	w ²	-(C2/I2)	-(E2/I2)	(I2-J2)*10^6		L2*9.81	5,7	M2*N2*9.81	

Şekil 5.17 : Deneysel verilerin, temas direngenliği ve kuru sürtünme sönümü değerlerinin elde edilmesi için gerekli ön hesaplamaların yapılması sırasında kullanımı.

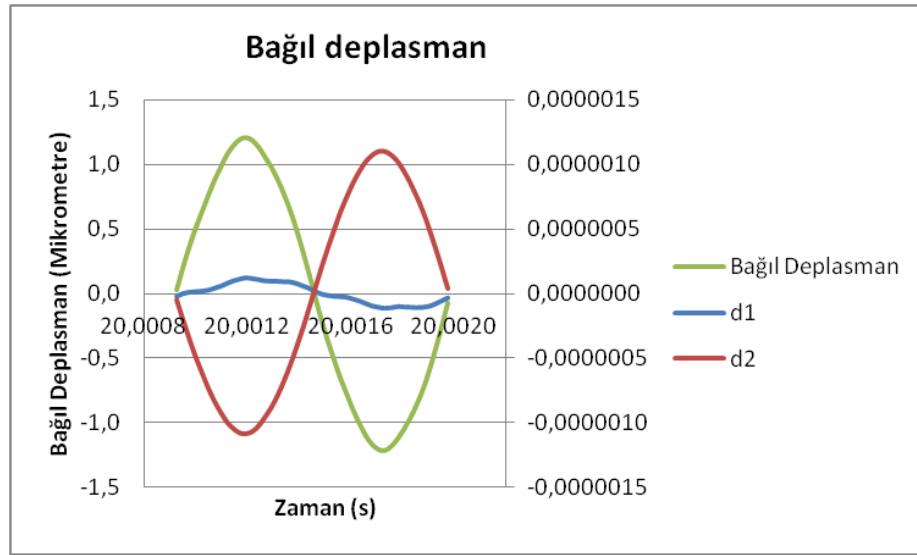
Şekil 5.17’de yapılan hesaplamalar, bir periyotluk veri için tekrarlanmış ve sonuçlar Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Bir periyotluk verinin hesaplamalar için kullanılması.

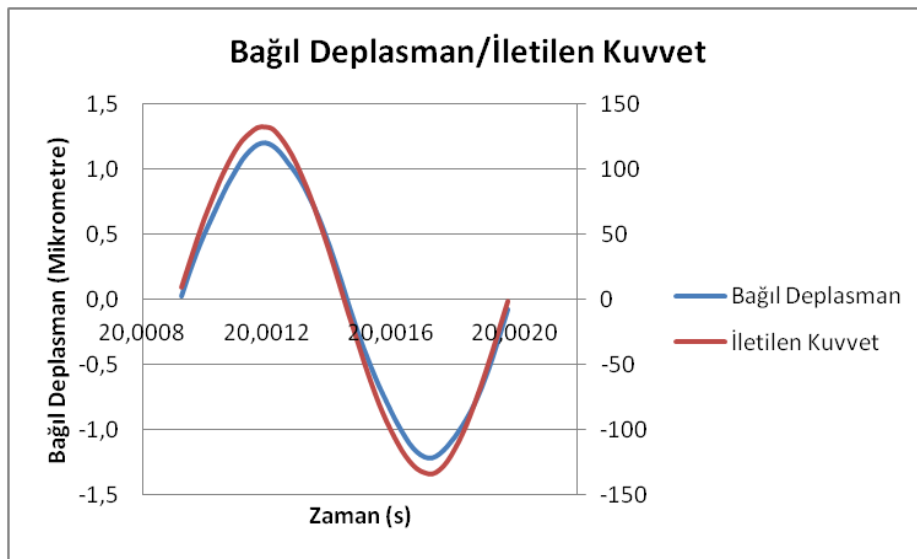
Zaman (s)	a ₁ (g)	a ₁ (m/s ²)	a ₂ (g)	a ₂ (m/s ²)	f _s (Hz)	w (rad/s)	w ² (rad/s) ²	d ₁ (m)	d ₂ (m)	Δd (μm)	a ₃ (g)	a ₃ (m/s ²)	m ₂ (kg)	F ₁ (N)	F _s (N)
20,00092	0,072	0,703	-0,163	1,600	940	5906,194	34883130	-0,0000000202	-0,0000000459	0,026	0,162	1,587	5,7	9,046715	13,14836
20,00095	-0,003	-0,029	-0,711	6,973	940	5906,194	34883130	0,0000000008	-0,0000001999	0,201	0,484	4,751	5,7	27,07855	11,2908
20,00097	-0,040	-0,389	-1,238	12,148	940	5906,194	34883130	0,0000000111	-0,0000003483	0,359	0,802	7,870	5,7	44,8585	9,206558
20,00100	-0,054	-0,526	-1,729	16,962	940	5906,194	34883130	0,0000000151	-0,0000004863	0,501	1,102	10,808	5,7	61,60336	6,945187
20,00102	-0,067	-0,658	-2,166	21,247	940	5906,194	34883130	0,0000000189	-0,0000006091	0,628	1,363	13,375	5,7	76,23984	4,550217
20,00105	-0,093	-0,909	-2,585	25,360	940	5906,194	34883130	0,0000000260	-0,0000007270	0,753	1,616	15,856	5,7	90,37783	2,059573
20,00107	-0,148	-1,454	-2,957	29,010	940	5906,194	34883130	0,0000000417	-0,0000008316	0,873	1,835	18,002	5,7	102,6138	-0,46813
20,00110	-0,204	-2,002	-3,263	32,007	940	5906,194	34883130	0,0000000574	-0,0000009176	0,975	2,027	19,889	5,7	113,3685	-2,99487
20,00112	-0,280	-2,748	-3,531	34,640	940	5906,194	34883130	0,0000000788	-0,0000009930	1,072	2,180	21,381	5,7	121,8724	-5,46698
20,00114	-0,348	-3,418	-3,707	36,362	940	5906,194	34883130	0,0000000980	-0,0000010424	1,140	2,279	22,360	5,7	127,4544	-7,82618
20,00117	-0,396	-3,883	-3,827	37,538	940	5906,194	34883130	0,0000001113	-0,0000010761	1,187	2,355	23,104	5,7	131,6947	-10,0305
20,00119	-0,430	-4,219	-3,846	37,728	940	5906,194	34883130	0,0000001209	-0,0000010815	1,202	2,365	23,202	5,7	132,2539	-12,023
20,00122	-0,409	-4,015	-3,786	37,139	940	5906,194	34883130	0,0000001151	-0,0000010647	1,180	2,336	22,915	5,7	130,6168	-13,7796
20,00124	-0,382	-3,747	-3,630	35,608	940	5906,194	34883130	0,0000001074	-0,0000010208	1,128	2,226	21,841	5,7	124,4915	-15,2445
20,00127	-0,347	-3,407	-3,392	33,277	940	5906,194	34883130	0,0000000977	-0,0000009540	1,052	2,075	20,359	5,7	116,0454	-16,3903
20,00129	-0,337	-3,310	-3,128	30,683	940	5906,194	34883130	0,0000000949	-0,0000008796	0,974	1,887	18,512	5,7	105,5183	-17,1994
20,00131	-0,334	-3,276	-2,792	27,393	940	5906,194	34883130	0,0000000939	-0,0000007853	0,879	1,654	16,224	5,7	92,47537	-17,6542
20,00134	-0,324	-3,182	-2,399	23,531	940	5906,194	34883130	0,0000000912	-0,0000006746	0,766	1,401	13,740	5,7	78,32035	-17,7277
20,00136	-0,317	-3,108	-1,959	19,222	940	5906,194	34883130	0,0000000891	-0,0000005510	0,640	1,107	10,860	5,7	61,90242	-17,4378
20,00139	-0,276	-2,705	-1,468	14,397	940	5906,194	34883130	0,0000000775	-0,0000004127	0,490	0,806	7,908	5,7	45,07819	-16,7856
20,00141	-0,208	-2,044	-0,948	9,302	940	5906,194	34883130	0,0000000586	-0,0000002667	0,325	0,477	4,679	5,7	26,67183	-15,7709
20,00144	-0,144	-1,412	-0,389	3,818	940	5906,194	34883130	0,0000000405	-0,0000001095	0,150	0,137	1,343	5,7	7,65256	-14,443
20,00146	-0,053	-0,518	0,182	-1,784	940	5906,194	34883130	0,0000000149	0,0000000512	-0,036	-0,202	-1,983	5,7	-11,3034	-12,8191
20,00149	0,013	0,126	0,745	-7,309	940	5906,194	34883130	-0,0000000036	0,0000002095	-0,213	-0,522	-5,116	5,7	-29,161	-10,925
20,00151	0,049	0,485	1,279	-12,550	940	5906,194	34883130	-0,0000000139	0,0000003598	-0,374	-0,849	-8,324	5,7	-47,4468	-8,80727
20,00153	0,072	0,703	1,786	-17,517	940	5906,194	34883130	-0,0000000202	0,0000005022	-0,522	-1,152	-11,303	5,7	-64,4249	-6,507
20,00156	0,082	0,807	2,269	-22,257	940	5906,194	34883130	-0,0000000231	0,0000006381	-0,661	-1,434	-14,067	5,7	-80,1819	-4,06959
20,00158	0,100	0,983	2,684	-26,329	940	5906,194	34883130	-0,0000000282	0,0000007548	-0,783	-1,677	-16,448	5,7	-93,7512	-1,54608
20,00161	0,150	1,471	3,065	-30,073	940	5906,194	34883130	-0,0000000422	0,0000008621	-0,904	-1,886	-18,503	5,7	-105,466	1,001882
20,00163	0,202	1,981	3,385	-33,206	940	5906,194	34883130	-0,0000000568	0,0000009519	-1,009	-2,075	-20,351	5,7	-116,002	3,528726
20,00166	0,272	2,666	3,648	-35,785	940	5906,194	34883130	-0,0000000764	0,0000010259	-1,102	-2,222	-21,794	5,7	-124,227	5,979398
20,00168	0,335	3,283	3,820	-37,473	940	5906,194	34883130	-0,0000000941	0,0000010742	-1,168	-2,329	-22,847	5,7	-130,23	8,307677
20,00171	0,371	3,639	3,922	-38,480	940	5906,194	34883130	-0,0000001043	0,0000011031	-1,207	-2,382	-23,371	5,7	-133,214	10,47327
20,00173	0,395	3,873	3,925	-38,507	940	5906,194	34883130	-0,0000001110	0,0000011039	-1,215	-2,401	-23,553	5,7	-134,25	12,41896
20,00175	0,383	3,753	3,826	-37,536	940	5906,194	34883130	-0,0000001076	0,0000010760	-1,184	-2,345	-23,003	5,7	-131,117	14,11275
20,00178	0,354	3,471	3,654	-35,848	940	5906,194	34883130	-0,0000000995	0,0000010277	-1,127	-2,230	-21,880	5,7	-124,716	15,52329
20,00180	0,361	3,537	3,391	-33,261	940	5906,194	34883130	-0,0000001014	0,0000009535	-1,055	-2,058	-20,191	5,7	-115,09	16,60253
20,00183	0,370	3,625	3,073	-30,149	940	5906,194	34883130	-0,0000001039	0,0000008643	-0,968	-1,853	-18,174	5,7	-103,591	17,34002
20,00185	0,378	3,710	2,709	-26,571	940	5906,194	34883130	-0,0000001064	0,0000007617	-0,868	-1,606	-15,755	5,7	-89,8055	17,70601
20,00188	0,374	3,667	2,295	-22,513	940	5906,194	34883130	-0,0000001051	0,0000006454	-0,751	-1,321	-12,962	5,7	-73,8818	17,70666
20,00190	0,344	3,375	1,809	-17,741	940	5906,194	34883130	-0,0000000967	0,0000005086	-0,605	-1,023	-10,031	5,7	-57,1756	17,33883
20,00193	0,281	2,752	1,287	-12,623	940	5906,194	34883130	-0,0000000789	0,0000003619	-0,441	-0,702	-6,889	5,7	-39,2645	16,60695
20,00195	0,198	1,947	0,729	-7,152	940	5906,194	34883130	-0,0000000558	0,0000002050	-0,261	-0,364	-3,572	5,7	-20,3585	15,52081
20,00197	0,116	1,142	0,151	-1,481	940	5906,194	34883130	-0,0000000327	0,0000000425	-0,075	-0,029	-0,283	5,7	-1,61103	14,11394

Bir periyotluk veri için, temas yüzeyinin her iki tarafındaki deplasman değerleri (d₁ ve d₂) ile bağıl deplasman değerinin (Δd) zamana göre değişimi Şekil 5.18’de, bağıl deplasman ve iletilen kuvvet (F_s) değerlerinin zamana göre değişimi ise Şekil 5.19’da görülmektedir. Şekil 5.18 incelendiğinde sarsıcı tarafındaki alt sistem 1 kütlesi ve temas yüzeyinin diğer tarafındaki alt sistem 2 kütlesinin ters fazda hareket ettiği görülmektedir. Böylece temas parametrelerinin karakterize ettiği bağıl deplasman – iletilen kuvvet histeresis eğrisinin sağlıklı bir şekilde elde edilebilmesi için yeterli bağıl deplasman bölüm 5.3.1’de belirlenen uygun sarsıcı frekansında sağlanabilmiştir. Şekil 5.19 incelendiğinde ise, beklendiği üzere iletilen kuvvet yani

sürtünme kuvveti ile bağıl deplasman arasında bir miktar faz farkı mevcuttur. Temas yüzeyinde sönüm meydana gelmediği yani temas yüzeyinin sadece yay olarak davrandığı durumda, iletilen kuvvet sinyali ile deplasman verisinin aynı fazda olması gerekirdi. Eğer temas yüzeyinde sadece sönüm meydana geldiği ve yay özeliği göstermediği kabul edilirse, iletilen kuvvet deplasman verisinden 90 derece önde olacaktır. Ancak test düzeneğinde meydana gelen temas yüzeyinde hem sönüm hem de direngenlik mevcut olduğundan, iletilen kuvvet ile deplasman verisi arasında 0 ile 90 derece arasında bir miktar faz farkı olması beklenmektedir. Şekil 5.19'dan görülebildiği üzere iletilen kuvvet bağıl deplasman verisinden küçük bir miktar öndedir.

