İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VİSKOELASTİK MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU VE VİSKOELASTİK MALZEMELİ YAPILARIN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Sait ÖZER

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Dinamiği Titreşim ve Akustiği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VİSKOELASTİK MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU VE VİSKOELASTİK MALZEMELİ YAPILARIN MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Sait ÖZER
(503111405)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Dinamiği Titreşim ve Akustiği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **503111405** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet Sait Özer** , ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"VİSKOELASTİK MALZEMELERİN KAREKTERİZASYONU VE VİSKOELASTİK MALZEMELİ YAPILARIN MODELLENMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Vahit MERMERTAŞ** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İpek BAŞDOĞAN .....
Koç Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2014**

Savunma Tarihi : **29 Mayıs 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Öncelikle öğrettikleri, yol göstericiliği ve öğütleri için danışmanım Prof. Dr. Kenan Y. Şanlıtürk'e şükranlarımı sunmak isterim. Tez süresince bana her zaman destek olan, sorunların üstesinden gelmeme yardım eden MEF Üniversitesi öğretim üyesi Y.Doç. Dr. Hasan Körük'e destekleri için ne kadar teşekkür etsem azdır.

Deneyler sırasında kullandığım malzemelerin tedariği konusunda destek olan CATSİS firmasından Sn. Ahmet Şevik'e, Matçelik firmasından Sn. Mustafa Kaya'ya ilgileri için ayrıca teşekkür ederim.

Sevgili arkadaşlarım Y. Müh. Alper T. Çelebi, Y. Müh. Esra İçer'e, Anıl Uzal ve Burak Tüzüner'e destekleri için teşekkürlerimi sunuyorum. Oda arkadaşım Y.Müh Sinem Öztürk'e keyifli bir çalışma ortamını paylaştığı ve desteği için minnettarım. En sıkıntılı dönemlerimde dahi bana her daim neşe katan ve destek olan Cemre Şahinkaya'ya teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemi sağlayan, desteklerini her zaman hissettiğim sevgili annem Tülay Özer ve babam Nafiz Özer'e sevgilerimi ve şükranlarımı sunuyorum, son teşekkürlerimi biricik kardeşim Gül'e gönderiyorum.

Mayıs 2014

Mehmet Sait Özer

Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Araştırması 2
2. TEORİK ALTYAPI **7**
2.1 Titreşim Sönümleme 7
2.1.1 Sönümsüz sistemler 7
2.1.2 Viskoz sönümlü sistemler 9
2.1.3 Yapısal sönümlü sistemler 10
2.2 Viskoelastik Malzemeler 12
2.2.1 Sönüm malzemelerinin davranış karakterizasyonu 13
2.2.1.1 Standart lineer model 13
2.2.1.2 Genelleştirilmiş standart model 15
2.2.1.3 Karmaşık modül 17
2.2.2 Viskoelastik malzemelere çevresel faktörlerin etkileri 21
2.2.2.1 Sıcaklığın etkisi 21
2.2.2.2 Frekansın etkisi 23
2.2.2.3 Çevrimsel dinamik birim şekil değiştirmenin etkisi 24
2.2.2.4 Statik ön yüklemenin etkisi 24
2.2.2.5 Diğer çevresel faktörler 24
3. VİSKOELASTİK MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ **25**
3.1 Giriş 25
3.1.1 Oberst Kiriş Yöntemi 25
3.1.1.1 Numune yapılandırmaları 25
3.1.1.2 Tedbirler 27
3.1.1.3 Malzeme özelliklerinin Oberst Kiriş Yöntemi ile hesaplaması 28
3.1.2 Tek serbest dereceli sistemlerin analizi 32
3.1.2.1 Yarı Güç (Tepe Seçim) Yöntemi 33
3.1.2.2 Daire Uyduma Yöntemi 34
3.1.2.3 Ters FTF ve Çizgi Uydurma Yöntemi 39
4. VİSKOELASTİK MALZEMELERİN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU **45**
4.1 Çıplak Kirişin Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi 47
4.2 Birinci Sönüm Malzemesinin Sönüm Özelliklerinin Belirlenmesi 50
4.2.1 Tek taraftan sönümlü numune 50
4.2.2 Çift taraftan sönümlü numune 54
4.2.3 Sandviç numuneler 56
4.3 İkinci Sönüm Malzemesin Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi 60
4.3.1 Tek taraftan sönümlü numune ölçümleri 60

4.3.2 Sandviç numuneler 63
4.4 Deney Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi 66
4.4.1 Frekans çözünürlüğünün etkileri 66
4.4.2 Analiz metodunun etkisi 69
4.4.3 Manyetik tahrik altındaki uzunluğun etkisi 71
4.5 Malzeme Özelliklerinin Hesaplanması 73
5. VİSKOELASTİK MALZEMELİ YAPILARIN MODELLENMESİ 83
5.1 Vizkoelastik Sönüm Malzemeli Sonlu Eleman Modeli 83
5.2 Modal Testler 89
5.3 Deneysel Sonuçlar ile Sonlu Elemanlar Sonuçlarının Karşılaştırması 92
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 99
6.1 Değerlendirmeler 99
6.2 İleride Yapılabilecek Çalışmalar 100
KAYNAKLAR 103
EKLER 107
ÖZGEÇMİŞ 111

KISALTMALAR

BSD1	**:** Birinci Sönüm Malzemesiyle Hazırlanan Çift Taraftan Sönümlü Numune
CF	**:** Daire Uydurma Yöntemi
CL1	**:** Birinci Sönüm Malzemesiyle Hazırlanan Birinci Sandviç Numune
CL2	**:** Birinci Sönüm Malzemesiyle Hazırlanan İkinci Sandviç Numune
CL4	**:** İkinci Sönüm Malzemesiyle Hazırlanan Sandviç Numune
FL1	**:** Birinci Sönüm Malzemesiyle Hazırlanan Tek Taraftan Sönümlü Birinci Numune
FL2	**:** Birinci Sönüm Malzemesiyle Hazırlanan Tek Taraftan Sönümlü İkinci Numune
FL7	**:** İkinci Sönüm Malzemesiyle Hazırlanan Tek Taraftan Sönümlü Numune
FTF	**:** Frekans Tepki Fonksiyonu
HP	**:** Yarı Güç Yöntemi
KÖY	**:** Karmaşık Özdeğer Yöntemi
LF	**:** Çizgi Uydurma Yöntemi
MBŞEY	**:** Modal Birim Şekil Değiştirme Enerjisi Yöntemi
OKY	: Oberst Kiriş Yöntemi
TSD	**:** Tek Serbest Dereceli Sistem

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Çıplak kiriş boyutları ve kütlesi……..... 47
Çizelge 4.2 : Çıplak kirişin Δf=1.25Hz için doğal frekans ve sönüm değerleri.... 49
Çizelge 4.3 : Çıplak kirişin Δf=0.625 Hz için doğal frekans ve sönüm değerleri. 49
Çizelge 4.4 : Çıplak kirişin Δf=0.3125 Hz için doğal frekans ve sönüm değerleri.....49
Çizelge 4.5 : FL1'in Δf=2.5 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..... 52
Çizelge 4.6 : FL1'in Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..…….....52
Çizelge 4.7 : FL1'in Δf=0.625 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..….....52
Çizelge 4.8 : FL1'in Δf=0.3125 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..……..... 53
Çizelge 4.9 : FL2'in Δf=2.5 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri…….....53
Çizelge 4.10 : FL2'in Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..…….....53
Çizelge 4.11 : FL2'in Δf=0.625 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..….....53
Çizelge 4.12 : FL2'in Δf=0.3125 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri…….....53
Çizelge 4.13 : BSD1'in Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri…...…….....55
Çizelge 4.14 : BSD1'in Δf=0.625 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri…...…….....55
Çizelge 4.15 : BSD1'in Δf=0.3125 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri…...…….....55
Çizelge 4.16 : CL1'in Δf=2.5 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri…….....57
Çizelge 4.17 : CL1'in Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri…….....57
Çizelge 4.18 : CL1'in Δf=0.625 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..…….....58
Çizelge 4.19 : CL1'in Δf=0.3125 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..…….58
Çizelge 4.20 : CL2'in Δf=2.5 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri…….....58
Çizelge 4.21 : CL2'in Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..…..58
Çizelge 4.22 : CL2'in Δf=0.625 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..…..59
Çizelge 4.23 : CL2'in Δf=0.3125 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri…….....59
Çizelge 4.24 : FL7'nin Δf=5.0 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri…….....61

Çizelge 4.25 : FL7'nin Δf=2.5 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..….. 61
Çizelge 4.26 : FL7'nin Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri……..... 62
Çizelge 4.27 : Çelik kirişin Elastiklik Modülü……..….. 72
Çizelge 4.28 : Birinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 frekans çözünürlüğü ile yapılan test belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri..... 74
Çizelge 4.29 : Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.625 frekans çözünürlüğü ile yapılan test belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri..... 74
Çizelge 4.30 : Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.3125 frekans çözünürlüğü ile yapılan test belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri..... 74
Çizelge 4.31 : Birinci sönüm malzemesinin eğilme yönündeki malzeme özellikleri..... 77
Çizelge 4.32 : Birinci sönüm malzemesinin kayma yönündeki malzeme özellikleri..... 77
Çizelge 4.33 : İkinci sönüm malzemesinin Δf=5 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılan test belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri..... 78
Çizelge 4.34 : İkinci sönüm malzemesinin Δf=2.5 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılan test belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri..... 78
Çizelge 4.35 : İkinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılan test belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri..... 78
Çizelge 4.36 : İkinci sönüm malzemesinin eğilme yönündeki malzeme özellikleri..... 80
Çizelge 5.1 : FL7 numunesinin FINES ile tahmin edilen doğal frekansları ve mod şekilleri..... 86
Çizelge 5.2 : L plakaların geometrik boyutları……..…..... 87
Çizelge 5.3 : Çıplak L plakaların FINES ile tahmin edilen doğal frekansları ve mod şekilleri……..... 88
Çizelge 5.4 : Çıplak kirişin Oberst Kiriş Yöntemi ve FINES yardımıyla belirlenen doğal frekanslar ve kayıp faktörleri..... 92
Çizelge 5.5 : Serbest katmanlı Oberst numunesinin deneysel olarak ve FINES yardımıyla belirlenen doğal frekanslar ve kayıp faktörleri……..... 93
Çizelge 5.6 : Çıplak L plakanın deneysel ve FINES ile belirlenen doğal frekanslar ve kayıp faktörleri……...……...….... 94
Çizelge 5.7 : Serbest katmanlı L plakanın deneysel ve FINES ile belirlenen doğal frekanslar ve kayıp faktörleri……..…..... 95
Çizelge 5.8 : Kısıtlı katmanlı L plakanın deneysel ve FINES ile bulunan doğal frekanslar ve kayıp faktörleri…….……..….. 96