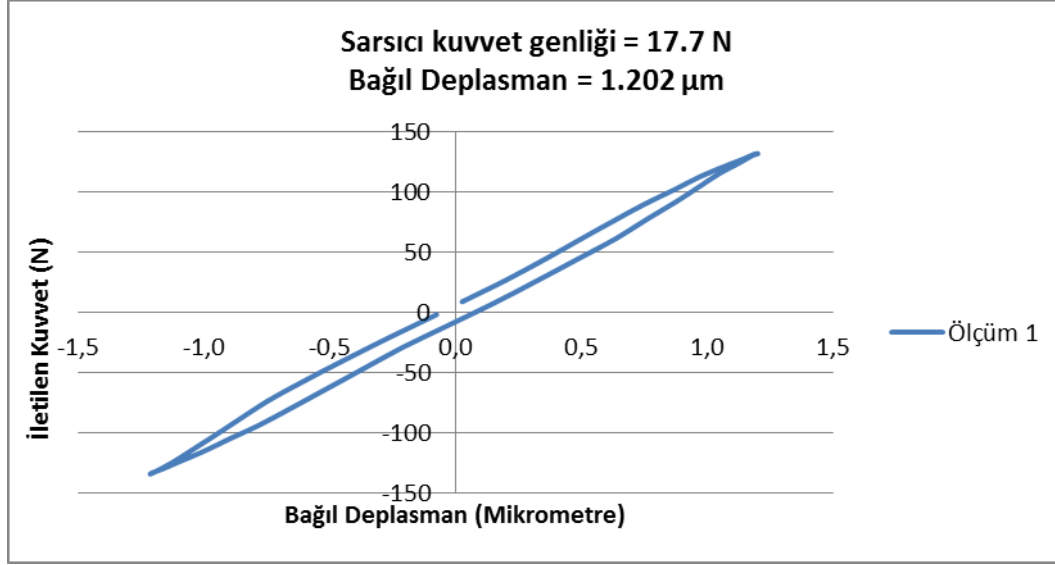


Şekil 5.18 : Bağıl deplasman değerlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 5.19 : Bağıl deplasman ve iletilen kuvvet değerlerinin zamana göre değişimi

Yapılan hesaplamaların açıklanması için ele alınan 17.7 N sarsıcı kuvvet genliği ve 1.202 μm bağıl deplasman genliğine sahip verinin sadece bir periyodunun kullanılmasıyla elde edilen histeresis grafiği Şekil 5.20’de görülmektedir. Bu çalışmada, cıvata tarafından sağlanan normal kuvvet değerinin büyüklüğü nedeniyle, temas yüzeyinde makro-kayma veya tam kayma hareketinin meydana gelemeyeceği tahmin edilmekteydi. Şekil 5.20’deki histeresis grafiği de, beklenildiği üzere temas yüzeyinde mikro-kayma hareketin olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.20 : $F_s=17.7\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.202\mu\text{m}$ için histeresis grafiği.

Literatürde yapılan çalışmalardan bilindiği üzere, histeresis grafiğinin alanı bir periyotluk harekette ısıya dönüşen enerjiyi yani kuru sürtünme sönümünü temsil etmektedir. Histeresis grafiğinin eğimi yani sıfır noktası ile maksimum deplasmanın görüldüğü nokta arasında çizilen doğrunun eğimi de, temas yüzeyindeki eşdeğer direngenliği vermektedir. Ancak bu çalışmada elde edilmeye çalışılan temas parametreleri olan temas direngenliği ve sürtünme yüzeyindeki kuru sürtünme sönümünün hesaplanması için Şanlıtürk, K. Y. ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada [4] önerildiği şekilde, temas yüzeyindeki sürtünme kuvvetinin, temas yüzeyindeki bağıl deplasmanın bir fonksiyonu olan kompleks direngenlik şeklinde temsil edilmesine ve hesaplamaların literatürdeki çalışmaya [4] benzer şekilde yapılmasına karar verilmiştir. Eğer temas yüzeyindeki sürtünme kuvveti;

$$F_i = F_i(\Delta d) \quad (5.8)$$

şeklinde bağıl deplasmanın bir fonksiyonu olarak ifade edilirse ve temas yüzeyinde meydana gelen bağıl deplasmanın (5.9)'daki gibi sinusoidal periyodik bir hareket yaptığı kabul edilirse;

$$\Delta d = D \sin(\omega t) = D \sin \theta \quad (5.9)$$

Sürtünme kuvveti (5.10) eşitliğindeki gibi eşdeğer direngenlik olarak ifade edilebilir:

$$k_{eş}(\Delta d) = k_{re}(\Delta d) + i k_{im}(\Delta d) \quad (5.10)$$

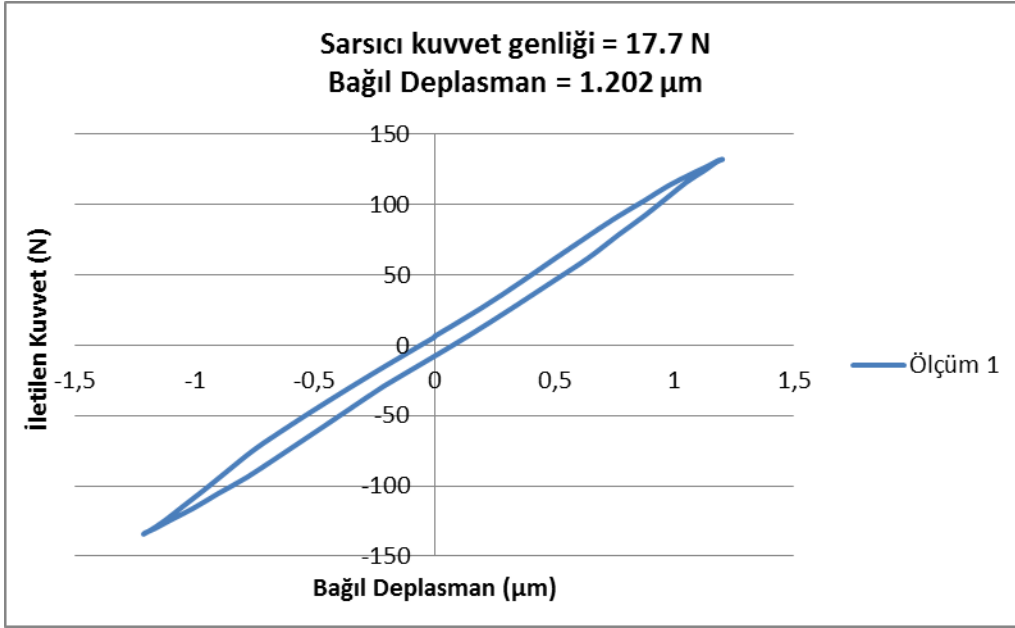
Denklem (5.10)'daki ilk bileşen $k_{re}(\Delta d)$, temas yüzeyindeki direngenliği temsil eden ve bağıl deplasmanın fonksiyonu olan eşdeğer direngenliğin reel parçası, ikinci bileşen $k_{im}(\Delta d)$ ise, temas yüzeyindeki sönümü temsil eden ve bağıl deplasmanın fonksiyonu olan eşdeğer direngenliğin imajiner parçasıdır. Sürtünme kuvvetinin ilk harmonik komponentinin hesaplanması için 1. Derece Harmonik Denge Metodu uygulanırsa, eşdeğer komponentin reel ve imajiner kısımları sırasıyla (5.11) ve (5.12) eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir;

$$k_{re}(\Delta d) = \frac{1}{\pi D} \int_0^{2\pi} F(D \sin \theta) \sin \theta d\theta \quad (5.11)$$

$$k_{im}(\Delta d) = \frac{1}{\pi D} \int_0^{2\pi} F(D \sin \theta) \cos \theta d\theta \quad (5.12)$$

Çizelge 5.3'de, (5.11) ve (5.12) eşitliklerindeki integral hesaplamalarının sayısal olarak yapılabilmesi için gerekli ön hesaplamalar verilmiştir. Şekil 5.18'deki bağıl deplasman ve Şekil 5.20'deki histeresis grafiği dikkatli olarak incelendiğinde veya Çizelge 5.2'deki bağıl deplasman verilerine bakıldığında, sinusoidal şeklindeki bağıl deplasman verisinin tam bir periyot olmadığı yani $0 - 2\pi$ aralığında hareketinin sıfır noktasında başlayıp, sıfır noktasında bitmediği görülmektedir. Bunun sebebi ise, testler sırasında bir periyotluk hareketin kısıtlı sayıda veri ile elde edilmesidir. Bu sebeple, Çizelge 5.3'de kullanılan sinusoidal bağıl deplasman veriye (Δd), $0 - 2\pi$ aralığındaki tam bir periyot hareketin oluşturulabilmesi için, yani sinusoidal hareketin sıfır noktasında başlayıp sıfır noktasında tamamlanabilmesi için interpolasyon yapılmış ve böylece bağıl deplasmanın başlangıç ve bitiş noktalarının sıfır olması sağlanmıştır. Çizelge 5.2 ile Çizelge 5.3'de bulunan bağıl deplasman verileri karşılaştırıldığında, Çizelge 5.3'deki başlangıç ve bitiş verilerinin sıfır değerinde olduğu ve satır sayısının Çizelge 5.2'ye göre iki adet fazla olduğu

görülmektedir. Şekil 5.21’de interpolasyon yapılmış bağıl deplasman ve iletilen kuvvet verileri kullanılmasıyla, yani bağıl deplasmanın tam olarak $0-2\pi$ aralığında çizilmesiyle elde edilmiş histeresis grafiği verilmiştir.



Şekil 5.21 : $F_s=17.7\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.202\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (İnterpolasyon yapılmış veri kullanılarak).

Çizelge 5.3, denklem (5.11) ve (5.12)’de sunulan integrallerin sayısal olarak gerçekleştirilmesini açıklamaktadır. Çizelge 5.3’de, tam bir periyotluk sinusoidal bağıl deplasman hareketine karşılık deneysel olarak elde edilen iletilen kuvvet (sürtünme kuvveti) verileri de $F_i(\theta)$ sütunu altında verilmiştir. Bu sütündaki ilk ve son satır da yukarıda bahsedilen interpolasyon işlemi sonucu hesaplanmıştır. İntegral işlemleri $0-2\pi$ aralığında gerçekleştiğinden bağıl deplasman verisinin ilk ve son satırına sırasıyla 0 ve 2π gelecek şekilde her bir veriye karşılık gelen açı değeri hesaplanır ve θ sütunu altına yazılır. Böylece her bir satıra karşılık gelen $\sin(\theta)$ ve $\cos(\theta)$ değerleri hesaplanır. Daha sonra her bir satır için $F_i(\theta)*\sin(\theta)$ ve $F_i(\theta)*\cos(\theta)$ çarpımları yapılır. Sonuç olarak $0-2\pi$ aralığında bu çarpımların interallerinin alınması amacıyla, $0-2\pi$ aralığında 46 satırın herbiri için hesaplanan $F_i(\theta)*\sin(\theta)$ ve $F_i(\theta)*\cos(\theta)$ sütunlarındaki değerler ayrı ayrı toplanır ve sırasıyla Çizelge 5.3’deki son iki sütuna yazılır. İntegral işleminin tamamlanması için gerekli tüm değerlerin elde edilmesinden sonra, aşağıdaki (5.13) ve (5.14) eşitlikleri kullanılarak k_{re} ve k_{im} hesaplanır;

Çizelge 5.3 : Bir periyotluk verinin hesaplamalar için kullanılması.

$\Delta d(\theta)$	$F_i(\theta)$	θ	$\sin(\theta)$	$\cos(\theta)$	$F_i(\theta)*\sin(\theta)$	$F_i(\theta)*\cos(\theta)$
0,00	6,50	0,00	0,00	1,00	0,00	6,50
0,03	9,05	0,14	0,14	0,99	1,26	8,96
0,20	27,08	0,28	0,28	0,96	7,46	26,03
0,36	44,86	0,42	0,41	0,91	18,25	40,98
0,50	61,60	0,56	0,53	0,85	32,64	52,24
0,63	76,24	0,70	0,64	0,77	49,01	58,40
0,75	90,38	0,84	0,74	0,67	67,16	60,47
0,87	102,61	0,98	0,83	0,56	85,07	57,38
0,97	113,37	1,12	0,90	0,44	101,89	49,70
1,07	121,87	1,26	0,95	0,31	115,91	37,66
1,14	127,45	1,40	0,98	0,17	125,52	22,13
1,19	131,69	1,54	1,00	0,03	131,61	4,60
1,20	132,25	1,68	0,99	-0,10	131,53	-13,82
1,18	130,62	1,82	0,97	-0,24	126,74	-31,60
1,13	124,49	1,95	0,93	-0,37	115,43	-46,64
1,05	116,05	2,09	0,87	-0,50	100,50	-58,02
0,97	105,52	2,23	0,79	-0,62	83,15	-64,96
0,88	92,48	2,37	0,69	-0,72	64,24	-66,52
0,77	78,32	2,51	0,59	-0,81	46,04	-63,36
0,64	61,90	2,65	0,47	-0,88	29,06	-54,66
0,49	45,08	2,79	0,34	-0,94	15,42	-42,36
0,33	26,67	2,93	0,21	-0,98	5,55	-26,09
0,15	7,65	3,07	0,07	-1,00	0,53	-7,63
-0,04	-11,30	3,21	-0,07	-1,00	0,79	11,28
-0,21	-29,16	3,35	-0,21	-0,98	6,06	28,52
-0,37	-47,45	3,49	-0,34	-0,94	16,23	44,59
-0,52	-64,42	3,63	-0,47	-0,88	30,25	56,88
-0,66	-80,18	3,77	-0,59	-0,81	47,13	64,87
-0,78	-93,75	3,91	-0,69	-0,72	65,13	67,44
-0,90	-105,47	4,05	-0,79	-0,62	83,11	64,93
-1,01	-116,00	4,19	-0,87	-0,50	100,46	58,00
-1,10	-124,23	4,33	-0,93	-0,37	115,18	46,54
-1,17	-130,23	4,47	-0,97	-0,24	126,36	31,51
-1,21	-133,21	4,61	-0,99	-0,10	132,48	13,92
-1,21	-134,25	4,75	-1,00	0,03	134,17	-4,69
-1,18	-131,12	4,89	-0,98	0,17	129,12	-22,77
-1,13	-124,72	5,03	-0,95	0,31	118,61	-38,54
-1,05	-115,09	5,17	-0,90	0,44	103,44	-50,45
-0,97	-103,59	5,31	-0,83	0,56	85,88	-57,93
-0,87	-89,81	5,45	-0,74	0,67	66,74	-60,09
-0,75	-73,88	5,59	-0,64	0,77	47,49	-56,60
-0,61	-57,18	5,72	-0,53	0,85	30,30	-48,49
-0,44	-39,26	5,86	-0,41	0,91	15,97	-35,87
-0,26	-20,36	6,00	-0,28	0,96	5,61	-19,57
-0,08	-1,61	6,14	-0,14	0,99	0,22	-1,60
0,00	5,87	6,28	0,00	1,00	0,00	5,87

$\Sigma(F_i(\theta)*\sin(\theta))$	$\Sigma(F_i(\theta)*\cos(\theta))$	k_{re} (MN/m)	k_{im} (MN/m)	η (%)
2914,70	47,15	107,17	1,73	1,62

$$k_{re} = \frac{(\sum(F_i(\theta) * \sin(\theta))) * \Delta\theta}{\pi D} \quad (5.13)$$

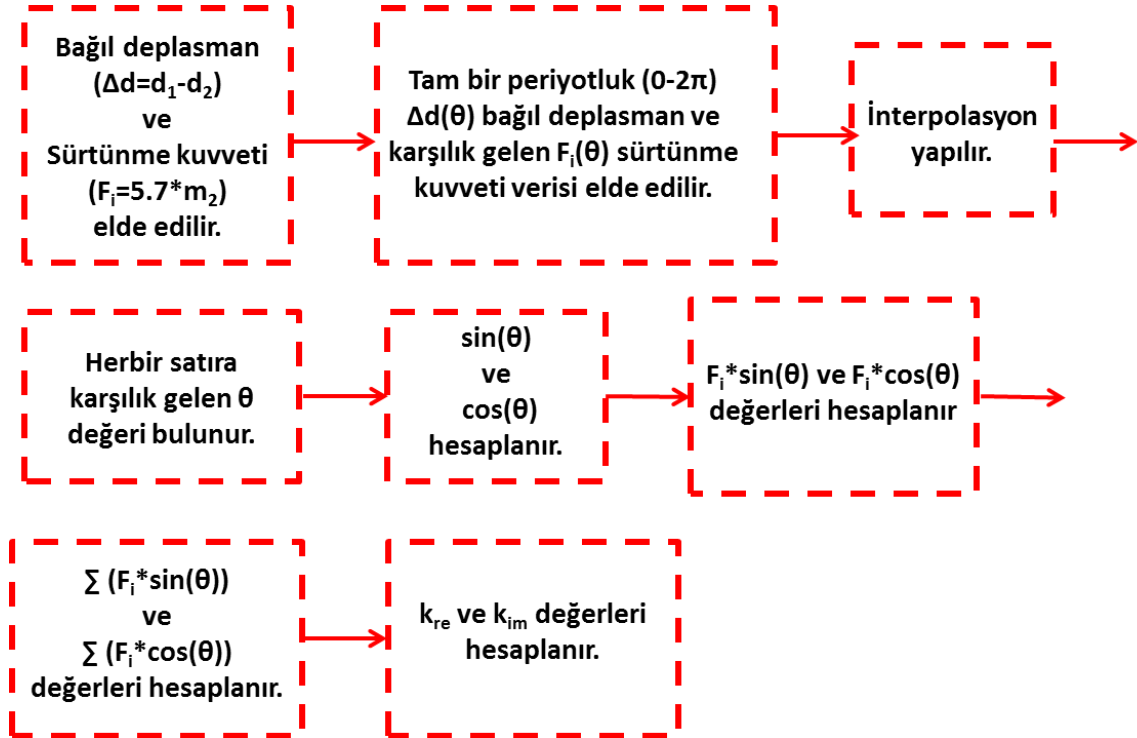
$$k_{im} = \frac{(\sum(F_i(\theta) * \cos(\theta))) * \Delta\theta}{\pi D} \quad (5.14)$$

(5.13) ve (5.14) denklemlerinde bulunan $\Delta\theta$, Çizelge 5.3’de θ sütununda her satır arasındaki açı farkıdır. D ise Δd sütunundaki maksimum bağıl deplasman değeridir (Pozitif ve negatif maksimum bağıl deplasman mutlak değerlerinin ortalaması kullanılmıştır). Bu değerler kullanılarak k_{re} ve k_{im} değerleri hesaplanır.

$$k_{re} = \frac{(2914.7) * 0.140}{\pi * 1.208} = 107.1 \text{ MN/m}$$

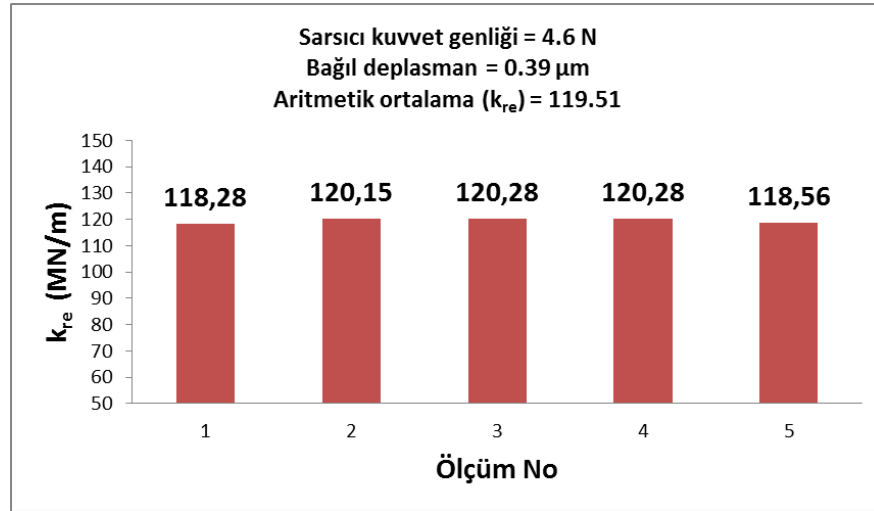
$$k_{im} = \frac{(47.1) * 0.140}{\pi * 1.208} = 1.73 \text{ MN/m}$$

k_{re} ve k_{im} değerlerinin hesaplanması için şimdiye kadar detaylı olarak anlatılan tüm hesaplamalar, Şekil 5.22’de akış şeması şeklinde verilmiştir. Deneysel olarak elde edilen veriler kullanılarak k_{re} ve k_{im} elde edilmesi için gerçekleştirilen tüm hesaplamalar akış şemasında özet halinde sıralanmıştır.

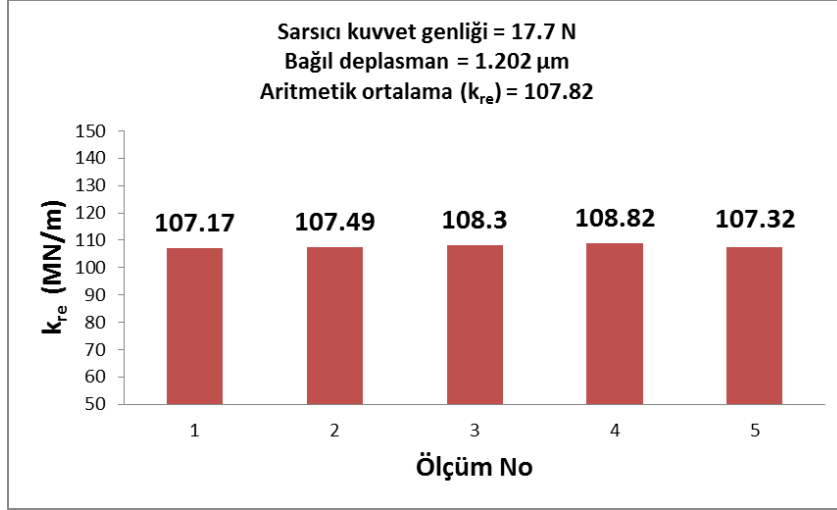


Şekil 5.22 : Temas parametrelerinin elde edilmesini özetleyen akış şeması.

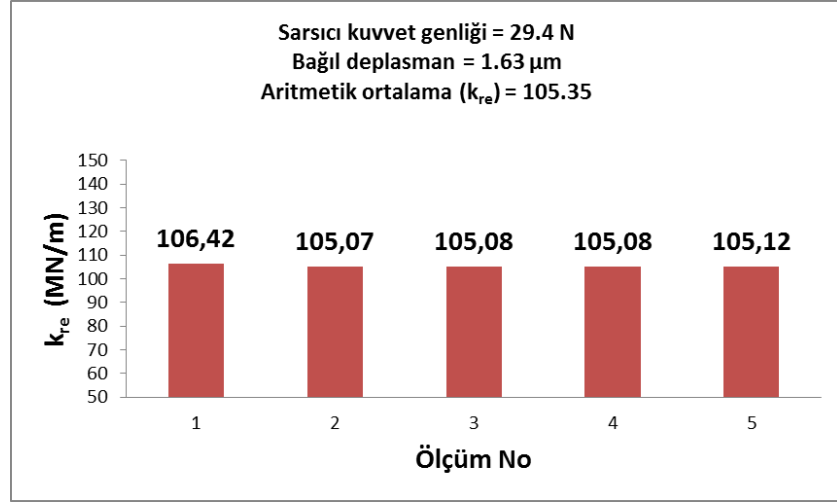
1 Nm ve 10 Nm cıvata sıkma momenti değerleri için, çeşitli sarsıcı kuvvet genlikleri altında testler gerçekleştirilmiş ve böylece farklı bağıl deplasman değerleri için k_{re} ve k_{im} değerleri hesaplanmıştır. Fakat temas direngenliği ve sürtünme sönümü değerlerinin bağıl deplasman'a göre değişimi incelenmeden önce, ölçüm tekrarlanabilirliğinin görülebilmesi amacıyla, yaklaşık olarak 30 saniye süresince yapılan ölçümler içerisinde farklı periyotlara ait veriler kullanılarak k_{re} ve k_{im} değerleri hesaplanmıştır. Böylece aynı sarsıcı kuvvet genliği kullanılarak yapılan testler sırasında k_{re} ve k_{im} değerlerinin tekrarlanabilirliği gözlemlenmiştir. Şekil 5.24'de 1 Nm cıvata sıkma momenti altında, 17.7 N sarsıcı kuvvet genliği için yapılan 1 saniyelik ölçüm içerisinde rastgele seçilen 5 farklı periyot sonucu elde edilen k_{re} değerleri verilmiştir. Aynı ayrı hesaplanan k_{re} değerlerinin aritmetik ortalamaya göre en fazla %0.9 saptığı görülmektedir. Şekil 5.23 – 5.28 grafiklerinde ise 1 Nm cıvata sıkma momenti ve farklı yatay kuvvet genliği yani farklı bağıl deplasmanlar için yapılan ölçümlere ait sonuçlar bulunmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, ölçümlerin tekrarlanabilirliğinin oldukça başarılı olduğu anlaşılmaktadır.



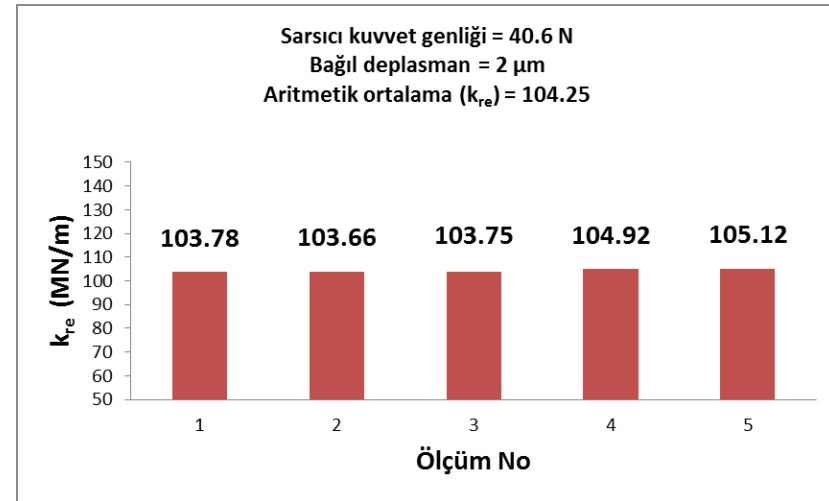
Şekil 5.23 : $F_s=4.6N$, $f_s=940Hz$ ve $\Delta d=0.39\mu m$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.