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Oberst Kiriş Yöntemi düzeneği. ... 2
Şekil 2.1: Tek serbestlik dereceli sönümsüz zorlanmış titreşim modeli. ... 7
Şekil 2.2: Viskoz Sönümlü zorlanmış titreşim modeli. ... 9
Şekil 2.3: Yapısal sönümlü zorlanmış titreşim modeli. ... 11
Şekil 2.4: Histerisis çevrimi [34]. ... 18
Şekil 2.5: Sıcaklığın viskoelastik malzemeler üzerindeki etkisi [34]. ... 22
Şekil 2.6: Frekansın viskoelastik malzemelere etkisi [34]. ... 23
Şekil 3.1: Deney numuneleri [17] ... 26
Şekil 3.2: Yarı güç yönteminin bilgisayar uygulaması. ... 34
Şekil 3.3: Nyquist Grafiği [33]. ... 36
Şekil 3.4: Daire uydurma yönteminin bilgisayar uygulaması. ... 39
Şekil 3.5: Çizgi uydurma yönteminin bilgisayar uygulaması. ... 44
Şekil 4.1: Deneyde kullanılan test düzeneği. ... 45
Şekil 4.2: Oberst kiriş yönteminde test edilen numuneler. ... 46
Şekil 4.3: Çıplak numunenin Δf=0.3125 kullanılarak ölçülen FTFsi. ... 48
Şekil 4.4: Çıplak kirişin Δf=0.3125 Hz kullanılarak tekrarlanabilirlik testi. ... 48
Şekil 4.5: Çıplak kirişin farklı çözünürlükteki FTFleri. ... 48
Şekil 4.6: Çıplak kirişin 6. modunda frekans çözünürlüğünün etkisi. ... 49
Şekil 4.7: FL1 ile FL2'in Δf=0.3125 Hz'deki FTF'si ... 50
Şekil 4.8: Tek taraftan sönümlü numuneler içim Δf=0.3125 Hz'deki tekrarlanabilirlik ... 51
Şekil 4.9: FL1 ve FL2 farklı çözünürlükteki FTF'ler ... 52
Şekil 4.10: İki taraftan sönümlü numunenin Δf=0.3125 Hz çözünürlükteki FTF'si. 55
Şekil 4.11: BSD1'in Δf=0.3125 Hz çözünürlükteki tekrarlanabilirliği. ... 55
Şekil 4.12: BSD1'in Δf=0.3125 Hz, Δf=0.625 Hz ve Δf=1.25 Hz çözünürlükteki FTF'leri ... 55
Şekil 4.13: Sandviç yapıların Δf=0.3125 Hz'deki FTFsi ... 57
Şekil 4.14: Sandviç yapıların farklı çözünürlükteki FTF'leri. ... 57
Şekil 4.15: CL2'nin altıncı moduna yakından bakış. ... 58
Şekil 4.16: İkinci sönüm malzemesiyle hazırlanan tek taraftan sönümlü numune (FL7) için Δf=0.3125 Hz çözünürlüğüyle elde edilen FTF. ... 61
Şekil 4.17: FL7 için Δf=0.3125 Hz tekrarlanabilirlik testi. ... 61
Şekil 4.18: FL7'nin 5 frekans için FTF'leri. ... 61
Şekil 4.19: FL7'nin farklı frekans çözünürlüklerinde FTFlere yakın bakış. ... 62
Şekil 4.20: CL4 için Δf=0.3125 Hz'deki FTF. ... 63
Şekil 4.21: CL4'ün farklı frekans çözünürlüklerindeki FTF'leri. ... 63
Şekil 4.22: CL4 ve CL5 in Δf=0.3125 Hz'deki FTF'leri. ... 64
Şekil 4.23: CL4 için manyetik etki altındaki uzunluk arttırıldığında FTF'ler. ... 64
Şekil 4.24: CL4 ve CL5 in manyetik etki uzunluk arttırıldığında çıkrığında Δf=2.0 Hz çönürlükteki FTF'leri. ... 65
Şekil 4.25: CL4 için manyetik etki altındaki uzunluk maksimumken Δf=2.0 ve Δf=0.250 iken FTFler. ... 65
Şekil 4.26: CL5 için algılayıcı iki farklı konumdayken elde edilen FTFler. ... 66
Şekil 4.27: Çıplak kiriş için frekans çözünürlüğünün kayıp faktörü üzerindeki etkisi. ... 67

Şekil 4.28: Tek taraftan sönümlü numunler için frekans çözünürlüğü etkilerinin incelenmesi. 68
Şekil 4.29: Çift taraftan sönümlü numune için frekans çözünürlüğü etkisi. 68
Şekil 4.30: Sandviç yapıların frekans çözünürlüğü etkilerinin incelenmesi. 69
Şekil 4.31: Çıplak kiriş için yöntem grafikleri. 69
Şekil 4.32: Çift taraftan sönümlü numune için yöntem grafikleri. 70
Şekil 4.33: Çıplak kirişin Δf/f e karşılık kayıp faktörü grafiği. 70
Şekil 4.34: BSD1'in Δf/f e karşılık kayıp faktörü grafiği. 70
Şekil 4.35: Çıplak kiriş ve sönüm malzemeleriyle hazırlanan numunelerin belirlenen doğal frekansları. 71
Şekil 4.36: Çıplak kiriş ve sönüm malzemeleriyle hazırlanan numunelerin belirlenen kayıp faktörleri. 72
Şekil 4.37: Birinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri. 75
Şekil 4.38: Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.625 frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri. 75
Şekil 4.39: Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.3125 frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri. 75
Şekil 4.40: Birinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri. 76
Şekil 4.41: Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.625 frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri. 76
Şekil 4.42: Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.3125 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri. 76
Şekil 4.43: İkinci sönüm malzemesinin Δf=5 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri. 78
Şekil 4.44: İkinci sönüm malzemesinin Δf=2.5 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri. 79
Şekil 4.45: İkinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri. 79
Şekil 4.46: İkinci sönüm malzemesinin Δf=5 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri. 79
Şekil 4.47: İkinci sönüm malzemesinin Δf=2.5 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri. 80
Şekil 4.48: İkinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri. 80
Şekil 5.1: Modal teste tabi tutulan L plakalar. 89
Şekil 5.2: Modal test düzeneği. 90
Şekil 5.3: Pulse Programı yardımıyla modal test. 90
Şekil 5.4: Levhalar için seçilen sekiz noktadan elde edilen FTF'ler. 91
Şekil 5.5: Çıplak kirişin Oberst Kiriş Yöntemi ve Fines ile belirlenen doğal frekans ve kayıp faktörleri. 92
Şekil 5.6: FL7 numunesinin OKY ve FINES ile belirlenen doğal frekans ve kayıp faktörü değerlerinin karşılaştırılması. 93
Şekil 5.7: Yalın L plakanın modal test ve FINES ile belirlenen doğal frekans ve kayıp faktörleri arasındaki farklar. 94
Şekil 5.8: Catsis sönüm malzemesinin yama olarak yapıştırıldığı L plakanın deneysel ve FINES ile belirlenen özelliklerinin karşılaştırılması. 96
Şekil 5.9: Catsis sönüm malzemesiyle sandviç olarak yapıştırılan yamalı L plakanın deneysel ve FINES ile belirlenen özelliklerinin karşılaştırılması. 97

VİSKOELASTİK MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU VE VİSKOELASTİK MALZEMELİ YAPILARIN MODELLENMESİ

ÖZET

Çoğu zaman arzu edilmeyen titreşim, makina mühendislerinin başlıca problemlerinden biridir. Makinaların düzgün çalışması, kullanıcıya ve çevreye konfor sağlaması için genellikle makinalardan kaynaklanan titreşim ve gürültünün ortadan kaldırılması arzu edilmektedir. Ancak çoğu zaman titreşimleri ortadan tamamen kaldırmak mümkün olmamakta, rezonans genliklerini azaltabilmek için sönüm malzemeleri sıkça kullanılmaktadır. Sönüm malzemeleri çeşitli mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olabilir. Doğru uygulama ve kullanım şartları için sönüm malzemelerinin özelliklerinin iyi bilinmesine ve tasarım yapılırken incelenecek modellere iyi şekilde yansıtılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında çeşitli sönüm malzemelerinin farklı yapısal uygulamalar üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk olarak tezin amacı özetlenmiş ve literatürde var olan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. İkinci sırada titreşim hareketi ve sönüme dair teorik bilgiler, daha sonra sönüm özelliği yüksek viskoelastik malzemelerin dinamik davranışı hakkında bilgiler sunulmuştur. Devamında tek serbestlik dereceli sistemlerde titreşim parametrelerinin nasıl belirlendiği açıklanmıştır. Analiz metodları olan Yarı-güç, Daire uydurma ve Çizgi uydurma yöntemleri açıklanmış, daha sonra sönüm malzemesi özelliklerini belirlemek için sıkça kullanılan bir yöntem olan Oberst kiriş yöntemi anlatılmış, dikkat edilmesi gereken tedbirler ve malzeme özelliklerine dair hesaplamalar verilmiştir. İki farklı sönüm malzemesinin karakterizasyonuna yönelik olarak çalışmalar yapılmış, tek tarafı sönüm malzemeli çubuk, çift tarafı sönüm malzemeli çubuk ve iki metal çubuk arasına sönüm malzemesi konularak oluşturulan numuneler için çeşitli frekans çözünürlüklerinde ölçümler yapılmıştır. Daha sonra bu ölçümlerden üç farklı analiz yöntemiyle elde edilen değerler sonuç olarak verilmiştir. Buna ek olarak, sönüm parametrelerinin değerlerini belirlerken frekans çözünürlüğünün etkisi, modal analiz yönteminin etkisi ve manyetik tahrik altındaki uzunluğun etkisi incelenmiştir. Numuneler için en uygun değerler seçilerek, sönüm malzemelerinin özellikleri hesaplanmıştır. Daha sonra bu malzemelere sahip yapıların sonlu elemanlar yardımıyla modellenmesi yapılmıştır. Öncelikle Oberst test düzeneğinde test edilen yapılar modellenerek eldeki deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonrasında, biraz daha karmaşık geometriye sahip L şeklinde plakalar üzerine sönüm malzemesi yapıştırılarak elde edilen yapılar için Modal Test yapılmış, elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar ile oluşturulan model sonuçlarıyla mukayese edilmiştir. Son olarak bu tez çalışması sonucunda ulaşılan sonuçlar bulgular değerlendirilmiş tezin çıkarımlarından bahsedilmiştir. Gelecekte yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

CHARACTERIZATION OF VISCOELASTIC MATERIALS AND MODELLING STRUCTRUES INCLUDE VISCOELASTIC MATERIAL

SUMMARY

Vibration, which is unwanted oscillations in many applications, is one of the main problems for mechanical engineering. For quiet and comfortable operations of many machines, it is desirable to eliminate vibrations. However, it is not quite possible to avoid the structural vibrations completely even though damping treatments are used to reduce structure bourne vibrations in many applications. Different damping materials have different mechanical and physical properties. It is essential that appropriate material should be chosen for individual applications for maximum benefit. For many damping applications, viscoelastic materials are used in practice. Yet, determination of the elastic and damping properties of these materials is quite difficult in the sense that the identified results may contain high degree of uncertainty. One of the aims of the this thesis is to identify material properties with high level of accuracy. It is also aimed to model structures with viscoelastic materials so as to estimate the dynamic behavior of such structures.

First, literature survey is given about published work on characterisation of viscoelastic materials as well as composites that have viscoelastic materials. After that, the theoretical background for basic mechanical vibration is given. Single degree of freedom system, which is the simplest vibration model, is considered and the theoretical formulations for free- and forced-vibrations of undamped and damped (viscous and hysteretic) systems are summarized. Then, some information about the behaviors of viscoelastic materials are presented. The models which are used for representation of the charactics of damping materials are summarized, including the models called Standard Linear Model and Generalized Standard Model. As explained, one of the best way of describing the elastic and damping properties of viscoelastic materials is the use of complex modulus approach. Hysteresis loops, energy dissipation, relation between moduli and relation between harmonic and transient response are described. Furthermore, the effects of environmental factors such as temperature, frequency, cyclic dynamic strain, static preloading, etc. on damping materials are explained.

Estimation of the properties of viscoelastic materials is one of the main subjects of this thesis and the classical method named as Oberst Beam Method is used for this purpose. The characterization of viscoelastic materials using the Oberst Beam Method based on non-contact excitation and response measurements is revisited in this study. At the beginning of third chapter, specimen preperations including bare beams, one side damped (free-layered) beams, both side damped (free-layered) and sandwich (constrained layered) beams are explained. Precautions are given and formulations that are used for determining material properties are presented. After that, analysis methods including half-power, circle-fit and line-fit methods are summarized. Experiments are then run for the characterization of two types of viscoelastic materials using random excitation within a frequency range up to 2.0

kHz. The length of test samples is selected as suggested by relevant standards. The length of the beam section exposed to the electromagnetic field is selected based on the recommendations presented in previous studies. The most approriate test parameters, such as windowing, averaging, minimising electromagnetic effects etc, are chosen so as to minimise the noise level in the signal and to get the most reliable measurements. In order to determine other signal processing parameters such as frequency resolution, the method of system identification and the effect of the specimen length in magnetic excitation, a large number of FRFs are measured using several samples under various conditions. For the first damping material, a steel beam, two 'identical' one-sided (free-layered) damped beams, a both-sided (free-layered) damped beam and a few sandwiched (constrained-layered) beams are tested. For the second damping material, a one-sided beam and two sandwiched beams are tested. The FRF measurements are conducted at several frequency resolutions. The so called half-power, circle-fit and line-fit methods are used to extract the modal parameters from measured FRFs. Once the suitable frequency resolution and analyzing method is chosen, the effects of magnetic excitation are determined. Three sets of FRF measurements at each frequency resolution are conducted for each test sample. The individual sets of FRFs are analyzed using the aforementioned three methods. The effect of frequency resolution is found to be very critical when damping levels are to be identified. Therefore, the effects of frequency resolution and the modal analysis method on identified modal loss factors are investigated in detail. Overall, the average values of the modal loss factors of a bare (steel) beam, one-sided damped beam, a both-sided damped beam and sandwiched beam are determined by analysing the measured FRFs using three modal analysis methods for several frequency resolution values. It is noted that, in general, higher loss factors are obtained when the frequency resolution values are higher (coarser). It is also found that the stiffening effect of magnetic excitation affects the natural frequencies, however it does not change the modal loss factors. The natural frequencies increase as the length in magnetic excitation increases. It is also noted that the adverse effect of magnetic excitation decreases as the mode number increases.