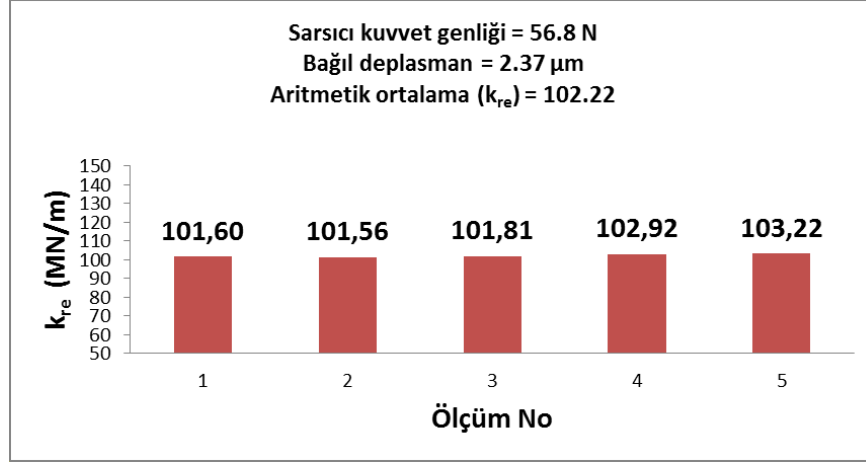
Şekil 5.24 : $F_s=17.7\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.202\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.



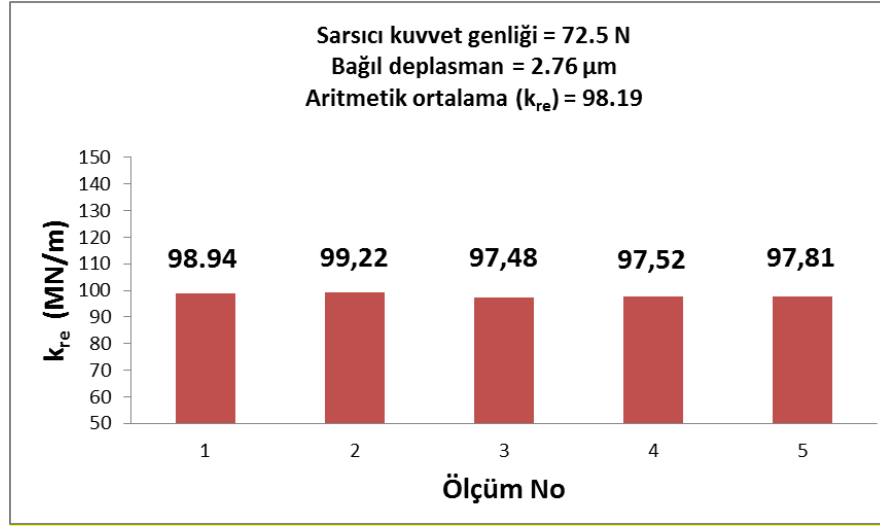
Şekil 5.25 : $F_s=29.4\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.63\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.



Şekil 5.26 : $F_s=40.6\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.

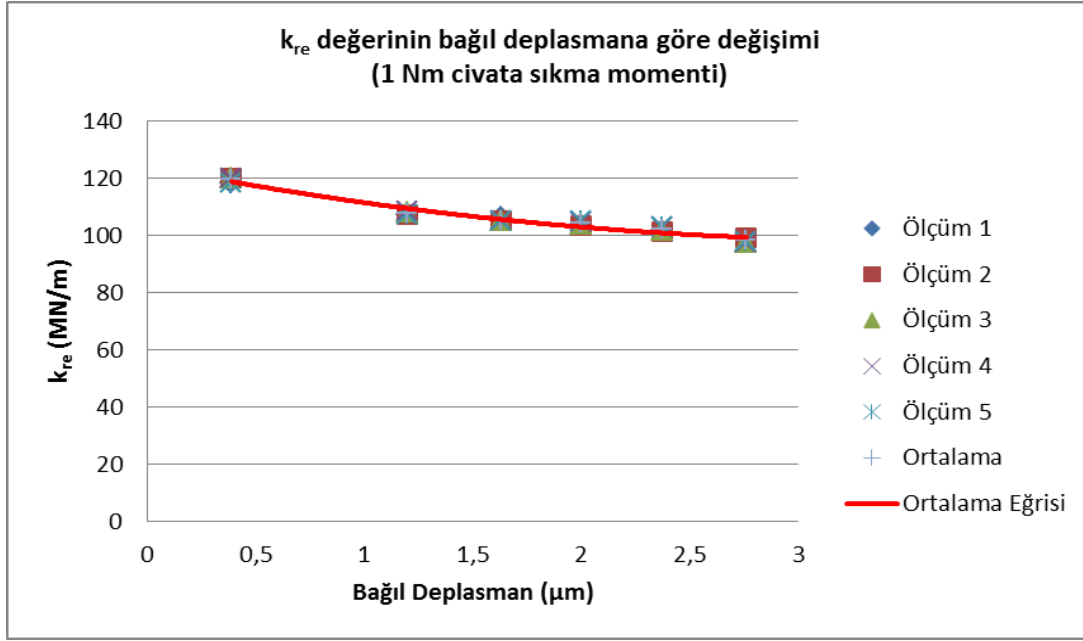


Şekil 5.27 : $F_s=56.8\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.37\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.

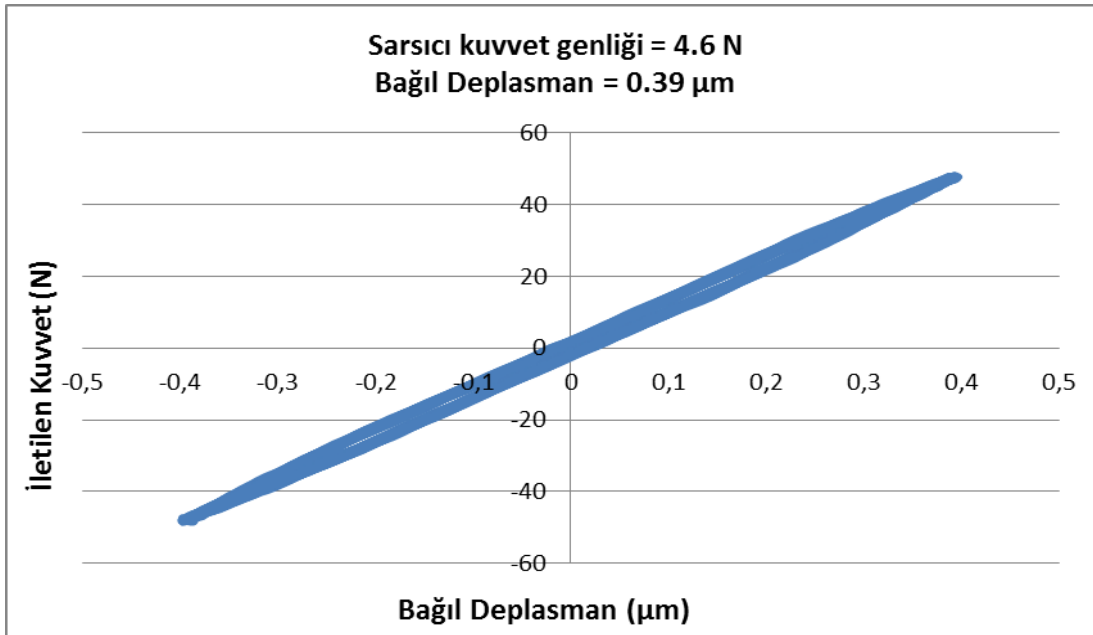


Şekil 5.28 : $F_s=72.5\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.76\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.

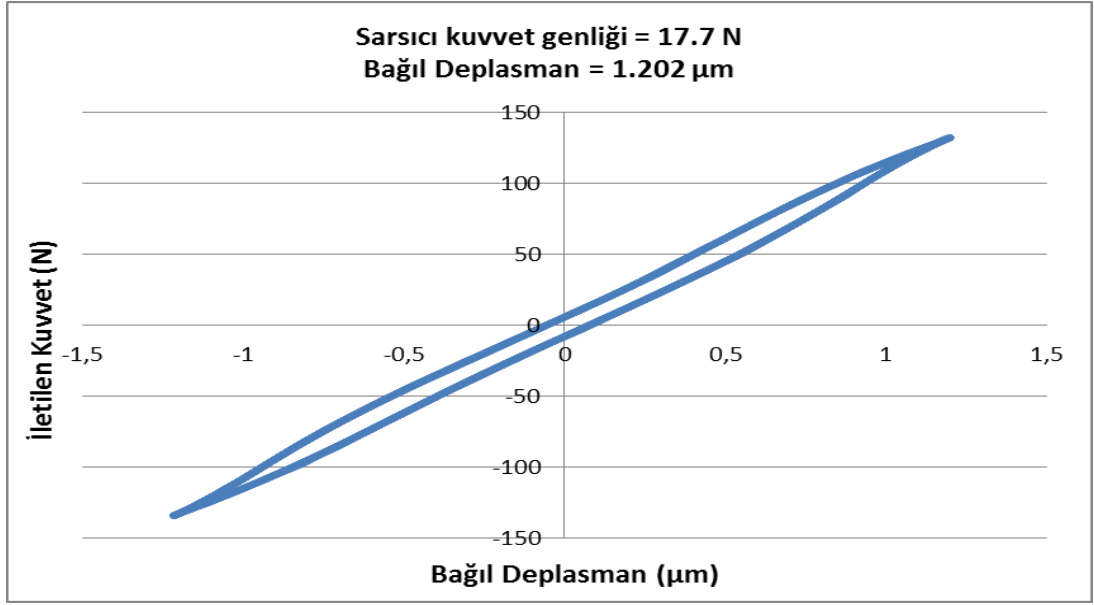
Şekil 5.29’da 1 Nm cıvata sıkma momenti altında farklı sarsıcı kuvvet genliği değerlerinde yapılan testler sonucu elde edilen k_{re} değerlerinin bağıl deplasmana göre değişimi verilmiştir. Ölçüm yapılan her bağıl deplasman için Şekil 5.23 – 5.28 arası grafiklerde gösterilen k_{re} değerleri yer almakta ve bu değerlerin aritmetik ortalamalarından uygun eğri geçirilmektedir. Şekil 5.30 – 5.35’de ise, ölçüm yapılan sarsıcı kuvvet genlikleri için 1 saniyelik veri kullanılarak elde edilen histeresis grafikleri görülmektedir. Son olarak, ölçüm yapılan bağıl deplasman değerleri için elde edilen histeresis grafikleri, karşılaştırılabilmesi için Şekil 5.36’da aynı grafikte sunulmuştur. Şekil 5.36 incelendiğinde, bağıl deplasman arttıkça histeresis grafiklerinin eğiminin yani eşdeğer temas direngenlik değerinin Şekil 5.29’dakine benzer şekilde azaldığı görülmektedir.



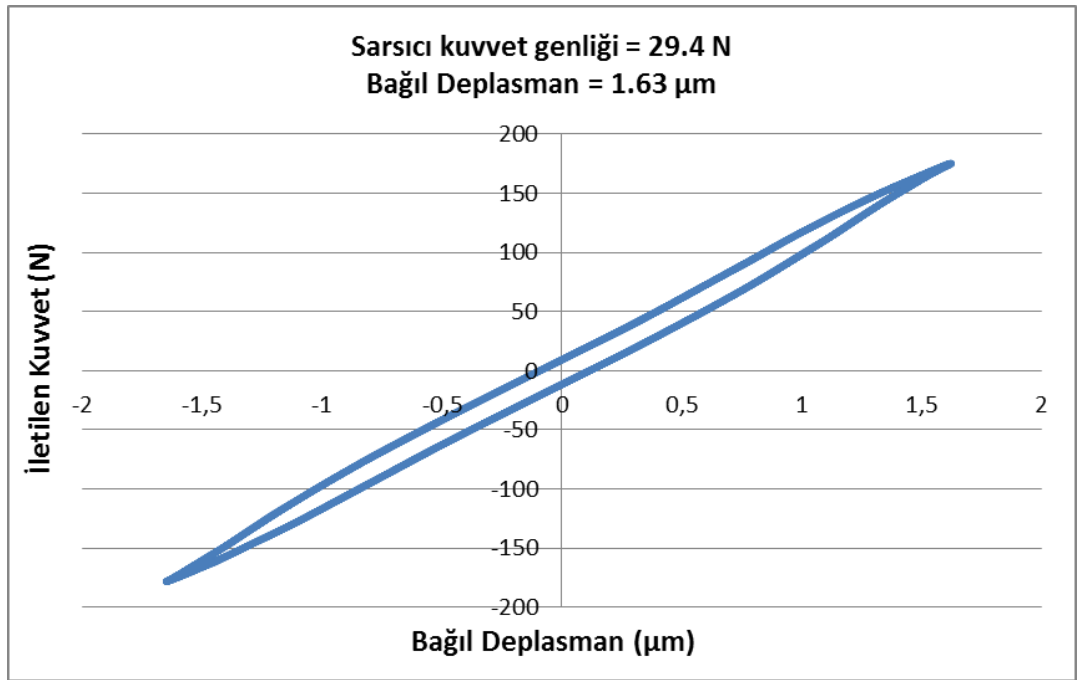
Şekil 5.29 : 1 Nm civata sıkma momenti ve $f_s=940\text{Hz}$ için k_{re} değerlerinin bağıl deplasman ile değişimi.



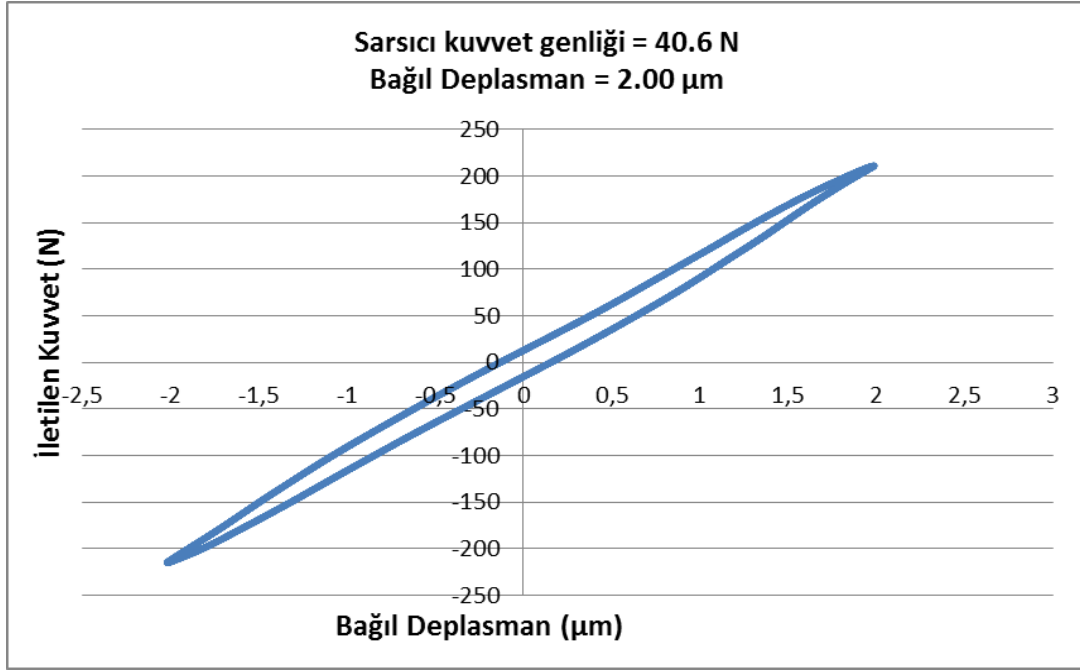
Şekil 5.30 : $F_s=4.6\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=0.39\mu m$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).



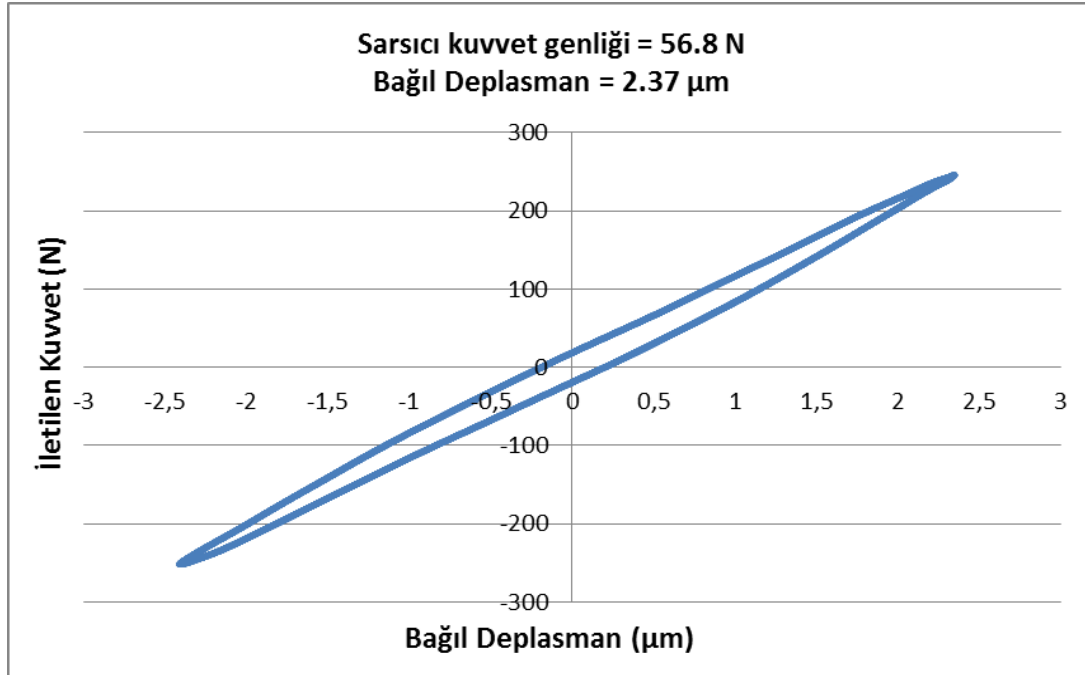
Şekil 5.31 : $F_s=17.7\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.202\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).



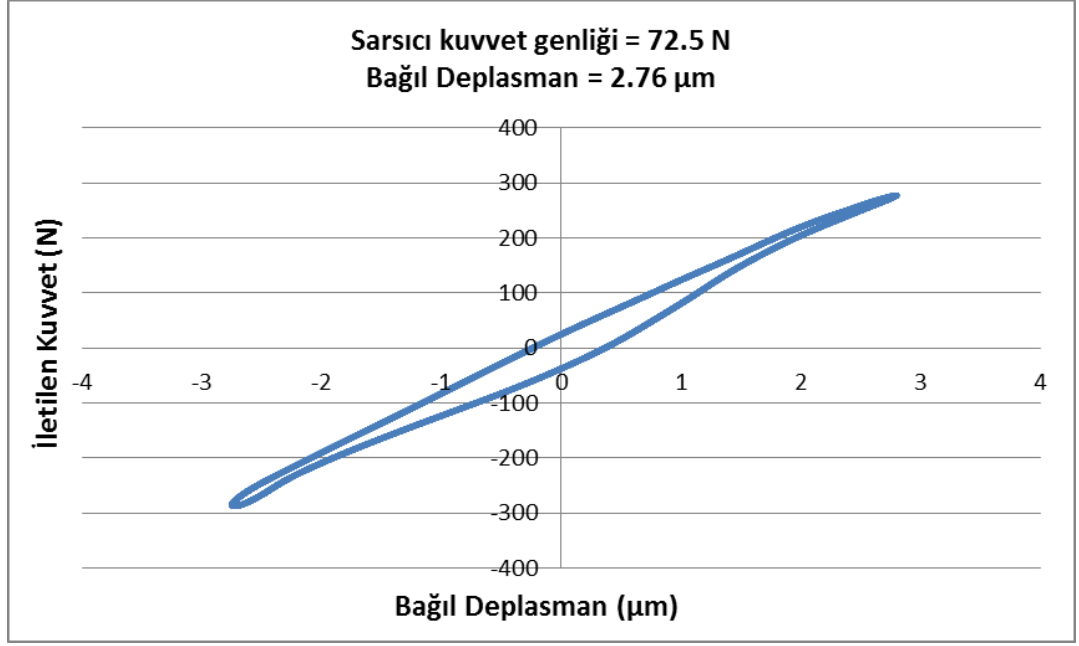
Şekil 5.32 : $F_s=29.4\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.63\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).



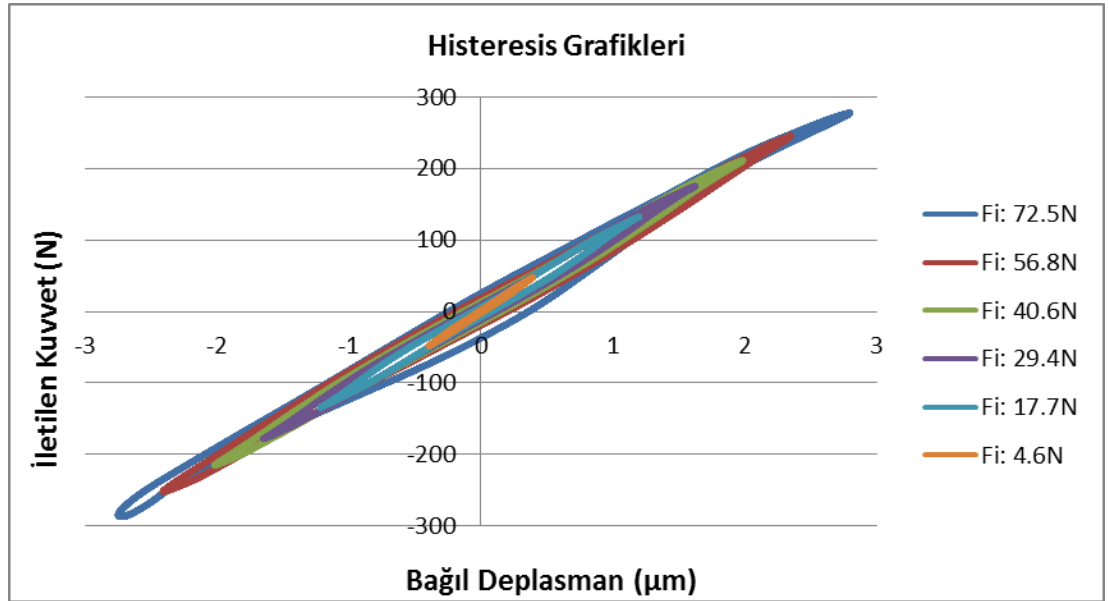
Şekil 5.33 : $F_s=40.6\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.00\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).



Şekil 5.34 : $F_s=56.8\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.37\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak).



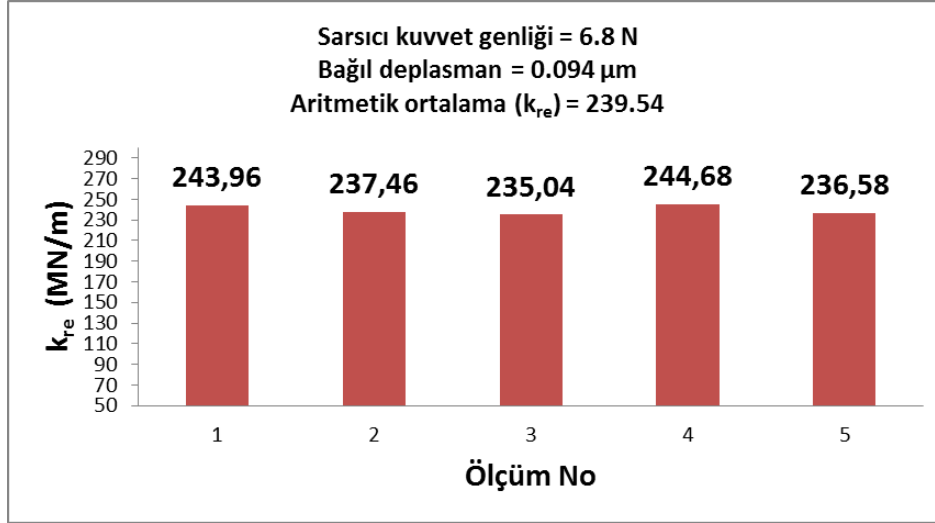
Şekil 5.35 : $F_s=72.5\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.76\mu\text{m}$ için histeresis grafiği (1 saniye boyunca toplanan veri kullanılarak)



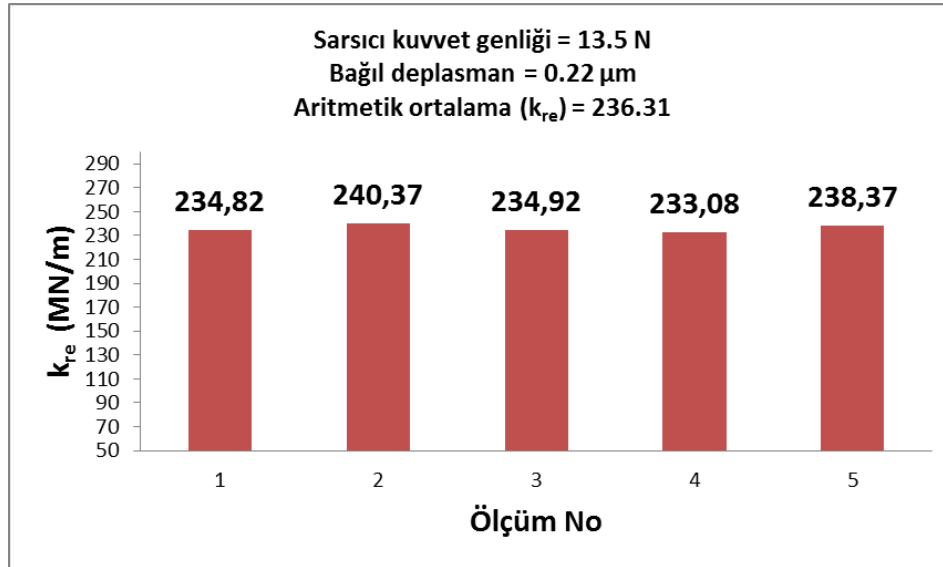
Şekil 5.36 : 1 Nm cıvata sıkma momenti ve $f_s=940\text{Hz}$ için farklı bağıl deplasman değerlerinde elde edilen histeresis grafikleri.