After the investigations for making reliable FRF measurements, optimum parameters are selected and the natural frequencies and modal loss factors determined from measured FRFs of the beams are used for identification of the material properties. Young's modulus and damping levels (loss factors) of the damping materials corresponding to the individual vibration modes are then extracted from free-layered specimens. In a similar way, shear modulus and damping levels of the damping materials are extracted from constrained layered specimen. It is found that the obtaining the material properties using free-layered specimens is relatively easier and more reliable than doing so for constrained layered specimen. The last part of the thesis, chapter 5, deals with modelling and analysing structures with viscoelastic materials. Finite element (FE) approach is used for this purpose, and as software, FINES and ABAQUS programs are used. Firstly, models for specimens tested in Oberst Beam Method are developed. For representing more complex structures, various L-shapes plates including bare plate, free layered patch plate and constrained layered patch plate are modelled using FINES and ABAQUS. For validation of the FE results, L-shaped plates are also created and modal tests are performed on them with modal hammer and accelerometer in order to get experimental modal parameters. Once modal test results are obtained, comparisons are made between FE and experimental results. It is seen that there is a good correlation between FE and test results for bare and free-layered specimens. However, the correlation for the

constrained layered case is found to be poor. Finally results are discussed and some conclusion are made. Also some suggestions are made for future studies.

1. GİRİŞ

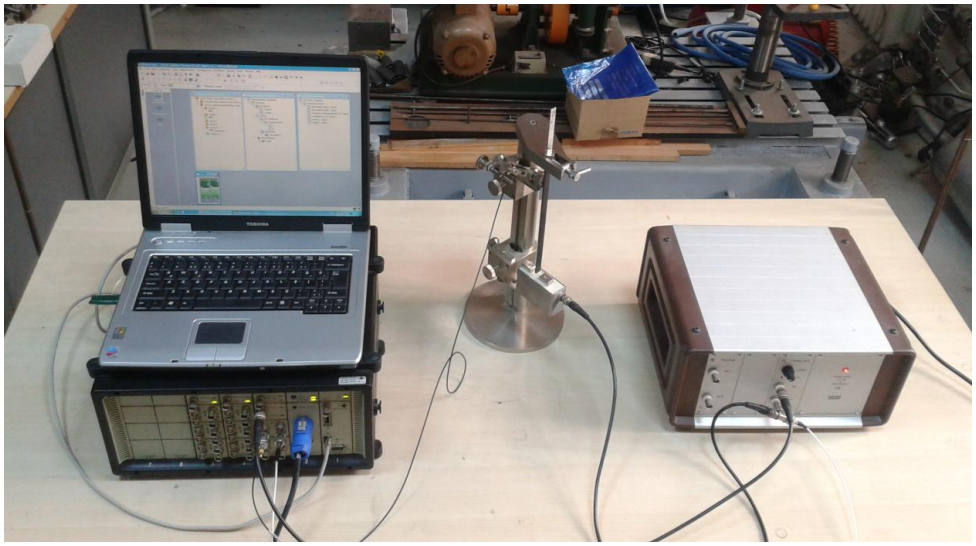
Mekanik sistemlerde sönüm, birçok durumda arzulanan bir özelliktir. Bu özellik sistemlerin daha sessiz ve düzgün çalışmalarına olanak sağlamaktadır. Sistemlerin sönüm karakterini iyileştirmek ya da sönüm eklemek için çeşitli yöntemler vardır. Sistemler tasarlanırken titreşim hareketleri düşünülerek uygun malzemeler ve yapılar seçilebilir ya da sonradan sisteme yapılacak eklemeler ile sönüm sağlanabilir. Yay ve damper ekleme, ya da yüzeysel kaplamalar bu amaçlarla kullanılabilir. İstenilen özellikleri oluşturmak için farklı malzeme gruplarının bir araya getirilmesiyle yapılan kompozitler tarihin eski zamanlarından beri kullanılmaktadır. Kerpiç evlerden havacılık sektörüne kadar uygulamaları bulunan kompozit titreşim azaltma amacıyla da tercih edilmektedir. Levha tipli yapıların katmanlı olarak bir araya getirilmesiyle elde edilen kompozit yapılar özellikle hareket taşımayacak parçaların üretiminde sönüm amacıyla tercih edilmektedir. Sönüm sağlayan katmanlar lastiksi yapılı viskoelastik malzemelerden oluşturulmaktadır. Viskoelastik malzemeler farklı koşullarda farklı mekanik özellikler göstermektedirler.

1.1 Tezin Amacı

Viskoelastik malzemeler endüstride sıkça kullanılmakta; ancak çoğu zaman bu malzemeleri kullanan yapılar güvenilir bir şekilde modellenememekte ve sönüm açısından optimize edilememektedir. Bunun ana nedeni, hem viskoelastik malzemelerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinin kolay olmaması, hem de viskoelastik malzemeli yapıların modellenmesinin ve analizlerinin zorluğudur. Mekanik özellikler sıcaklık ve frekansa bağlı olarak değişmesinin yanında ölçüm yöntemlerine göre de farklılık gösterebilmektedir. Bu tezin amacı, Oberst kiriş yöntemi ile güvenilir ölçüm yapabilmek için ölçüm parametrelerini incelemek, çeşitli numuneler kullanarak viskoelastik malzemelerin özelliklerini hassas bir şekilde ölçmek ve buna ilave olarak viskoelastik malzemeli yapıların sonlu elemanlar metodu ile modellerini oluşturup bu modelleri deneysel verilerle doğrulamaktır.

1.2 Literatür Araştırması

Geniş uygulama alanlarına sahip olan yüzey sönüm uygulamalarıyla ilgili pek çok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Dinamik yük altındaki kompozit yapıların titreşim ve sönüm karakteristiğini belirlemekte yaygın olarak kullanılan Oberst Kiriş Yöntemi (OKY) 1952 senesinde H. Oberst tarafından geliştirilmiştir [1]. Oberst bu çalışmasında serbest katmanlı sönüm uygulamaları için bir dizi eşitlik ortaya koymuştur. Oberst tarafından önerilen yoldan ilerleyerek Ross ve diğerleri [2], Gross[3], Edward[4] ve DiTaranto [5] Oberst Kiriş Yöntemi ile çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Oberst yöntemi standartlaştırılan yapıların (ASTM E 756-05), manyetik olarak tahrik edilerek, yapacağı titreşimleri temassız olarak ölçülmesine dayanmaktadır. Giriş ve çıkış olarak ölçülen sinyallerin (sırasıyla sarsma kuvveti ve titreşim hızı) arasındaki frekans tepki fonksiyonlarını hesaplanır [6]. Bu fonksiyonların tepe yaptığı noktalar doğal frekans değerlerini vermektedir. Sürekli sistemlerde sonsuz sayıda doğal frekans olduğundan, uygulamalarda daha önceden belirlenen frekans aralığıyla ilgilenilir. Sistemlerin çalışması bakımından, düşük doğal frekansları (ilk doğal frekansları) daha kritik olduğu için, bu modlar etrafındaki titreşim ve sönüm karakteristiğinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Metaller , kaplamalar, seramikler, lastikler, plastikler, güçlendirilmiş epoksi matrisleri ve ahşaplar gibi çeşitli malzemelerin test edilmesinde genellikle tercih edilmektedir. Aşağıda Oberst Kiriş Yöntemi'nin düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Oberst Kiriş Yöntemi düzeneği.

OKY için yapıya temas eden algılayıcılar ve sarsıcılar tercih edilmez. Bu cihazlar yapıya kütle eklemekte, sönümü değiştirmekte ve ölçüm kalitesini azaltmaktadır [7]. Bu sebeple temassız titreşim algılayıcıları ve temassız tahrik edici sistemlerin kullanımı literatürde şiddetle önerilmektedir [6,7,8]. Manyetik olarak uyarılamayacak kirişlerin kullanımı halinde, kirişlere ferro manyetik parçacıklar yapıştırmak gerekmektedir. Bu sayede elektromanyetik sarsıcılar kullanılabilir.

Koruk ve Şanlıtürk [9,10,11] yaptıkları çalışmada çıplak ve serbest sönüm uygulamaları kullanmış, temassız sarsıcının elektromanyetik etkisini ölçmüş ve modellemiştir. Koruk ve Şanlıtürk [10] ayrıca temassız sarsıcının elektromanyetik etkisini azaltmaya yönelik önerilerde bulunmuş ve tüm test konfigürasyonlarına uygulanabilecek bir metot önermişlerdir.

OKY sık olarak kullanılan klasik bir yöntem olmasıyla beraber bazı eksikliklere sahiptir. Bu eksiklikler bazı çalışmalarda incelenmiş [7,8] ve yeni modifiye Obesrt yöntemleri ortaya konmuştur. Wojtowicki ve diğerleri [7] yaptıkları çalışmada ölçümün hassasiyetini arttırmayı hedeflemişlerdir. Klasik Oberst kirişinin boyunu iki katına çıkarıp, ortadan tahrik ederek. Bir ucu ankastre bir ucu serbest sınır koşullarına sahip kiriş modeli elde etmişlerdir. Yapılan analiz merkezden etkiyen hızı ivme ölçer ile ve belirlenen başka bir noktanın hızını lazerli titreşim ölçer ile ölçerek, bu ikisi arasındaki frekans tepki fonksiyonunu belirlemeye dayanmaktadır. Deney numunesini bağladıkları kökü elektrodinamik sarsıcı ile tahrik eden Martinez-Agirre ve Elejabarrieta uç titreşimlerini lazer titreşim ölçer ile ölçerek sonlu elemanlar analiziyle karşılaştırmışlar ve ortaya bir ters yöntem koymuşlardır. Bu yöntem ile malzeme özelliklerinin sadece rezonans frekanslarında değil bütün ilgilenen bant genişliğinde hesaplanmasını sağlamışlardır [12].

Viskoelastik malzemelerle oluşturulmuş yapılar literatürde çeşitli yükleme koşulları altında farklı testlere tabi tutulmuştur. Wang ve Chen viskoelastik çekirdekli üç katmanlı silindirik yapıların titreşim ve sönümlerini incelemişlerdir [13].

Kristensen ve diğerleri yaptıkları numerik çalışmayla katmanların kalınlık değişimlerini ve sandviç yapılar oluştururken viskoelastik katmanların aralıklı yapıştırılmasının etkisini incelemişlerdir[14]. Lepoittevin ve Kress viskoelastik katmanlarda kesikli bir yapı oluşturarak sönümü optimize etmeye çalışmışlardır[15].

Kompozit yapıların dinamik davranışlarını tahmin etmek, titreşim esnasındaki lineer olmayan ilişkiler ve malzemelerin lineer olmayan özellikleri sebebiyle çok zordur [16,17]. Ancak belirli uygun koşullar altında, iyi bir yakınlık ile deneysel olarak sönüm değerleri belirlenebilmektedir [18]. Her düşünülen yapısal tasarım için, fiziksel model oluşturmak, emek ve maliyet bakımından uygulanabilir olmayacağından, bilgisayar ortamında uygulamada kullanılacak şekli öngörülerek gerçeğine uygun modeller yaratmak ve tasarımları değiştirmek tercih edilmektedir. Böyle çoğu durumda Sonlu Elemanlar yöntemleri kullanılmaktadır. Günümüzde sıkça uygulanan bu yöntem ile de viskoelastik sönümlü yapıların titreşim karakteristiği incelenmiştir. Sönüm modellemede genellikle kullanılan üç yöntem mevcuttur. Bunlar; Doğrudan Frekans Tepki Fonksiyonu (Direct Frequency Response Function) ; Modal Birim Şekil Değiştirme Enerjisi Yöntemi (Modal Strain Energy Method), Karmaşık Özdeğer Yöntemi (Complex Eigen Value Method)'dir.