Cıvata sıkma momenti, yani temas yüzeyinde meydana gelen yüzey basıncının temas direngenliği üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi amacıyla, ölçümler bir de 10 Nm cıvata sıkma momenti altında gerçekleştirilmiştir. Bölüm 5.3.1’de belirtildiği üzere, 10 Nm cıvata sıkma momenti altında gerçekleştirilen testlerde, test düzeneği 1650 Hz frekansta sarsılmıştır. Şekil 5.37 – 5.39’da çeşitli sarsıcı kuvvet genliklerinde gerçekleştirilen testlerde, rastgele seçilen ölçümlere ait sonuçlar görülmekte ve

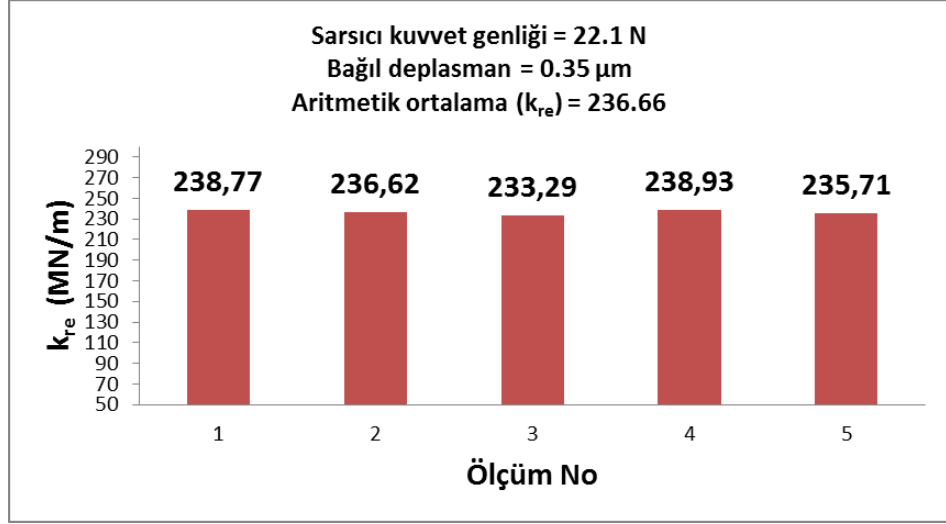
böylece ölçümlerin tekrarlanabilir olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.37 – 5.39 incelendiğinde, çeşitli sarsıcı kuvvet genlikleri için gerçekleştirilen testlerde, ölçüm tekrarlanabilirliğinin başarılı olduğu görülmektedir. Elde edilen k_{re} değerlerinin ortalama değerlerine göre sapmalarına bakıldığında, en fazla %1.8 sapma olduğu görülmektedir.



Şekil 5.37 : $F_s=6.8N$, $f_s=1650Hz$ ve $\Delta d=0.094\mu m$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.

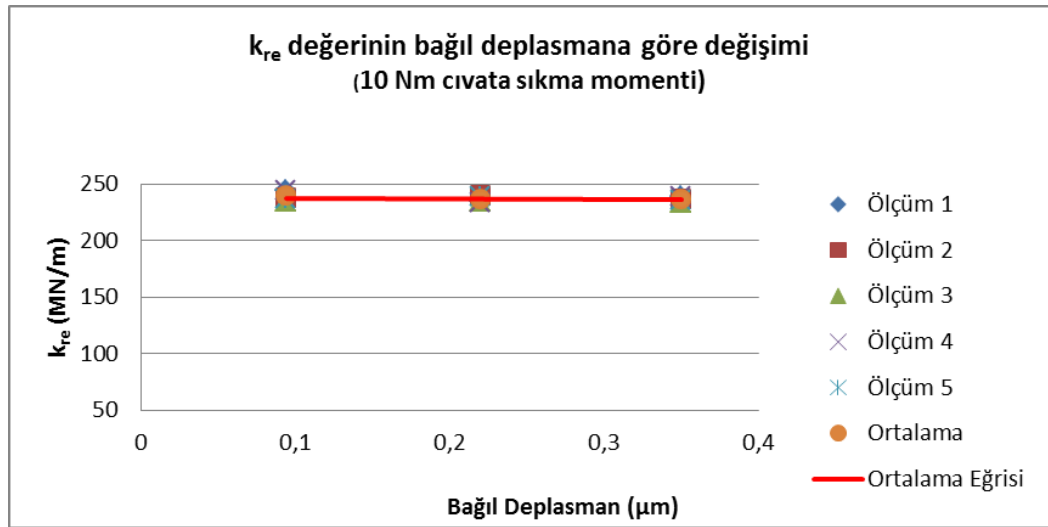


Şekil 5.38 : $F_s=13.5N$, $f_s=1650Hz$ ve $\Delta d=0.22\mu m$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.



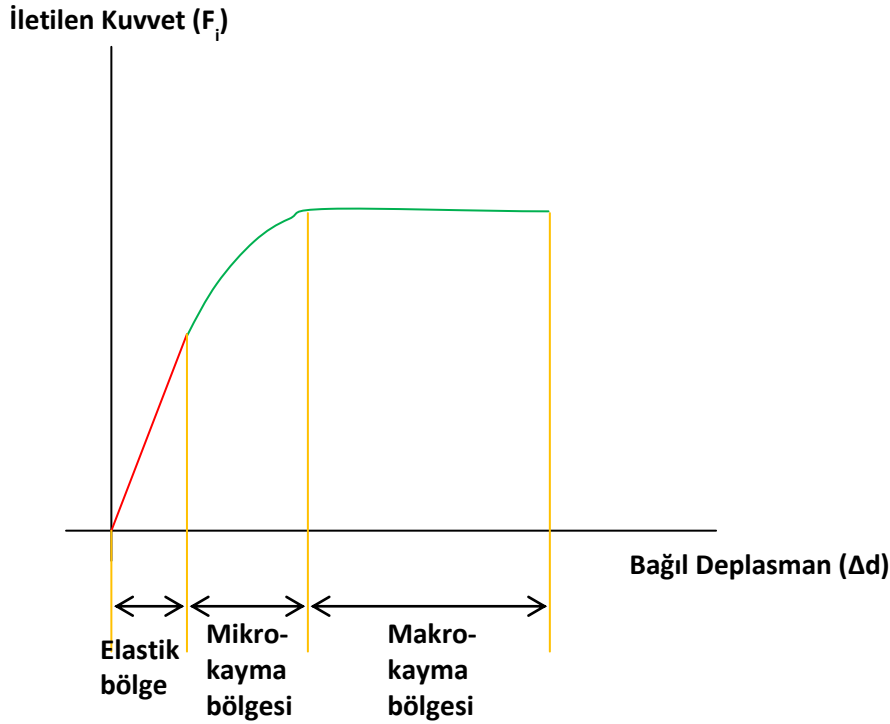
Şekil 5.39 : $F_s=22.1\text{N}$, $f_s=1650\text{Hz}$ ve $\Delta d=0.35\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{re} değerleri.

Şekil 5.40'da ise yapılan ölçümler sonunda k_{re} değerinin bağıl deplasmana göre değişimi verilmiştir. Farklı sarsıcı kuvvet genliği altında birçok test gerçekleştirilmesine rağmen sonuçların benzer çıkması nedeniyle sadece 3 farklı bağıl deplasman değerinde sonuçlar sunulmuştur. 10 Nm civata sıkma momenti altında gerçekleştirilen testlerde elde edilebilen maksimum ve minimum bağıl deplasman değeri ile bunların arasında yer alan bağıl deplasman değeri için sonuçların sunulmasının yeterli olduğu anlaşılmıştır. Şekil 5.40 incelendiğinde, testler sırasında elde edilebilen bağıl deplasman aralığında temas direngenliğinin değişmediği görülmektedir.



Şekil 5.40 : 10 Nm civata sıkma momenti ve $f_s=1650\text{Hz}$ için k_{re} değerlerinin bağıl deplasman ile değişimi.

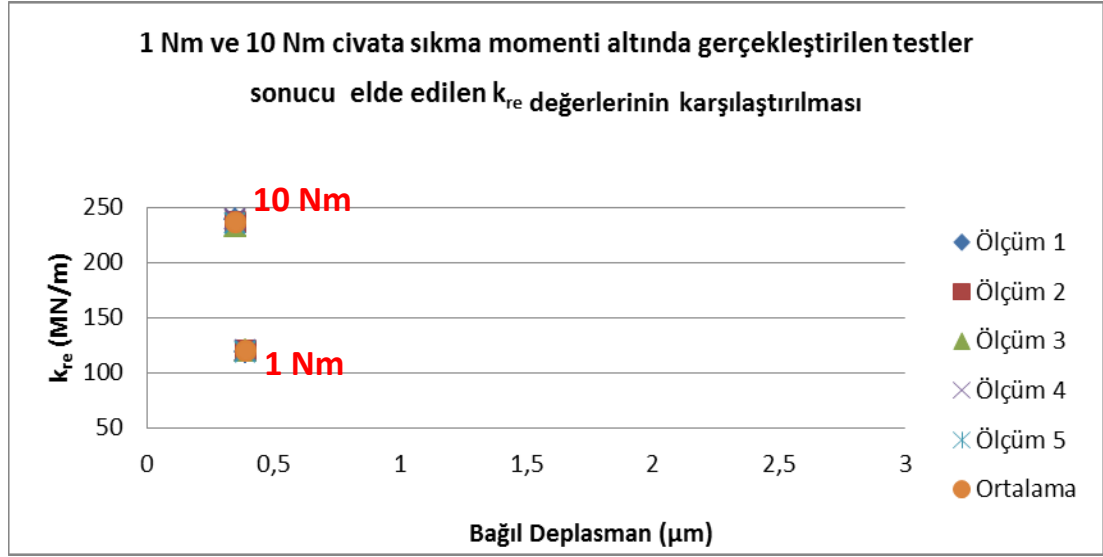
Literatürden bilindiği üzere, iletilen kuvvet – bağıl deplasman yükleme eğrisi Şekil 5.41’de olduğu gibi üç bölgeden meydana gelmektedir. 10 Nm cıvata sıkma momenti altında yeterli bağıl hareket sağlanamadığından, temas yüzeyindeki bağıl hareket elastik bölgede kalmaktadır. Literatürden bilindiği üzere, kuvvet – deplasman yükleme eğrisinin eğimi temas direngenliğini vermektedir. Elastik bölgede iletilen kuvvet-bağıl deplasman ilişkisi lineer olduğundan, eğim yani temas direngenliği değişmemektedir. 10 Nm cıvata sıkma moment altında mevcut sarsıcı ile daha yüksek bağıl genliklerde sistemi sarsmak mümkün olmamıştır.



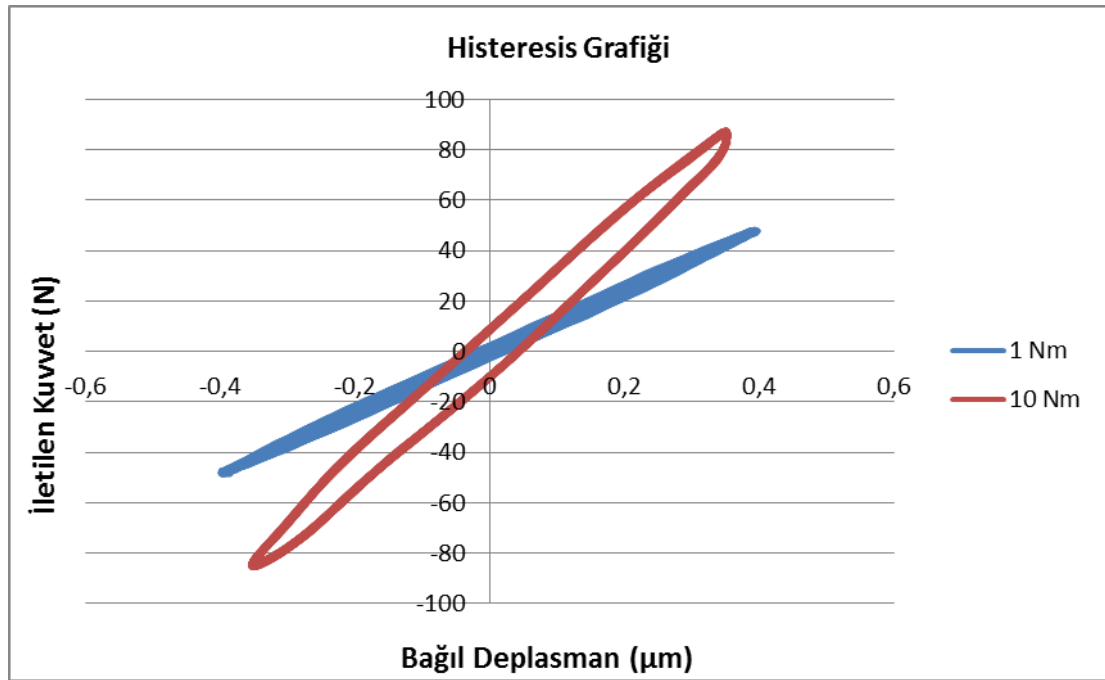
Şekil 5.41 : İletilen kuvvet – bağıl deplasman yükleme eğrisi bölgeleri.

Şekil 5.42’de ise 1 Nm cıvata sıkma momenti altında elde edilen $0.39 \mu\text{m}$ bağıl deplasman ve 10 Nm cıvata sıkma momenti altında elde edilen $0.35 \mu\text{m}$ bağıl deplasman miktarlarına karşılık gelen k_{re} değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Test düzeneği üzerinde daha önce yapılan modal test sonuçlarından bilindiği üzere, temas yüzeyindeki temas direngenliğinin, cıvata sıkma momentinin artırılması ile arttığı böylece tekrar görülmüştür. Daha basit bir şekilde açıklamak gerekirse, cıvata sıkma momenti yani temas yüzeyinde meydana gelen basınç artırıldığında, daha düşük cıvata sıkma momenti altında elde edilen bağıl deplasman değerinin aynısını sağlayabilmek için daha yüksek sarsıcı kuvvet genliği gerekmektedir. Şekil 5.43’de ise, 1 Nm ve 10 Nm cıvata sıkma momenti altında yaklaşık olarak aynı bağıl

deplasman değerlerine sahip ölçümler sonucunda elde edilen histeresis grafiklerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 5.42 : k_{re} değerlerinin civata sıkma momentine göre değişimi (Yaklaşık olarak aynı bağıl deplasman için).

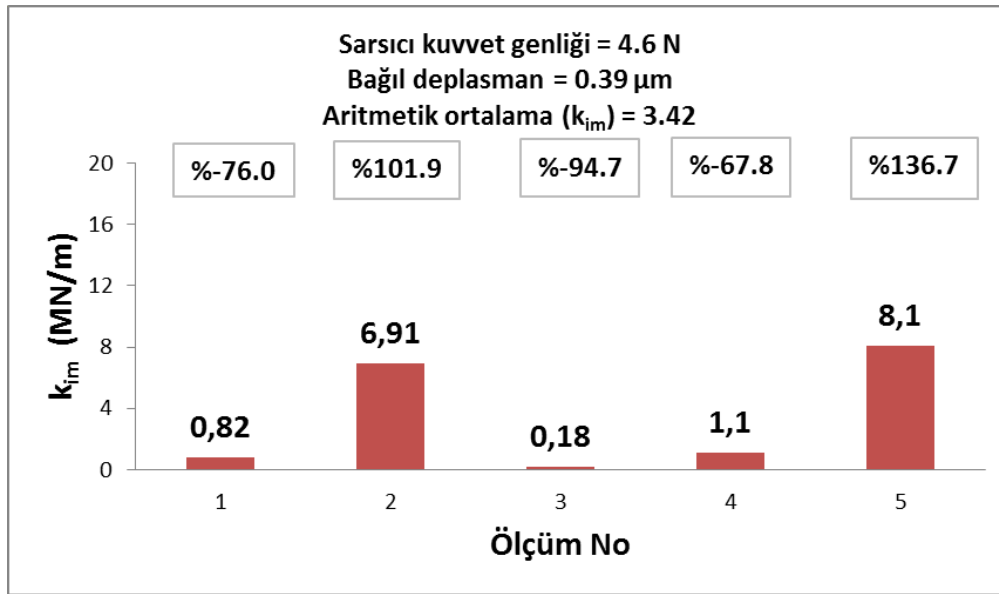


Şekil 5.43 : Histeresis eğrilerinin civata sıkma momentine göre değişimi (Yaklaşık olarak aynı bağıl deplasman için).

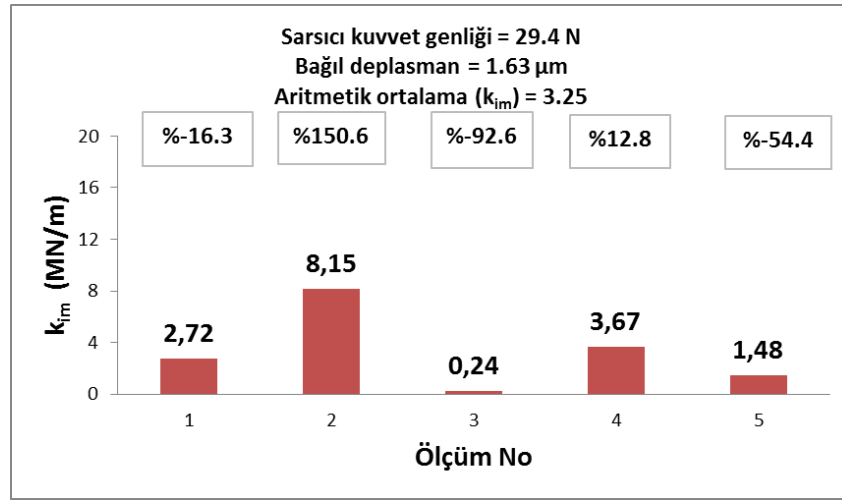
Şekil 5.43 incelendiğinde, yaklaşık olarak aynı bağıl deplasman değerinde daha yüksek civata sıkma momenti kullanılan ölçüm sonucunda elde edilen histeresis grafiğinin beklenildiği gibi daha dik bir eğime sahip olduğu görülmektedir.

Şimdiye kadar elde edilen sonuçlardan, k_{re} yani temas direngenliği değerlerinin, literatürde gerçekleştirilen diğer çalışmaların sonuçları ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Yeterli bağıl deplasmanın elde edilebildiği 1 Nm cıvata sıkma momenti altında gerçekleştirilen test sonuçları incelendiğinde, artan bağıl deplasman ile birlikte temas direngenliği değerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca temas yüzeyinin normal yönündeki kuvvetin artması ile birlikte aynı bağıl deplasman değerinde, temas yüzeyindeki temas direngenliği değerinin arttığı da anlaşılmaktadır.

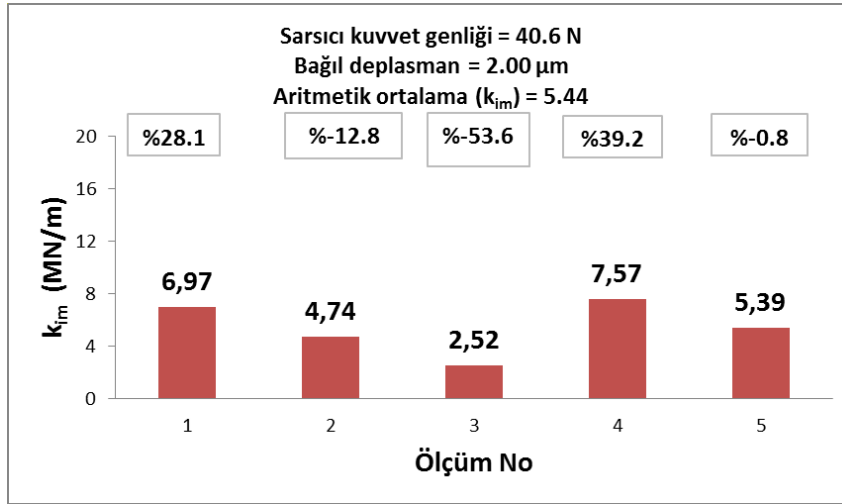
Şekil 5.44 – 5.48’de, 1 Nm cıvata sıkma momenti altında çeşitli sarsıcı kuvvet genlikleri için yapılan 1’er saniyelik ölçümler içerisinde rastgele seçilen 5 farklı periyot sonucu elde edilen k_{im} değerleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, her bir bağıl deplasman değeri için yapılan test sırasındaki farklı ölçümlerden elde edilen k_{im} değerlerinin, ortalama değerlerden %150 mertebelerine varan değerlerde saptığı ve sürtünme sönümü bakımından ölçümlerin tekrarlanabilirliğinin iyi olmadığı görülmektedir. Şekil 5.49’da ise, 1 Nm cıvata sıkma momenti altında k_{im} değerinin bağıl deplasmana göre değişimi görülmektedir.



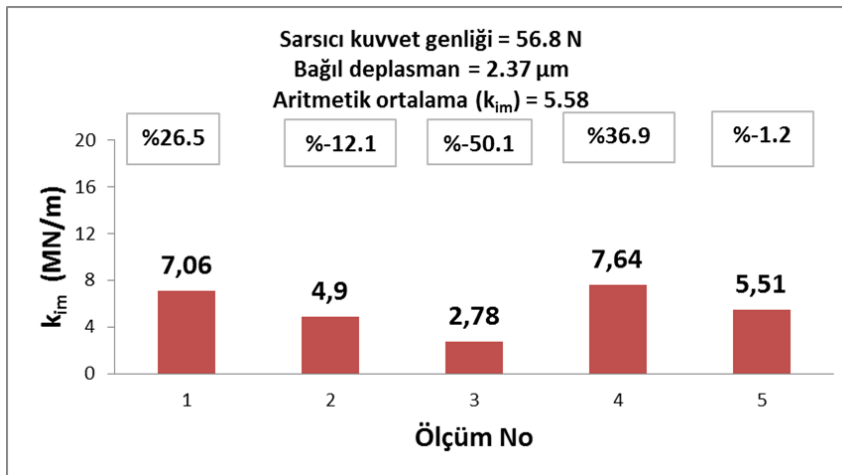
Şekil 5.44 : $F_s=4.6N$, $f_s=940Hz$ ve $\Delta d=0.39\mu m$ için farklı periyotlara ait k_{im} değerleri.



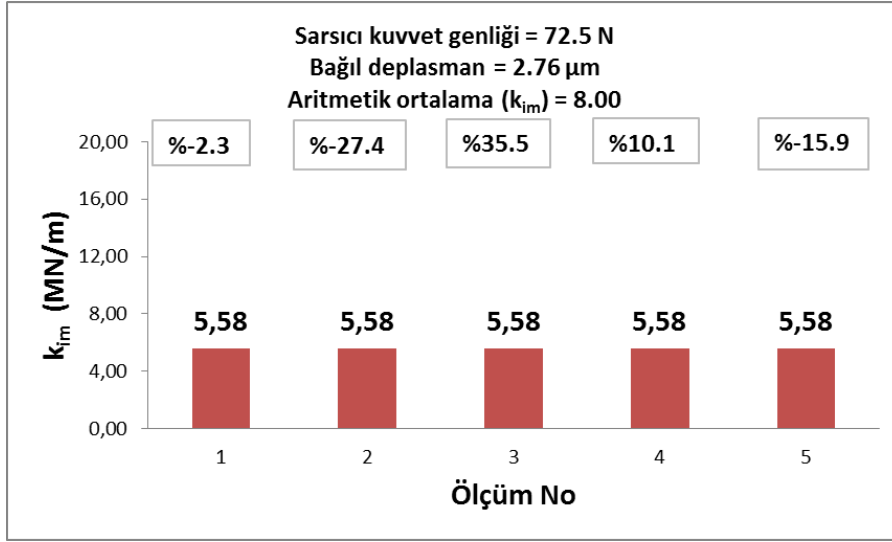
Şekil 5.45 : $F_s=29.4\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=1.63\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{im} değerleri.



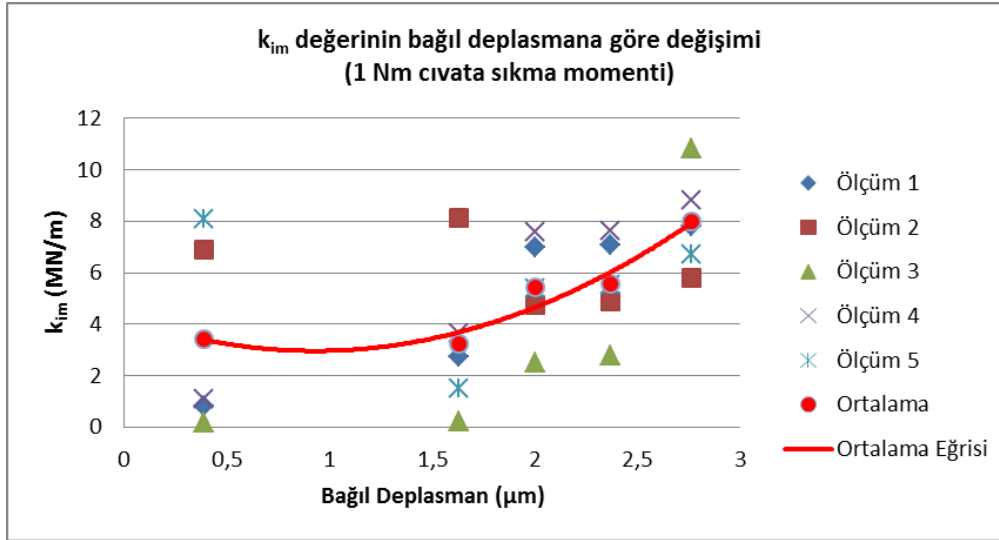
Şekil 5.46 : $F_s=40.6\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.00\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{im} değerleri.



Şekil 5.47 : $F_s=56.8\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.37\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{im} değerleri.



Şekil 5.48 : $F_s=72.5\text{N}$, $f_s=940\text{Hz}$ ve $\Delta d=2.76\mu\text{m}$ için farklı periyotlara ait k_{im} değerleri.



Şekil 5.49 : 1 Nm civata sıkma momenti ve $f_s=940\text{Hz}$ için k_{im} değerlerinin bağıl deplasman ile değişimi.

Şekil 5.49 incelendiğinde temas yüzeyinde meydana gelen sönümü temsil eden k_{im} değerinin, her bir bağıl deplasman değerindeki ortalama k_{im} değerlerinden 2. derece bir polinom geçirildiğinde, bağıl deplasmanın artmasıyla beraber arttığı söylenebilir. Ancak Şekil 5.49'da gözlemlenen bu artışın, sadece karakter olarak yorumlanabilmesi mümkündür. Mevcut deney düzeneği ile sönüm hesabı için güvenilir sonuçlar maalesef elde edilememiştir. Bu nedenle, mevcut test düzeneği ile gerçekleştirilen ölçümlerden temas direngenliği elde edilebilmesine rağmen, burada sunulan yöntemle sürtünme sönümü için pratikte kullanılabilecek, güvenilir sonuçların elde edilemediği anlaşılmaktadır.