Doğrudan Frekans Tepki Fonksiyonu (DFTF) yönteminde Frekans Tepki Fonksiyonları (FTF) matrisleri dinamik katılık matrisinin tersini alarak elde edilir. Daha sonra sönüm değerlerine bu FTF'lerini analiz ederek ulaşılır. DFTF hesaplama zamanı ve FTF matrisleri hesabı gerekmesi bakımından masraflı bir yöntemdir. Rastogri [19] kendi makalesinde DFTF yönteminin ve modal frekans cevabının FE programında analiziyle kabiliyet ve limitlerini incelemiştir.

Modal Birim Şekil Değiştirme Enerjisi Yöntemi (MBŞEY)'de gerçek sistemin özdeğer problemi çözülmez. Onun yerine, Normal Modal Analiz denilen yöntem sönümsüz sistem için uygulanarak, Modal sönüm seviyelerini bulmak için her mod şekli için birim şekil değiştirme oranları hesaplanır. Bu süreçte sönümlü sistemin mod şekillerinin sönümsüz sistem ile aynı olacağı kabulü yapılır. Karmaşık yapıları modellemek için kullanılabilse de, MBŞEY'nin yaptığı kabuller sebebiyle genel kullanımı kısıtlanmaktadır.

Karmaşık Özdeğer Yöntemi (KÖY)- KÖY'de karmaşık özdeğer problemi hiç bir basitleştirme kabulü yapılmaksızın çözülmelidir. KÖY yapıların sönüm seviyelerinin tahmini için bir yaklaşım olarak bilinse de pratikte uygulamaları kısıtlıdır[20,21].

Literatüre göre yapıların sönüm değerleri ya MBŞEY yöntemleriyle ya da yapıya özel geliştirilen formüllerle bulunmuştur [18,22,23]. Rao [22] Modal strain enerji metodunu FE yaklaşımı ile beraber , basit mesnetlenmiş sönümlü kirişlerin modal

parametrelerini bulmak için kullanmıştır. Zhang ve Chen [23] Kompozit yapıların modal kayıp faktörlerini bulmak için MBŞEY den esinlenerek sonlu eleman stratejisi geliştirmişlerdir. Cortes ve Elejabarrieta [24] Eğilen kirişlerin yapısal titreşimlerini incelemek için homojen bir model geliştirerek eğilme katılığını elde etmişlerdir. Moreira ve Rodrigues [25] Komposit plakaların dinamik cevaplarını simüle etmek için bir model geliştirmişlerdir. Plagianakos ve Saravanos [26] Kıvrık kompozit kabuk yapıların modal sönüm ve doğal frekanslarını belirlemek için, kayıp faktörleri enerji dağılım yöntemi ile hesaplarken, sonlu eleman temeliyle bir formül geliştirmişlerdir.

Xie ve Shepard Jr. Yaptıkları çalışmayla sandviç yapıdaki elamanları tek bir eleman gibi modellemeye çalışmışlar, bunun yanında bir çok sonlu eleman modelinde ihmal edilen viskoelastik yapının eksenel etkilerini de göz önüne almışlardır [27]. Katmanlı sönüm elemanlarının yama olarak kullanıldığı, akustik olarak uyarılan levhaların titreşimleri üzerine çalışan Castel ve diğerleri 2 boyutlu eleman kullanmış ve karmaşık güç dağılımlarını incelemişlerdir [28]. Amichi ve Atalla, viskoelastik çekirdek katman için Timoshenko hipotezini kullanarak, elastik katmanlar için Euler-Bernoulli hipotezini kullanarak ve yapının ucunu, viskoelastik çekirdeğin enine kaymasının dönme etkisini içerecek şekilde modifiye ederek üç boyutlu sonlu eleman geliştirmişlerdir [29]. Kumar ve Singh piezoelektrik katmanlı uygulamalar için, parametrik değişimler altında aktif ve pasif katmanların yapıların titreşimleri üzerindeki etkilerini MSE teorisine göre bir sonlu eleman geliştirerek incelemişler ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır [30].

Yama olarak kısıtlı katmanlı viskoelastik malzemelerin kullanımı artmakta ve davranışları akademik çevreler tarafından incelenmektedir. Zheng ve diğerleri yama olarak uygulanan kısıtlı yüzey sönümü uygulamalarında çift modların karakteristiğini incelemek için optimizasyon yöntemlerini karşılaştırmışlardır [31]. Yamalı uygulamalar hakkındaki bir başka çalışmada Granger ve Ross, tahrikin geçici ilk kısmının etkilerini araştırmak için, kayma modülünü Prony serileri ile modellemiş, yapısal parametreleri değiştirerek elde ettikleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır [32].

2. TEORİK ALTYAPI

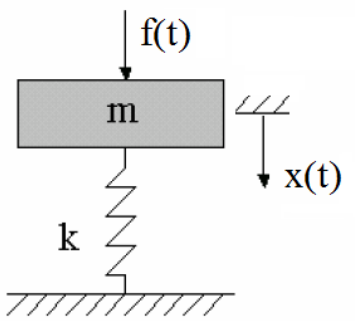
2.1 Titreşim Sönümleme

Titreşim, makine mühendisliğinin konu edindiği hemen her yerde ortaya çıkan bir problemdir. İstenmeyen titreşimlerin giderilmesi; sistemin düzgün çalışması, hasarları önleme, ömür uzatma katkılarının yanı sıra kullanıcıya ve çevreye konfor sağlama gibi yararlara sahiptir. Titreşim hareketini sönümleyebilmek için öncelikle titreşim hareketini anlamak gerekmektedir. Bunun için en basit sistemler tek serbest dereceli (TSD) olarak modellenen sistemlerdir. Basitliğine rağmen bir çok sistemin davranışının incelenmesine tek serbestlik dereceli model kullanılabilir. Daha karmaşık çok serbestlik dereceli sistemler uygun süper pozisyon ilkeleriyle tek serbestlik dereceli sistemlerin süper pozisyonu şeklinde ifade edilebilirler. Aşağıdaki üç farklı TSD sistem ele alınacaktır:

- Sönümsüz
- Viskoz sönümlü
- Histerik (ya da yapısal) sönümlü

2.1.1 Sönümsüz sistemler

Şekil 2.1'de görülen sistemde m kütle, k yay sertliğidir. f(t) ve x(t) zamana bağlı kuvvet ve yer değiştirmedir. İlk olarak dış kuvvet olmaması (f(t)=0) durumu göz önüne alınsın.



Şekil 2.1: Tek serbestlik dereceli sönümsüz zorlanmış titreşim modeli.

Bu sönümsüz serbest titreşim sisteminin hareket denklemi aşağıdaki gibi olur:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \tag{2.1}$$

Çözüm için $x = Xe^{i\omega t}$ önerilirse ;

$$(-m\omega^2 + k)Xe^{i\omega t} = 0 \tag{2.2}$$

olur dolayısı $(k - \omega^2 m) = 0$ olması gerekir.

Bu eşitliğin tek bir çözümü vardır, çözüm sistemin tek doğal frekansıdır ve

$$\overline{\omega}_0 = \sqrt{k/m} \tag{2.3}$$

olur.

Dışarıdan harmonik bir $f(t) = Fe^{i\omega t}$ etkidiği düşünülür, çözümün yine $x = Xe^{i\omega t}$ formunda olacağı öngörülürse, hareket denklemi:

$$(k - m\omega^2)Xe^{i\omega t} = Fe^{i\omega t} \tag{2.4}$$

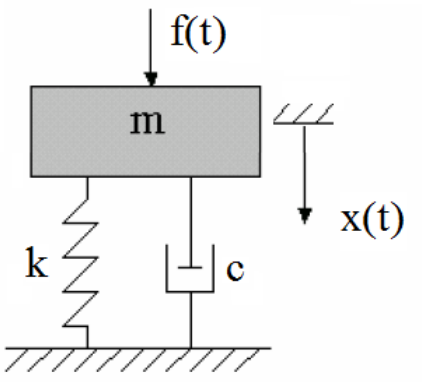
olur. Buradaki X ve F karmaşık değerler olup hem genlik hem faz ifadesini içerirler. Sistemin tepki modeli girişin çıkışa oranı şeklinde;

$$\alpha(\omega) = \frac{X}{F} = \frac{1}{\left(k - m\omega^2\right)} \tag{2.5}$$

tanımlanabilir. Frekansa göre, sistemin tepkisinin tahrik kuvvetine oranına; Frekans Tepki Fonksiyonu (FTF) denir. FTF'nin yukarıda olduğu gibi yer değiştirmeye göre olanına Reseptans (Esneklik) adı verilir. FTF'lerin bu formu dış kuvvetten(tahrik kuvvetinden) bağımsızdır.

2.1.2 Viskoz sönümlü sistemler

Viskoz sönümlü serbest titreşim sisteminin bir modeli aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.2: Viskoz Sönümlü zorlanmış titreşim modeli.

tek serbestlik dereceli modeli aşağıdaki hareket denklemiyle kurulabilir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \tag{2.6}$$

Bu denklemin çözümü için daha genel bir ifade olan $x = Xe^{st}$ seçilsin. Buradaki s kompeks bir terimdir. Çözümün varlığı için

$$\left(ms^2 + cs + k\right) = 0 \tag{2.7}$$

olmalıdır. Burada s:

$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{\sqrt{c^2 - 4km}}{2m} = -\bar{\omega}_0 \xi \pm i\bar{\omega}_0 \sqrt{1-\xi^2} \tag{2.8}$$

ve

$$\bar{\omega}_0 = \sqrt{k/m} \quad ; \quad \xi = \frac{c}{c_0} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \tag{2.9}$$

Böylece modal çözüm aşağıdaki gibi olur:

$$x = Xe^{\varpi_0 \zeta t} e^{i(\varpi_0 \sqrt{1-\zeta^2})t}) t = Xe^{-\alpha t} e^{i\omega_0 ' t} \quad \textbf{(2.10)}$$

Yine harmonik bir $f(t) = Fe^{i\omega t}$ etkidiği düşünülürse, çözümün yine $x = Xe^{i\omega t}$ formunda olacağı öngörülürse, hareket denklemi:

$$\left(-\omega^2 m + i\omega c + k\right) Xe^{i\omega t} = Fe^{i\omega t} \quad \textbf{(2.11)}$$

olur. FTF ise

$$H(\omega) = \alpha(\omega) = \frac{1}{\left(k - \omega^2 m\right) + i\left(\omega c\right)} \quad \textbf{(2.12)}$$

olur. Bu gösterimde hem genlik hem faz açısı değeri mevcuttur.

$$\left|\alpha(\omega)\right| = \frac{1}{\sqrt{\left(k - \omega^2 m\right)^2 + i\left(\omega c\right)^2}} \quad \textbf{(2.13)}$$

$$\angle\alpha(\omega) = \tan^{-1}\left(-\omega c \Big/ \left(k - \omega^2 m\right)\right) \quad \textbf{(2.14)}$$

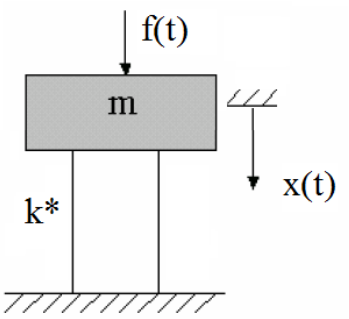
Reseptans frekans ve sönüm oranı kullanılarak boyutsuz değişkenler ile yazılırsa;

$$\left|\alpha(\omega)\right| = \frac{1/k}{\left(1 - \left(\omega/\bar{\omega}_0\right)^2 + 2i\zeta\left(\omega/\bar{\omega}_0\right)\right)} \quad \textbf{(2.15)}$$

2.1.3 Yapısal sönümlü sistemler

Sönümün ayrı bir eleman gibi toplanabildiği sistemlerde yukarıda bahsedilen modeller teoride sıkça kullanılmaktadır. Ancak sönüm karakteri frekansla değişen

sistemler için başka bir formülasyona ihtiyaç duyulmaktadır. Yapısal sönümlü sistemlerin bir modeli aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 2.3: Yapısal sönümlü zorlanmış titreşim modeli.

Yapısal sönümlü sistemlerde karmaşık dinamik direngenlik k* aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$k^* = k_{re} + ik_{im} \tag{2.16}$$

Burada k_{re}; gerçel dinamik direngenlik, k_{im}; sanal dinamik direngenliktir. Tek serbestlik dereceli yapısal sönümlü bir sistem $f(t)$ tahrik kuvvetinin etkisi altındaysa, hareket denklemi:

$$m\ddot{x} + k^* x = f(t) \tag{2.17}$$

olur. Deplasman değişimini yukarıdaki gibi harmonik çözüm kabulüyle;

$$\left(-\omega^2 m + k_{re} + ik_{im}\right) X e^{i\omega t} = F e^{i\omega t} \tag{2.18}$$

şeklinde olur. Resaptans aşağıdaki gibi yazılabilir ;

$$\alpha(\omega) = \frac{X}{F} = \frac{1}{\left(k_{re} - \omega^2 m\right) + ik_{im}} \tag{2.19}$$

ya da

$$\left|\alpha(\omega)\right| = \frac{1/k_{re}}{\left(1 - \left(\omega/\bar{\omega}_0\right)^2 + i\eta\right)} \tag{2.20}$$

Buradaki η yapısal sönüm kayıp faktörüdür ve viskoz modeldeki ξ kritik sönüm katsayısının yapısal sönümlü modeldeki karşılığıdır.

$$\eta = \frac{k_{im}}{k_{re}} \tag{2.21}$$

Ayrıca karmaşık dinamik direngenlik genliği $|k^*|$ aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$|k*| = \sqrt{(k_{re})^2 + (k_{im})^2} = \frac{|F|}{|K|} \tag{2.22}$$

Sönüm malzemelerin dinamik davranışlarında, kullanım nedeni olan sönüm özellikleri baskındır. Sönüm malzemelerinin dinamik davranışları frekansın yanında sıcaklıkla da değiştiğinden viskoz sönümlü model durumu yeterince temsil edememektir. Titreşim mühendisliğinde bu tip malzemeler modellenirken yapısal sönümlü model kullanılır.

2.2 Viskoelastik Malzemeler

Viskoelastik sönüm polimer bazlı ve camsı malzemelerde görülen sönüm karakteridir. Bu yapısal sönüm birçok endüstriyel uygulamaya fırsat sağlamaktadır. Polimerik malzemeler uzun moleküllü zincirlerden oluşmaktadır. Karbon atomları birbirlerine kuvvetli bir şekilde bir araya gelerek dallanırlar, böylece oluşan uzun zincirler bileşim ve polimerin oluşum şekline göre güçlü ve zayıf bağlanırlar. Sönüm polimer ağının deforme olduktan sonra tekrar gevşemesi ve eski haline dönmesiyle oluşur. Malzeme sıcaklığı ve moleküler hareketler sebebiyle frekans etkileri ile sıcaklık etkileri arasında güçlü bir ilişki vardır.

Camlar polimerler gibi uzun ağ yapılar şeklinde oluşmazlar. Onun yerine kısa düzenli uzun karmaşık bir yapıya sahiptirler. Farklı kafes yapılara sahip inorganik oksitlerden oluşan camlar içerdikleri elemanlar ve miktarlarına göre yapı değiştirir. Sönüm yine deformasyon sonucu gevşeme ve toparlanma sürecinde kısa bağların orijinal dağalamı yerine diğer termodinamik eşitlikler sebebiyle görülür. Camlar çapraz bağlı olmadığından, polimerlerde de görülebilecek sürünme (sürekli yük

altında meydana gelen sürekli şekil değiştirme) meydana gelebilir. Öte yandan çapraz bağlı polimerlerde statik katılık çok yüksek olacağından sürünme gerçekleşmez. Uygun düzenlemelerle, polimer malzemeler geniş bir aralıkta istenen frekans ve sıcaklıklar için sönüm, dayanım, dayanıklılık, sürünme direnci, ısıl kararlılık ve diğer istenen malzeme özelliklerini sağlayacak şekilde üretilebilir. Benzer düzenlemeler daha yüksek sıcaklıklarda camlar için yapılabilir. Her durum için belirli keskin malzeme sınırlar mevcuttur, geri dönüşü olmayacak hasara neden olan üst sıcaklık limitleri gibi.

2.2.1 Sönüm malzemelerinin davranış karakterizasyonu

Maddenin akmasını ve şekil değiştirmesini inceleyen bilim dalı Reoloji, sönüm malzemesinin modellenmesinde matematik yaklaşımı mümkün kılmaktadır. Reolojinin önerdiği ilk yöntem atomik bazda molekülerin ilişkileri üzerinden geliştirilern mikroskobik yöntem, ikinci yönlendirme ise mühendislikte daha çok kullanılan, fiziğin görülebilir yönleri hakkındaki teorileri kapsayan makroskobik teoridir. Reolojinin bu teorisi kalıcı süreçlerin termodinamik yasalarını göz önüne alarak hal eşitlikleri oluşturmaktadır, çok genel hali ile aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f\left[D_1(\sigma), D_2(\varepsilon), t, T, \cdot, \cdot\right]=0 \qquad \textbf{(2.23)}$$

Burada f değişkenlerin vektör fonksiyonunu, σ gerilme tensörünü, ε birim şekil değiştirme tensörünü, t zamanı , T sıcaklığı diğer değişkenler ortamın fizikokimyasal özelliklerini ve çevresel koşulları ve D_1 ile D_2 de diferansiyel, integral ya da genellikle nonlineer olan bileşik operatörleri temsil etmektedir. Hareket denklemleri malzemenin davranışını dış etkilere (dış kuvvetler, sıcaklıklar, manyetik alan kimyasal tepkimeler, radyasyon vb) bağlı olarak yaklaşım yapan modellerdir [34].

2.2.1.1 Standart lineer model

En iyi bilinen hareket denklemleri gösterimlerinden biri standart lineer modeldir. Gerilme σ ile birim şekil değiştirme ε arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi vermektedir:

$$\sigma + \alpha \frac{d\sigma}{dt} = E\varepsilon + \beta E \frac{d\varepsilon}{dt} \qquad \textbf{(2.24)}$$

Bu eşitlik Hooke yasasından (σ=Eε) ya da basit sönümleyici-yay kombinasyonundan σ=Eε+Eβ(dε/dt) daha karmaşık bir ilişkiyi göstermektedir. Ancak gerçek malzeme davranışını temsil etmekte biraz zorlanır [34].

Sabit σ_0 gerilmesinin başlangıç halde gerilmesi olmayan malzeme numunesine t=0 anında uygulanması durumunu göze alalım. dσ/dt=0 olacağından :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\varepsilon}{\beta} = \frac{\sigma_0}{\beta E} \qquad \textbf{(2.25)}$$

halini alır. Ve çözümü

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + Ae^{-t/\beta} \qquad \textbf{(2.26)}$$

olur. t=0 da ε=0 başlangıç koşuluyla;

$$A + \frac{\sigma_0}{E} = 0 \qquad \textbf{(2.27)}$$

$$\therefore \varepsilon = \left(\frac{\sigma_0}{E}\right) + (1 - e^{-t/\beta}) \qquad \textbf{(2.28)}$$

Öbür taraftan, başlangıç birim şekil değiştirmesi $\varepsilon=\varepsilon_0$, t=0 anında aniden uygular ve gerilmenin değişimini incelersek, dε/dt=0 olacağından ;

$$\sigma + \alpha \frac{d\sigma}{dt} = E\varepsilon_0 \qquad \textbf{(2.29)}$$

Çözüm ise;

$$\sigma = E\varepsilon_0 + \beta e^{-t/\alpha} \qquad \textbf{(2.30)}$$

olur. t=0 da σ=0 başlangıç koşuluyla

$$\sigma = E\varepsilon_0\left(1-e^{-t/\alpha}\right) \tag{2.31}$$

burada α bilinen gerilme gevşeme katsayısıdır.

Üçüncü olarak, harmonik değişen gerilme ve birim şekil değiştirme uyguladığımızda, $\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t}$ ve $\varepsilon = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$ olacak şekilde

$$\sigma_0 = E\varepsilon_0\left(\frac{1+i\omega\beta}{1+i\omega\alpha}\right) \tag{2.32}$$

ya da

$$\sigma_0 = \left(E' + iE''\right)\varepsilon_0 \tag{2.33}$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$E' = \left(\frac{1+\omega^2\alpha\beta}{1+\omega^2\alpha^2}\right)E \tag{2.34}$$

$$E'' = E\frac{\omega\left(\beta-\alpha\right)}{1+\omega^2\alpha^2} \tag{2.35}$$

Yukarıdaki denklemler gerçek malzeme davranışının bazı özelliklerini yansıtmaktadır. Fakat *E'* ve *E''* nin frekans ile değişimi gerçek polimerik malzemelerde genelde görülebilecek seviyeden çok daha anidir [34].

2.2.1.2 Genelleştirilmiş standart model

Basit haldeki standart formülün kısıtlamaları σ ve ε'nun ek türevlerini aşağıdaki gibi eşitliğe ekleyerek giderilebilir:

$$\sigma + \sum_{n=1}^{\infty}\alpha_n\frac{d^n\sigma}{dt^n} = E\varepsilon + E\sum_{n=1}^{\infty}\beta_n\frac{d^n\varepsilon}{dt^n} \tag{2.36}$$

$\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t}$ ve $\varepsilon = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$ olacak şekilde harmonik cevap:

$$\sigma_0 = \frac{E\varepsilon_0\left[1+\sum_{n=1}^{\infty}\beta_n(i\omega)^2\right]}{\left[1+\sum_{n=1}^{\infty}\alpha_n(i\omega)^2\right]} \quad \textbf{(2.37)}$$

olur, bu da yine **(2.33)** gibi yazılabilir. Buradaki *E'* ve *E''* ω'nın daha da karışık fonksiyonlarıdır. Uygun β_n ve α_n seçimiyle *E'* ve *E''* için ölçülen verilere uyacak şekilde frekansın fonksiyonu olacak şekilde düzenlenebilir. Bu modelin dezavantajı, gerçek malzemenin geniş frekans aralığında yeterli düzeyde modellenebilmesi için çok sayıda terime (örneğin β_n ve α_n değerleri gibi) ihtiyaç duymasıdır. Bu yöntem zahmetlidir; ancak *E'* ve *E''* aşağıdaki halde olunca uğraşılması çok zor olmamaktadır:

$$\frac{E'}{E} = \frac{AC+BD}{C^2+D^2} \quad \textbf{(2.38)}$$

$$\frac{E''}{E} = \frac{BC+AD}{C^2+D^2} \quad \textbf{(2.39)}$$

Burada;

$$A = 1-\beta_2\omega^2+\beta_4\omega^4\ldots i^{2n-2}\beta_{2n-2}\omega^{2n-2} \quad \textbf{(2.40)}$$

$$B = \beta_1\omega-\beta_3\omega^3+\beta_5\omega^5\ldots i^{2n-1}\beta_{2n-1}\omega^{2n-1} \quad \textbf{(2.41)}$$

$$C = 1-\alpha_2\omega^2+\alpha_4\omega^4\ldots i^{2n-2}\alpha_{2n-2}\omega^{2n-2} \quad \textbf{(2.42)}$$

$$D = \alpha_1\omega-\alpha_3\omega^3+\alpha_5\omega^5\ldots i^{2n-1}\alpha_{2n-1}\omega^{2n-1} \quad \textbf{(2.43)}$$

olmaktadır.

2.2.1.3 Karmaşık modül

Yukarıdaki modellerde malzemelerin davranışları için zaman uzayında eşitlikler yazılmıştır. Bu eşitlikleri gerilme-birim şekil değiştirme-zaman ilişkilerini göz önüne alarak gerilme frekans uzayına çevirmek istenirse $e^{i\omega t}$ formunda;

$$\sigma_0 = E^*(\omega)\varepsilon_0 = \left[E'(\omega) + iE''(\omega)\right]\varepsilon_0 \tag{2.44}$$

şeklinde yazılır. Parametreleri belirlemek için deneysel verilere en uygun şekilde seri açılımı yapılır. E' ve E'' yi frekansın birer fonksiyonu olarak bulmak ve sistemlerin daha sonraki cevaplarını tahmin edebilmek için deneylere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntem ile hareket denklemi frekans uzayında tanımlanır ve daha sonra Fourier Dönüşümü ile zaman uzayına aktarılır. Deneysel verileri kullanmanın avantajlı yolu, genelde frekans uzayında olduğundan direk olarak kullanılabilmesidir, dezavantajı ise zaman uzayına dönüşümlerde, genelleştirilmiş türevli gösterimde de uygulanan dönüşüm teorilerinin kullanımını gerektirmesidir. Gerilme ya da birim şekil değiştirme varyasyonlarında $\varepsilon=\varepsilon_0 \sin\omega t$ ya da $\varepsilon=\varepsilon_0 \cos\omega t$ kullanarak eşitlik yeniden düzenlenirse:

$$\sigma_0 = E'\varepsilon + \frac{E''}{|\omega|}\frac{d\varepsilon}{dt} \tag{2.45}$$

şeklini alır ve burada harmonik hareket için $i|\omega|\varepsilon = d\varepsilon/dt$ dir. ω'nın negatif değerleri için $|\omega|$ kullanılmalı aksi takdirde E'' 'nin negatif bulunmaması için dikkat edilmelidir. Birim şekil değiştirme iyi hazırlanmış bir deney sisteminde gözlemlenebilecek $\varepsilon=\varepsilon_0 \sin\omega t$ olursa, ilişkili gerilme σ(t) aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= E'\varepsilon_0 sin\omega t + \frac{E''}{|\omega|}\omega\varepsilon_0 \sin\omega t \\ &= E'\varepsilon_0 sin(\omega t + \varepsilon')\sqrt{1+\eta^2}\end{aligned} \tag{2.46}$$

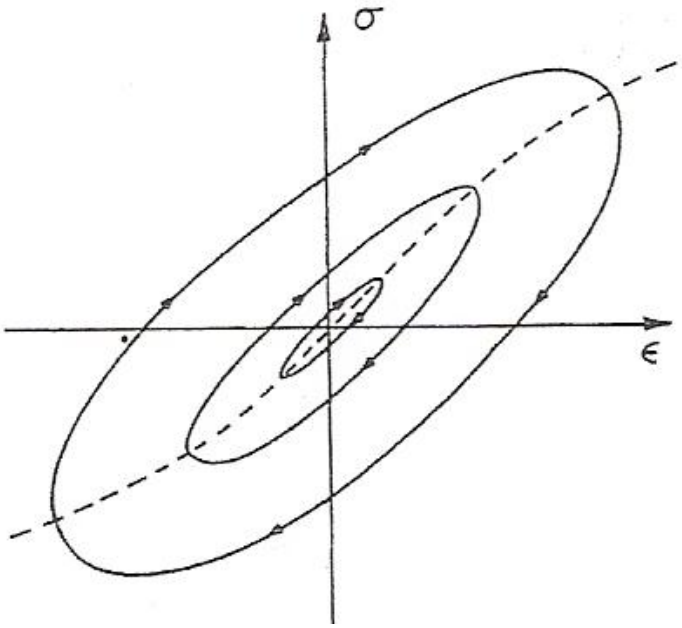
burada $tan\,\varepsilon' = \eta = d\varepsilon/dt = E''/E'$ 'dir. Gerilme birim şekil değiştirme arasındaki ilişki kayıp faktörü η'ya bağlı olan ε' açısına bağlıdır. Bu sonuç karmaşık gösterimle gösterildiğinde direk olarak gözlemlenebilir. Faz gecikmesi gözlemlenebilir ve uygun bir deney ile bulunarak η'nın direkt ölçümünde kullanılabilir.

Histerisis çevrimleri

Bir diğer geçerli yöntem de bütün çevrimler için gerilmeye karşılık birim şekil değiştirme grafiğinin çizilmesidir. Bu grafikler Şekil 2.4'teki gibi eliptik ya da benzer şekiller almaktadır. Bu durum eşitliklerden görülebilir; $\varepsilon=\varepsilon_0 \sin\omega t$ ise $\varepsilon_0 cos\omega t = \pm\varepsilon_0\sqrt{1-sin^2\omega t} = \pm\varepsilon_0\sqrt{1-\varepsilon^2/{\varepsilon_0}^2}$ böylece;

$$\sigma_0 = E'\varepsilon \pm E''\sqrt{\varepsilon_0^2-\varepsilon^2} \qquad \textbf{(2.47)}$$

olur ve "+" ile "-" işareti cosωt nın pozitif ya da negatif değer almasına göre belirlenir. Bu eşitliğin verdiği eliptik grafik uygun bir deney düzeneği ile osilaskopta görülebilir. Elipsin şekli maksimum birim şekil değiştirme ε_0 ile değişmez, kayıp faktörü $\eta=E''/E'$ ile değişir.



Şekil 2.4: Histerisis çevrimi [34].

Enerji disipasyonu

Sönüm malzemesinin birim hacmi için bir çevrimdeki enerji disipasyonu

$$D = \oint \sigma d\varepsilon = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sigma\left(\frac{d\varepsilon}{dx}\right)dt \qquad \textbf{(2.48)}$$

$$= \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \left(E'\varepsilon_0 \sin \omega t + \eta E'\varepsilon_0 \cos \omega t \right) \omega \varepsilon_0 \cos \omega t dt$$

$$= \eta E'\varepsilon_0 \omega \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \cos^2 \omega t dt$$

$$\therefore D = \pi \eta E' {\varepsilon_0}^2$$

$$\therefore D = \pi \eta E' {\varepsilon_0}^2 \quad \textbf{(2.49)}$$

Maksimum depolanan enerji $U = \frac{1}{2} E' {\varepsilon_0}^2$ olduğundan; $\eta = D/2\pi U$ malzemenin sönüm kabiliyeti açısından önemli bir ölçüdür. D'nin yüksek değerleri için , η yüksek olacak ve histerisis çevrimi genişleyecektir.

Klasik elastisite teorisindeki modüllerin ilişkileri, frekans uzayında incelenen viskoelastik malzemeler için, gerçek modüllerin ilişkili karmaşık modülleriyle değerleriyle değiştirmesiyle kullanılabilir. Homojen, izotropik malzemelerin gerilme durumlarını belirlemek için üç tane modüle ihtiyaç vardır, bunlar; Elastisite Modülü, kayma modülü ve bulk modülüdür. Bu üç modül ya da ilişkili ifadeleri; eksenel deformasyon, kayma şekil değiştirmesi ve hacimsel şekil değiştirmeleri temsil eder.

Modüller arasındaki ilişkiler

Eksenel Modül: Karmaşık Elastisite modülü $E^* = E' + iE'' = E'(1 + i\eta_e)$ klasik elastik teorisindeki Elastisite modülünün viskoelastik malzemeler için karşıtıdır. İlk boyu L, genişliği H ilk kesit alanı S olan bir numune boyuna uygulanan kuvvet sonucunda σ_e eksenel gerilmesi kuvvet/alan olarak, birim şekil değiştirmesi ε_e de $\Delta L/L$ olarak tanımlanabilir ve ilişkileri aşağıdaki gibi olur;

$$\sigma_e = E^*(\omega)\varepsilon_e = E'(1 + i\eta_e)\varepsilon_e \quad \textbf{(2.50)}$$

Numunenin kuvvet etkisiyle genişliğindeki azalma $\Delta H = \nu \varepsilon_e H$ şeklinde tanımlanır ve Poission oranı ν karmaşık olabilir. İlişkili hacim değişimi ise;

$$\Delta V = (1 - 2\nu) V \varepsilon_e \quad \textbf{(2.51)}$$

Kayma Modülü: Prizmatik numune için, yük taşıyan alan S ve kalınlığı H, kayma gerilmesi σ_s yük/alan, kayma birim şekil değiştirmesi $\varepsilon_s = \Delta L/L$ olmak üzere

$$\sigma_s = G^*(\omega)\varepsilon_s = G'(1+i\eta_s)\varepsilon_s \tag{2.52}$$

Poisson oranı: G' ve E'arasındaki ilişki klasik elastisite teorisinden;

$$E' = 2(1+\nu)G' \tag{2.53}$$

ve $\eta_e \simeq \eta_s$ dir. ν nin imajinel değerleri çok küçüktür. Yukarıdaki eşitlikten:

$$\nu = \left(\frac{E'}{2G'}\right) - 1 \tag{2.54}$$

olur. Poission oranının frekans ve sıcaklığa bağlı değişimi E' ve G' nin bağımsız ölçümleri ile belirlenebilir. Örneğin elastomerik malzemelerin lastiksi bölgeleri için $\nu \simeq 0.5$ dir ve yaklaşık olarak $E = 3G$ olur. Daha düşük sıcaklıklarda elastomer ya da polimerlerin direngenlikleri daha fazladır, $\nu \simeq 0.33$ olur ve $E \simeq 2.76G$.

Harmonik ve geçici tepkiler arasındaki ilişki

Karmaşık modül yaklaşımını kullanarak, yani E değerini karmaşık modülüyle değiştirerek $E' + iE'', E'(1 + i\eta)$ ya da $k(1 + i\eta)$ koyarak fiziksel durumlar çözülebilir. Buradaki E', E'', η ve k frekansın birer fonksiyonudur. Tek serbestlik dereceli bir sistemin frekans uzayında $F(\omega)$ kuvvetinin neden olduğu $X(\omega)$ cevabı aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$X(\omega) = \frac{F(\omega)}{k(1+i\eta) - m\omega^2} \tag{2.55}$$

$F(\omega)$, zaman uzayındaki $f(t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü olarak düşünülürse;

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t}d\omega \tag{2.56}$$

ve

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \tag{2.57}$$

dönüşüm çiftleri mevcut olur. $f(t) = F\delta(t)$ için

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F\delta(t) e^{-i\omega t} dt = F \tag{2.58}$$

Ters dönüşüm yapılırsa;

$$x(t) = \frac{F}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i\omega t} d\omega}{k(1+i\eta) - m\omega^2} \tag{2.59}$$

Bu integral dinamik davranışın incelenmesi sırasında birçok durum için soruna neden olacaktır. Örneğin η ve k sabit alınırsa x(t) t<0 için mevcut olur ve durum gerçek dışıdır. Öte yandan η ve k ölçülen gerçel numunelerin kayıp faktörleri ve katılık değerleri olup, yukarıdaki denklem sayısal olarak geliştirilirse, var olan problemler ortadan kalkmaktadır. Yukarıdaki eşitlik $k(\omega) = k(-\omega)$ ve $\eta(\omega) = -\eta(-\omega)$ dikkate alınarak sayısal olarak geliştirilirse

$$\frac{x(t)}{F} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\left[k(\omega) - m\omega^2\right] \cos \omega t + k(\omega)\eta(\omega) \sin \omega t}{\left[k(\omega) - m\omega^2\right]^2 + k(\omega)^2 \eta(\omega)^2} \tag{2.60}$$

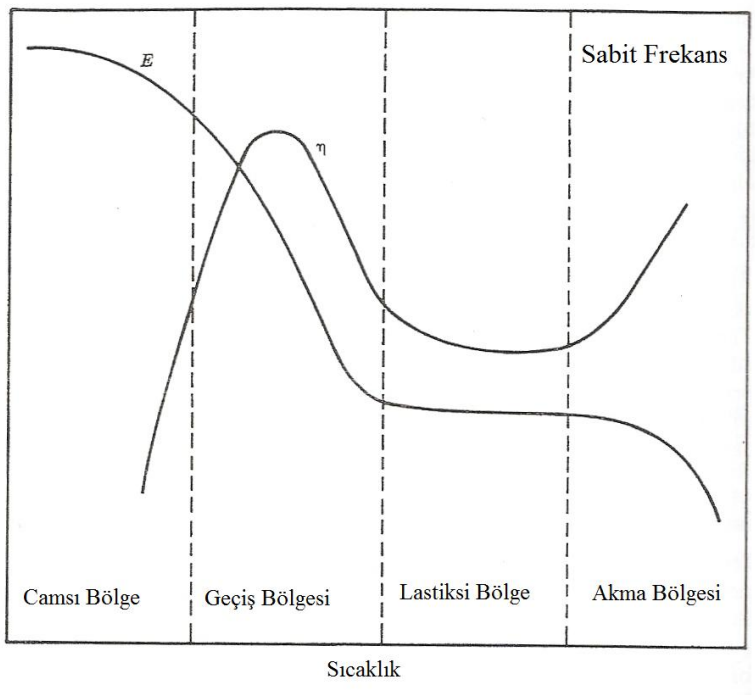
2.2.2 Viskoelastik malzemelere çevresel faktörlerin etkileri

Çevre koşullarına göre sönüm değişimlerinin belirlenmesi, titreşim ve gürültü yalıtımı amacıyla tasarlanan sistemler için büyük bir önem taşımaktadır. Bu özelliklerin cevre koşullarıyla değişimi bir eksiklikten öte tasarım esnekliği sağlamaktadır ve tasarım avantajı olarak görülmeli ve kullanılmalıdır.

2.2.2.1 Sıcaklığın etkisi

Sıcaklık genellikle sönüm malzemesinin özelliklerini etkileyen başlıca değişken olarak görülmektedir. Sıcaklığın etkisi dört ana bölgeye ayrılmış Şekil 2.5'de görülmektedir. İlk bölge camsı bölge olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgede malzeme

depolama modülü bakımından maksimum değerdedir fakat kayıp faktörü çok düşük bir değere sahiptir. Camsı bölgedeki modül sıcaklıkla yavaş değişirken, kayıp faktörü bu bölge için sıcaklık artımıyla hızla yükselmektedir. İkinci bölge sıcaklığın yükselişiyle beraber Elastisite modülü ani bir düşüş eğilimine sahiptir. Kayıp faktörü ise en yüksek değerine ulaşır. Üçüncü bölge olan Lastiksi bölgede hem Elastisite modül hem de kayıp faktörü düşük değerler alır ve sıcaklıkla çok yavaş değişir. Son bölge camsı kaplamalar ve termoplastikler gibi sönüm malzemelerin özelliklerini iyi yansıtan Akma bölgesidir. Bu bölgede malzeme sıcaklıkla beraber yumuşar, erirken ise kayıp faktörü çok yüksek değerler alır. Son bölge sönüm malzemesinin tamamen karakterize edilmesi için gerekli olsa da; istenmeyen fiziksel özellikler ve süreksizlikler sebebiyle tasarım açısından tercih edilmez. Ayrıca çapraz bağları olan polimerler örneğin lastiksi malzemeler için bu bölge görülmez.



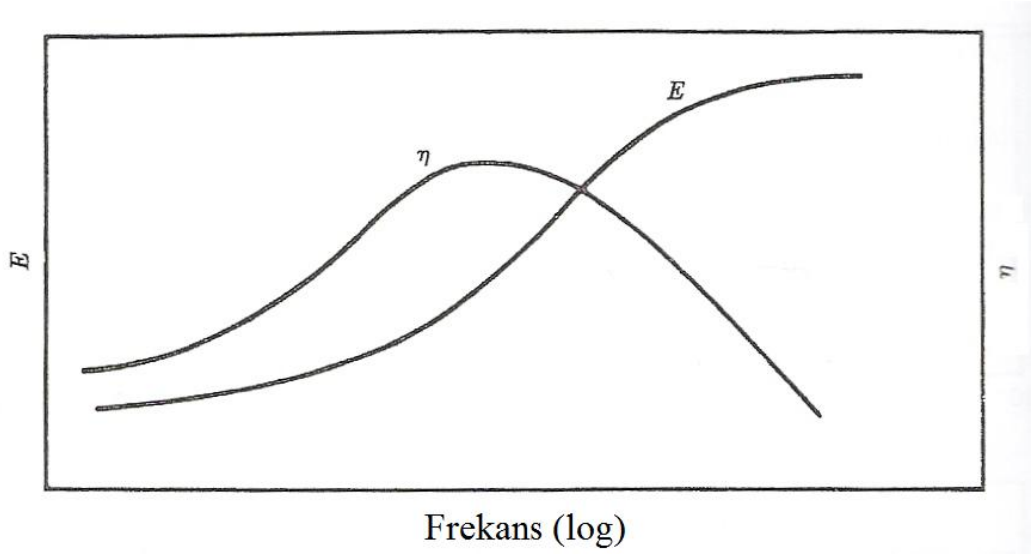
Şekil 2.5: Sıcaklığın viskoelastik malzemeler üzerindeki etkisi [34].

Genel lastik benzeri malzemeler için şekildeki grafik öngörülebilir ancak her malzemenin kendine özgü değerleri ve bölge ayrımları mevcuttur. Depolama modülü tipik olarak camsı bölgede 10^8 KPa kadar yüksek değerlere, lastiksi bölgede 10 KPa kadar düşük değerler alabilir. Geçiş bölgesinin değişimi dolgusuz viskoelastik malzemeler için 20^0 civarlarında, camsı kaplamalar için 200^0-300^0 C arasında bulunabilir. Lastiksi bölgenin genişliği silikon malzemeler için 50^0 C den 300^0 C'ye

kadar değerler arasında olabilir. Camsı bölgede kayıp faktörünün değerleri 10^{-2} ile 10^{-3} değerlerinin altında olurken, geçiş bölgesinde 1 ya da 2'ye kadar ulaşmaktadır. Çoğu malzeme için bileşimine göre değişmekle beraber lastiksi bölgelerde kayıp faktörü 0.1 ile 0.3 arasındadır [34].

2.2.2.2 Frekansın etkisi

Frekansın en önemli etkisi, Elastisite modülünün frekans arttıkça artmasıdır. Bu artım camsı ve lastiksi bölgede küçüktür; ancak geçiş bölgesinde en yüksek değerine ulaşır. Kayıp faktörü incelendiğinde de görüleceği üzere, lastiksi bölgede frekans artıkça değeri artmakta, geçiş bölgesinde en yüksek değerine ulaşmakta, camsı bölge de frekansın yükselmesiyle değeri azalmaktadır. Daha geniş bir frekans bandındaki davranışlar incelenseydi, sönüm özelliklerinin sabit sıcaklıkta frekansa bağlı değişimleri Şekil 2.6'daki gibi olacaktır.



Şekil 2.6: Frekansın viskoelastik malzemelere etkisi [34].

Şekil 2.6'ya kabaca göz gezdirildiğinde, yaklaşık olarak sıcaklık grafiklerinin tersi olduğu anlaşılır. Ancak birkaç derece sıcaklık değişimi ile gözlemlenen değişimler için onlarca frekans değeri değişimi gerekmektedir. Viskoelastisite teorisinin en büyük ilgi alanı viskoelastik malzemelerin karakterizasyonudur. Bu davranış sıcaklık-frekans süperpozisyon ilkesine bir temel oluşturarak, frekans uzayında elde ettiğimiz verileri sıcaklık uzayına dönüştürmekte fayda sağlamaktadır.

2.2.2.3 Çevrimsel dinamik birim şekil değiştirmenin etkisi

Dinamik birim şekil değiştirmenin genliğinin malzemenin sönüm özellikleri üzerindeki etkisini ölçmek oldukça güçtür. Bunun sebebi yüksek birim şekil değiştirme genliklerinin yüksek enerji disipasyonuna neden olarak, malzemenin sıcaklığının aniden yükselmesine ve şekil değiştirme ile sıcaklık etkisinin birleşmesine neden olmasıdır. Bu durum özellikle sönümün fazla olduğu geçiş bölgesinde dinamik birim şekil değiştirmenin etkisini ölçmeye çalışırken gerçekleşmektedir. Diğer taraftan, lastiksi bölgede Elastisite modülü ve kayıp faktörü sıcaklıkla çok yavaş değiştiğinden, sıcaklık birim şekil değiştirme genliği etkisinin yanında ikinci planda kalır. Bu sebeple çoğu sönüm özeliklerinin birim şekil değiştirme genliği ile ilgili olan kısmının incelemeleri bu bölgede tutulmaktadır. Sönüm özelliklerinin birim şekil değiştirme genliği ile değişimi, sıcaklığın etkisi gibidir. Ancak etki sıcaklığa göre çok küçüktür. Burada yine üç bölge mevcuttur ve bunlar; lineer, geçiş ve eşitlik olarak adlandırılır. Dinamik birim şekil değiştirmeye göre Elastisite modülünün değişimi, malzemenin birleşim oranlarına bağlıdır. Örneğin malzeme karbon siyahı gibi dolgu malzemelerine sahipse; bu dolgu sayısı arttıkça Elastisite modülünün değeri artar.

2.2.2.4 Statik ön yüklemenin etkisi

Statik ön yüklemenin malzemelerin dinamik özellikleri üzerindeki etkileri en çok lastiksi bölgede önemlidir. Modül önyüklemeyle beraber artarken, kayıp faktörünün değeri azalmaktadır.

2.2.2.5 Diğer çevresel faktörler

Lastiksi malzemenin sönüm özellikleri yaşlanma, yağa maruz kalma, yüksek sıcaklığa maruz kalma, vakum ve basınç gibi çevresel faktörlerden genelde etkilenirler. Ekstrem durumlar, örneğin çok yüksek sıcaklığa maruz kalma durumunda değişimler çok belirgin olabilir. Bu tarz durumlarda yapılması gereken kullanılacak her sönüm malzemesi için, maruz kalacağı bu etkileri yaratarak, sönüm malzemesini test etmektir. Örneğin malzeme belli çevresel koşullarda, çok yüksek sıcaklıklara maruz kalacak bir ortamda çalışacaksa sönüm davranışları önyükleme etkisi gibi davranarak yükselen modül değerleri, düşen kayıp faktörleri değerleri gösterecektir.

3. VİSKOELASTİK MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.1 Giriş

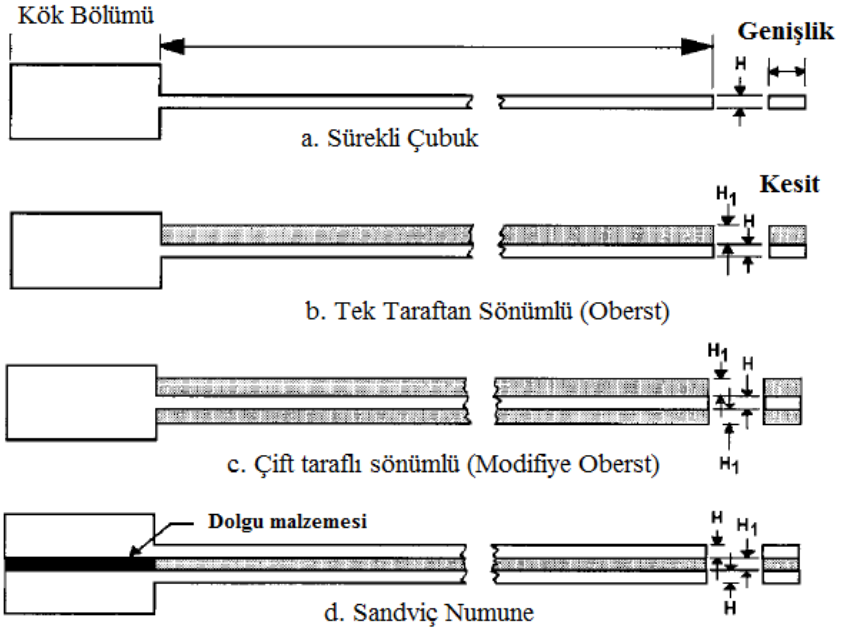
Viskoelastik malzemelerinin kullanım amacı çoğu zaman sisteme sönüm sağlamaktır. Malzemenin ne kadar sönüm sağlayacağı sıcaklık ve frekansa bağlı olarak değişen malzeme özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklerin belirlenmesi tasarım ve kullanım açısından büyük önem taşır. Bu tür malzemelerin sönüm karakterini belirleyen ana özellik kayıp faktörüdür. Bunların yanında mekanik özellikler Elastisite Modülü E ve Kayma modülü G ihtiyaç duyulan diğer parametrelerdir. Viskoelastik malzemelerde bu özelliklerin belirlenmesi için uygulanan Oberst Testi bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

3.1.1 Oberst Kiriş Yöntemi

Ana test düzeneği, yukarıdan tutturulmuş kiriş numuneyi alt ucundan sarsan elektromanyetik sarsıcı, ve köke yakın durumda bulunan titreşim algılayıcısından oluşmaktadır. Bu yöntem malzemelerin, kayıp faktörü η, Elastisite modülü E ya da kayma modülü G gibi özelliklerini ölçmekte kullanılır. 5000 Hz e kadar ve malzeme kullanım sıcaklarında uygun olan bu metot, yapısal titreşimler, bina akustiği, gürültü kontrolü gibi uygulamalarda kullanılan malzemelerin karakterizasyonu için kullanılmaktadır. Metaller, kaplamalar, seramikler, lastikleri plastikler, güçlendirilmiş epoksi matrisleri ve ahşaplar malzemeler konsol kiriş test numunesi konfigürasyonunda hazırlanarak test edilebilir. Bu yöntem ASTM 76 E standartıyla standartlandırılmıştır.

3.1.1.1 Numune yapılandırmaları

Oberst kiriş metodunda çıplak, serbest katmanlı ve kısıtlı katmanlı sönüm uygulamaları kullanılarak malzemeler karakterize edilmektedir. Oberst kiriş metodunda kullanılan test parçası konfigürasyonları Şekil 3.1'de gösterilmiştir [17].



Şekil 3.1: Deney numuneleri [17]

Sönüm malzemesinin hesaplanmak istenen malzeme özelliğine göre, deney numunesi olarak ilişkili yapı seçilir. OKY de kullanılan numune yapıları şöyle tanımlanabilir [17]:

i) Kendinden destekli malzemeler için malzemenin kendisinden tekil homojen test kirişi hazırlamak. Elastisite modülü ve sönüm seviyeleri, ölçülen FTF kullanılarak modal parametreler elde edilir.

ii) Kendinden destekli olmayan malzemelerin elastik ve sönüm özelliklerinin belirlenmesi iki aşamada gerçekleşir. İlk olarak, yalın kiriş, ilgilenilen doğal frekansları belirlemek için test edilir. Kiriş genellikle az yapısal sönüme sahip alüminyum veya çelik malzemelerden yapılır. Daha sonra, sönümlü kirişin FTF'si ölçülür ve kompozit yapının doğal frekansları ve bu doğal frekanslar etrafındaki sönüm parametrelerinin hesaplanması için analizi yapılır. Bu bilgilerle kompozit yapının doğal frekansları civarında sönüm malzemesinin Elastisite (Young) modülü ve kayıp faktörü hesaplanır.

iii) Kendinden destekli olmayan malzemelerin kayma modülü ve sönüm seviyeleri bir önceki yönteme benzer şekilde, iki adımlı olarak hesaplanır. Fakat bu durumda iki eş çıplak kiriş, sandviç yapı oluşturacak şekilde kullanılır.

Oluşturulan bu yapılar test edilirken katılığı yüksek bir köke bağlanarak konsol kiriş elde edilir.

3.1.1.2 Tedbirler

Kendinden destekli malzemelerle hazırlanan sürekli çubuğun dışında, bu yöntem sönümlü ve çıplak kirişin ölçülen farklarına dayanmaktadır. Büyük sayıların küçük farkları incelendiğinden, malzemelerin özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler hassas ve yüksek hata büyütme faktörüne sahiptir [17]. Bu durumlardan kaçınmak için;

* Tek taraflı sönümlü çubuk için $(f_c/f_n)^2(1+DT)$değeri 1.01'e eşit ya da büyük olmalıdır.

* İki taraftan sönümlü kiriş için $(f_m/f_n)^2(1+2DT)$ değeri 1.01'e eşit ya da büyük olmalıdır.

* Sandviç numuneler için $(f_s/f_n)^2(2+DT)$ değeri 2.01'e eşit ya da büyük olmalıdır.

Buradaki f_n, f_c , f_m, f_s, sırasıyla çıplak kirişin, tek taraflı sönümlü çubuğun, iki taraftan sönümlü çubuğun, sandviç numunenin aynı moddaki rezonans frekansı değeridir. D sönüm malzemesinin yoğunluğunun çıplak kirişin yoğunluğuna oranı, T sönüm malzemesinin çelik katmanın kalınlığına oranıdır.

Yukarıdaki değerlerin üst limitleri benzer şekildedir, sönüm malzemesinin çıplak kirişe göre kalınlığının oranı ve çıplak kirişin modülüne bağlıdır.

Tek taraftan sönümlü (serbest katmanlı) ve çift taraftan sönümlü numune konfigürasyonu Elastisite modülü 100 MPa civarında olan katılığı yüksek malzemelerin ölçümünde tercih edilmektedir. Bu malzemeler genelde camsı ya da geçiş bölgesindedirler, uygulamalarda ise yüzey kaplaması olarak kullanılan malzemelerdir. Sandviç tipi numuneler kayma modülü 100 MPa dan düşük, yumuşak malzemelerin test edilmesinde kullanılır. 100 MPa değeri standart olarak verilen bir yol göstericidir, bu değer kalın kirişler için daha yüksek, ince kirişler için daha düşük olabilir.

Yüksek sönümlü cevap ve düşük sinyal-gürültü oranı kirişe uygulanan verimli sönümün bir sonucudur. Bu yüzden ölçümlerde değerleri okuyabilmek için, kiriş

kalınlık oranlarını iyi seçmek önemlidir. 1:1 oran serbest katmanlı ve çift taraftan sönüm numuneleri için iyi birer başlangıç değeridir. Sandviç yapılar için sönüm malzemesinin sandviç katmana oranı 1:10 ile başlanabilir. Ancak sönümlü ve sönümsüz sistemler arasındaki farkı gözlemleyebilmek için çok düşük sönüm oluşturacak yapılardan kaçınılmalıdır. Sönüm malzemesinin kalınlığı değiştirilemiyorsa, daha kalın metal kiriş kullanılması önerilmektedir.

Malzeme uygulama yönlendirmelerine dikkat edilmelidir. Sönüm malzemelerinin metallere yapıştırılması çok önemlidir. Yapışkan karakteristiği ve uygulaması, kalınlığı sönüm karakteristiğine etkilemeyecek şekilde seçilmelidir.

Çıplak kiriş malzemesi olarak genelde alüminyum ve çelik malzeme seçilir. Literatürde başarılı sonuçlar 10 mm genişliğinde, boyu 180 mm ile 250 mm kalınlığı 1 ila 3 mm arasında değişen ölçülerdedir. Kirişlerin genişliği hesaplamalarda kullanılmamasına karşın, burulma etkilerinden kaçınılacak şekilde seçilmelidir [6].

3.1.1.3 Malzeme özelliklerinin Oberst Kiriş Yöntemi ile hesaplaması

Klasik Oberst yönteminde hesaplamalar için bütün numuneler için doğal frekans değerleri, yarım güç bant genişliği (3dB düşüm noktaları) ya da her mod için modal kayıp faktörleri, kirişlerin geometrik uzunlukları ve malzeme yoğunlukları gerekmektedir.
Yapılan çalışmada numunelerin doğal frekans ve modal kayıp faktörleri değerleri çizdirilen frekans tepki fonksiyonları sayesinde tepe seçme (peak picking), çember uydurma(circle fit) ve çizgi uydurma (line fit) yöntemlerine göre belirlenmiştir.

Sönüm malzemesi kendinden destekli olmadığı durumda, ölçümler ve hesaplamalar temel (destek) kirişin tepki fonksiyonlarının ölçümüyle başlar. Bu ölçümler sönüm malzemesinin ölçümleri için bir kılavuz olur. Sönüm malzemesi kendinden destekli ise, sürekli kiriş halinde bir numune için ölçüm yeterlidir.

Sürekli kiriş
Elastisite modülü ve kayıp faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$E = \frac{\left(12\rho l^4 f_n^{\,2}\right)}{\left(H^2 C_n^{\,2}\right)} \qquad \textbf{(3.61)}$$

ve

$$\eta = \frac{(\Delta f_n)}{(f_n)} \tag{3.62}$$

Burada;

C_n: Kenetli serbest (sürekli) çubuğun n. modu için katsayı

E: Kiriş malzemesinin Elastisite modülü, Pa,

f_n: n. mod için rezonans frekansı, Hz

Δf_n: n. mod için Yarı-güç bant genişliği, Hz

H: titreşim yönünde, kirişin kalınlığı, m

l: kirişin uzuluğu, m,

n: mod numarası: 1,2,3 …

η: kirişin kayıp faktörü, boyutsuz,

ρ: kirişin yoğunluğu, kg/m^3

ve katsayılar;

C_1 = 0.55959,

C_2 = 3.5069,

C_3 = 9.8194,

C_4 = 19.242,

C_5 = 31.809,

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

Tek taraftan sönümlü kiriş (Oberst Kirişi)

Sönüm malzemesinin Elastisite modülü ve kayıp faktörü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_1 = \frac{E}{\left(2T^3\right)}\left[(\alpha-\beta)+\sqrt{(\alpha-\beta)^2-4T^2(1-\alpha)}\right] \tag{3.3}$$

ve

$$\eta_1 = \eta_c \left[\frac{(1+MT)\left(1+4MT+6MT^2+4MT^3+M^2T^4\right)}{(MT)\left(3+6T+4MT^2+2MT^3+M^2T^4\right)} \right] \quad \textbf{(3.4)}$$

burada önceden belirtilmemiş ifadeler aşağıdaki gibidir;

c: İndex numarası, 1 , 2 , 3 … (c=n)

D: ρ_1/ρ, yoğunluk oranı,

E_1: Sönüm malzemesinin Elastisite modülü, Pa,

f_c: c. mod için kompozit kirişin rezonans frekansı, Hz,

Δf_c: kompozit kirişinYarı-güç bant genişliği

H_1: sönüm malzemesinin kalınlığı, m,

M: E_1/E Elastisite modülü oranı,

T: H_1/H kalınlık oranı,

α: $(f_c/f_n)^2(1+DT)$

β: $4+\ 6T+4T^2$,

η_c: kompozit kirişin kayıp faktörü, boyutsuz,

η_1: sönüm malzemesinin kayıp faktörü, boyutsuz,

ρ_1: sönüm malzemesinin yoğunluğu, kg/m^3

Çift tarafı sönümlü kiriş

Çift tarafı sönümlü numunelerde Elastisite modülü ve kayıp faktörü aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

$$E_1 = E \frac{\left[\left(f_m / f_n\right)^2\left(1+2DT\right)-1\right]}{\left(8T^3+12T^2+6T\right)} \quad \textbf{(3.5)}$$

ve

$$\eta_1 = \eta_m \left[\frac{E\eta_m}{E\left(8T^3 + 12T^2 + 6T\right)} \right] \tag{3.6}$$

E_1: Sönüm malzemesinin Elastisite modülü, Pa,

f_m: kompozit kirişin m. modu için rezonans frekansı, Hz

Δf_m: kompozit kirişinYarı-güç bant genişliği, Hz

m: index numarası, 1, 2, 3 …,

η_m: $\Delta f_m / f_m$; kompozit numunenin kayıp faktörü, boyutsuz

Sandviç numune

Sönüm malzemesinin kayma modülü ve kayma kayıp faktörü aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

$$G_1 = \left[A - B - 2\left(A - B\right)^2 - 2\left(A\eta_s\right)^2 \right] \left[\frac{\left(\frac{2\pi C_n EHH_1}{l^2} \right)}{\left\{ \left(1 - 2A + 2B\right)^2 + 4\left(A\eta_s\right)^2 \right\}} \right] \tag{3.7}$$

ve

$$\eta_1 = \frac{\left(A\eta_s\right)}{\left[A - B - 2\left(A - B\right)^2 - 2\left(A\eta_s\right)^2 \right]} \tag{3.8}$$

Burada

A: $\left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2 (2 + DT)(B/2)$,

B: $1/[6(1 + T)^2]$,

f_s: sandviç kirişin s. mod frekansı, Hz

Δf_s: sandviç kirişin Yarı-güç bant genişliği, Hz

G_1: sönüm malzemesinin kayma modülü, Pa

s: index numarası,

η_s: $\Delta f_s / f_s$ sandviç numunenin kayıp faktörü, boyutsuz.

Sönüm malzemesinin modülü (hem kayma hem Elastisite modülü) ve sönüm faktörü, tek bir numuneyi çeşitli modlarda titreştirerek frekansa bağlı belirlenen özelliklerle elde edilebilir. Benzer şekilde farklı sıcaklıklarda yapılan testlerle de sıcaklığın bir fonksiyonu olacak şekilde ölçülebilir.

3.1.2 Tek serbest dereceli sistemlerin analizi

Titreşim sistemlerinin analiz yöntemleri rezonans civarında , sistemlerin