6. GENEL DEĞERLENDİRME VE GELECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

6.1 Genel Değerlendirme

Çok elemanlı yapılarda temas yüzeylerinin sayısal olarak modellenmesi, sayısal analiz çalışmalarında daha hassas sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Temas yüzeylerinin doğru şekilde modellenmesi ise ancak kuru sürtünme yüzeylerinde meydana gelen, lineer olmayan davranışın anlaşılması halinde mümkündür. Bu tez çalışması kapsamında öncelikle detaylı bir literatür araştırması yapılmış, temas yüzeylerinde meydana gelen mikro ve makro kayma hareketleri ve bu hareketlerin modellenmesi için yapılan çalışmalar incelenmiştir. Kuru sürtünme yüzeylerinde oluşan temas parametrelerinin (direngenlik ve kuru sürtünme sönümü) deneysel olarak ölçülmesi için yapılan çalışmalar araştırılarak, kullanılan test düzenekleri ve temas parametrelerinin bağlı olduğu faktörler belirlenmiştir. Ürün geliştirme çalışmalarında gerçekleştirilen analiz çalışmalarında, yapıların sahip olduğu malzeme sönümü için daha önceden belirlenmiş empirik sönüm değerleri kullanılmaktadır. Hem gelecekte yapılması planlanan temas yüzeylerinin sayısal modellenmesi çalışmaları, hem de temas yüzeyi modellerinin yer almadığı halihazırda gerçekleştirilen analiz çalışmalarında daha hassas sonuçların elde edilebilmesi amacıyla, bu tez kapsamında motor parçalarının malzeme sönümlerinin deneysel olarak ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple, malzeme sönümü konusunda gerekli temel teorik bilgiler incelenmiştir.

Malzeme sönümünün deneysel olarak hassas bir şekilde ölçülmesi için dikkat edilmesi gereken noktaların belirlenebilmesi amacıyla, ilk olarak motor parçaları yerine basit çubuklar üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda malzeme sönümünün deneysel olarak hassas bir şekilde ölçülmesi sırasında etkili olan parametreler belirlenerek, kullanılması gereken ölçüm cihazlarına karar verilmiştir.

Malzeme sönümünün deneysel olarak ölçülmesi için uygun yöntem elde edildikten sonra, otomotiv parçalarının malzeme sönümleri de bu yöntem kullanılarak hassas bir şekilde ölçülmüştür. Daha sonra gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonucunda, halihazırda kullanılan empirik sönüm değerleri yerine deneysel olarak ölçülen malzeme sönümlerinin kullanılmasının daha hassas sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yapılan kapsamlı literatür araştırması sonucunda, otomotiv alanında karşılaşılan cıvatalı bağlantılardaki temas yüzeylerini en gerçekçi şekilde temsil eden ve temas parametrelerinin pratik bir şekilde ölçülmesine imkan sağlayan test düzeneği belirlenmiştir [30]. Referans alınan test düzeneğinin bu tez kapsamında gerçekleştirilecek deneysel çalışmalara uygun şekilde yorumlanması sonucu, uygun test düzeneği üretilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda, kuru sürtünme yüzeylerinin hareket karakterinin anlaşılmasını sağlayan direngenlik ve kuru sürtünme sönümü değerleri, temas yüzeyini oluşturan yüzeyler arasındaki bağıl deplasmanın bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, temas yüzeyindeki direngenliği temsil eden k_{re} değerinin hassas ve doğru bir şekilde ölçülebildiği ve bağıl deplasman ile değişiminin literatürdeki [4] ile paralel olduğu görülmüştür. Temas yüzeyindeki direngenlik değerinin doğru bir şekilde ölçülebilmeye rağmen, kuru sürtünme sönümünü temsil eden k_{im} değerinin ise hassas bir şekilde ölçülemeyeceği görülmüştür.

Otomotiv sektöründe karşılaşılan cıvatalı bağlantıları gerçekçi olarak temsil edebilmesi ve temas parametrelerinin elde edilmesi için yapılacak ölçümlerin yeteri derecede pratik olması, test düzeneğinin en önemli avantajları arasında yer almaktadır. Ayrıca test düzeneğinde, temas yüzeyini oluşturan ara parçaların değiştirilebilir olması, farklı malzeme ve yüzey kalitelerine sahip yüzeylerin temas parametrelerinin hesaplanmasına olanak sağlar. Temas parametreleri ölçülecek kuru sürtünme yüzeyini oluşturan gerçek parçaları birbirlerine bağlayan cıvataların aynısının kullanılabilir olması da, bu çalışmada kullanılan test düzeneğinin bir başka avantajıdır. Ancak temas yüzeyleri üzerindeki normal kuvvetin cıvata ile sağlanması ve cıvata kuvvetinin belli bir değerin altına düşmesi halinde test düzeneğinin çözülmesi durumu sebebiyle, testler oldukça yüksek normal kuvvet değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu sebepten dolayı, temas parametrelerinin elde edilebileceği bağıl deplasman değerlerini sağlamak amacıyla, yüksek genlikli sarsıcı kuvveti kullanılmıştır. Ayrıca yüksek normal kuvvet ile testlerin gerçekleştirilmek zorunda

kalınmasından dolayı, yeterli bağıl deplasmanın elde edilebildiği yüksek sarsıcı frekanslarında testler gerçekleştirilmiştir. Her iki durumda da test düzeneğinin dinamik davranışının ve dolayısı ile elde edilen temas parametrelerinin etkilenme ihtimali ortaya çıkmıştır. Normal kuvvetin azaltılamaması, temas yüzeyinde makro-kayma hareketinin ortaya çıkmasını sağlayacak yeterli bağıl deplasmanın elde edilememesine neden olmuştur. Böylece makro-kayma durumu bu tez çalışması kapsamında incelenememiştir. Test düzeneğinin serbest koşullarda asılarak sarsıcı tarafından sarsılması sırasında, test düzeneği ve sarsıcının hizalanmasının mümkün olduğu kadar hassas yapılmasına çalışılmıştır. Ancak serbest koşullarda asılmasından dolayı, test düzeneğinin dinamik davranışının bu durumdan da bir miktar etkilendiği ve özellikle sönüm değerlerindeki başarısızlığın sebeplerinden birinin bu durum olduğu düşünülmektedir.

6.2 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Temas parametrelerinin daha doğru ve hassas ölçülebilmesi için test düzeneğinin yukarıda belirtilen dezavantajlarının ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu sebeple, otomotiv alanındaki cıvatalı bağlantıların daha gerçekçi olarak temsil edilmesine rağmen, temas yüzeyleri üzerindeki normal kuvvetin cıvata yerine ölü ağırlıklar kullanılarak sağlanması, daha hassas sonuçlar alınmasına yardımcı olabilir. Böylece küçük sarsıcı kuvvetleri kullanılarak, temas parametrelerinin hesaplanabileceği histeresis grafikleri elde edilebilecek ve hatta makro-kayma durumu incelenebilecektir. Bağıl deplasmanın hesaplanması sırasında, ivme değerinden deplasman değerine geçişte yapılan sayısal entegral işleminin negatif etkilerinin ortadan kaldırılması ve bağıl deplasmanın daha hassas ölçülmesi amacıyla, temas yüzeylerinden bir tanesinin hareket ettiği ve hareketli tarafın gerçekleştirdiği deplasmanın yani bağıl deplasmanın lazer titreşimölçer ile ölçülebildiği bir test düzeneği daha hassas sonuçlar verebilir. Bunların dışında test düzeneği ve sarsıcı arasındaki hizalamanın daha sağlıklı yapılabileceği test düzenekleri incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Beards, C.F.** (1985). Damping in Structural Joints. Shock Vib. Dig., 17 (11), pp 17-20
- [2] **Beards, C.F.** (1989). Damping in Structural Joints. Shock Vib. Dig., 21 (4), pp 3-5
- [3] **Padmanabhan, K.K. ve Murty, A. S. R.** (1991). Damping in Structural Joints Subjected to Tangential Loads. Proc Instn Mech Engrs., Vol 205 , pp 121-129
- [4] **Şanlıtürk, K. Y. , Imregun, M. ve Ewins, D. J.** (1997). Harmonic Balance Vibration Analysis of Turbine Blades with Friction Dampers. ASME, J. Vibration and Acoustics. 119, pp 96-103
- [5] **Şanlıtürk, K. Y. ve Ewins, D. J.** (1995). Modelling Two - Dimensional Friction Contact and Its Application Using Harmonic Balance Method. Journal of Sound and Vibration. 193 (2), pp 511-523
- [6] **Şanlıtürk, K. Y. , Ewins, D. J. ve Stanbridge, A. B.** (2011). Underplatform Dampers for Turbine Blades: Theoretical Modeling, Analysis and Comparison with Experimental Data. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Vol 123 , pp 919-929
- [7] **Beards, C.** (1995). Structural Vibration Analysis and Damping
- [8] **Liu, W.** (2008). Experimental and Analytical Estimation of Damping in Beams and Plates with Damping Treatments, (doktora tezi), University of Kansas School of Engineering
- [9] **Ferri, A. A. ve Bindemann, A. C.** (1992). Damping and Vibration of Beams with Various Types of Frictional Support Conditions. ASME, Journal of Vibration and Acoustics. Vol 114, pp 289-296
- [10] **Stanbridge, A. B., Ewins, D. J., Şanlıtürk, K. Y. ve Ferreire, J. V.** (2001). Experimental Investigation of Dry Friction Damping and Cubic Stiffness Non-Linearity. Proceedings of the ASME Design Technical Conference, DETC2001/VIB
- [11] **Caughey, T. K.** (1960). Sinusoidal Excitation of a System with Bilinear Hysteresis. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Applied Mechanics. 27, pp 640-643
- [12] **Sinha, A. ve Griffin, J. H.** (1984). Effects of Static Friction on the Forced Response of Frictionally Damped Turbine Blades. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 106, pp 65-59
- [13] **Wang, J. H. ve Chen, W. K.** (1993). Investigation of the Vibration of a Blade with Friction Damper by HBM. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 115, pp 294-299
- [14] **Menq, C. H. ve Griffin, J. H.** (1985). A Comparison of Transient and Steady State Finite Element Analyses of the Forced Response of a Frictionally Damped Beam. Transactions of the American Society of

- Mechanical Engineers, Journal of Vibration, Acoustic Stress and Reliability in Design. 107, pp 19-25
- [15] **Griffin, J. H.** (1980). Friction Damping of Resonant Stresses in Gas Turbines Airfoils. ASME Journal of Engineering for Power. Vol 102 , No. 2 , pp 329-333
- [16] **Chen, W. K. ve Sinha, A.** (1990). Probabilistic Method to Compute the Optimal Slip Load for a Mistuned Bladed Disk Assembly With Friction Dampers. ASME Journal of Vibration and Acoustics. Vol 112 , pp 214-221
- [17] **Menq, C. H., Bielak, J. ve Griffin, J. H.** (1986). The Influence of Microslip on Vibratory Response, PART 1: New Microslip Model. Journal of Sound and Vibration. 107 (2) , pp 279-293
- [18] **Rogers, P. F. ve Boothroyd, G.** (1975). Damping at Metallic Interfaces Subjected to Oscillating Tangential Loads. J. Manuf. Sci. Eng. 97(3), pp 1087-1093
- [19] **Burdekin, M., Cowley, A. ve Back, N.** (1978). An Elastic Mechanism for the Micro-Sliding Characteristics Between Contacting Machined Surfaces. Journal of Mechanical Science. Vol 20, No 3, pp 121-127
- [20] **Şanlıtürk, K. Y. , Stanbridge, A. B. ve Ewins, D. J.** (1995). Friction Dampers: Measurement, Modelling and Application to Blade Vibration Control. Design Engineering Technical Conferences. Vol 3, Part B , pp 1377-1382
- [21] **Şanlıtürk, K. Y., Ewins, D. J., Elliot, R. ve Green, J. S.** (2001). Friction Damper Optimization: Simulation of Rainbow Tests. ASME Journal of the Engineering for Gas Turbines and Power, Vol 123, No 4, pp 930-939
- [22] **Griffin, J. H. ve Menq, C. H.** (1991). Friction Damping of Circular Motion and Its Implications to Vibration Control. Journal of Vibration and Acoustics. Vol 113, pp 225-229
- [23] **Menq, C. H., Chidamparam, P. ve Griffin, J. H.** (1991).Friction Damping of Two-Dimensional Motion and Its Application in Vibration Control. Journal of Sound and Vibration. 144 (3), pp 427-447
- [24] **Yang, B. D., Chu, M. L. ve Menq, C. H.** (1997). Stick-Slip Separation Anaşysis and Non-Linear Stiffness and Damping Characterization of Friction Contacts Having Variable Normal Loads . Journal of Sound and Vibration. 201, pp 461-481
- [25] **Yang, B. D. ve Menq, C. H.** (1998). Characterization of 3D Contact Kinematics and Prediction of Resonant Response of Structures Having 3D Frictional Constraint . Journal of Sound and Vibration. 217 (5), pp 909-925
- [26] **Liu, Y., Xu, Z., Gu, W. Ve Chen, D.** (2010). Three Dimensional Friction Contact Model and Its Application in Nonlinear Vibration Analysis of Shrouded Blades . Proocedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, İstanbul/Turkey
- [27] **Rogers, P. F. ve Boothroyd, G.** (1975). Damping at Metallic Interfaces Subjected to Oscillating Tangential Loads. Journal of Engineering for Industry. pp 1087-1094

- [28] Padmanabhan, K. K. ve Murty, A. S. R.** (1991). Damping in Structural Joints Subjected to Tangential Loads. Proc Instn Mech Engrs Vol 205, pp 121-129
- [29] Ni, J. ve Zhu, Z.** (2001). Experimental Study of Tangential Micro Deflection of Interface of Machined Surfaces. Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol 123, pp 365-367
- [30] Bograd, S., Schmidt, A. ve Gaul, L.** (2008). Joint Damping Prediction by Thin Layer Elements
- [31] Schwingshackl, C. W., Petrov, E. P. ve Ewins, D. J.** (2010). Validation of Test Rig Measurements and Prediction Tools for Friction Interface Modelling. Proceedings of ASME Expo 2010: Power for Land, Sea and Air

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Murat Can TÜZEL

Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul-1984

E-Posta : mctuzel@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü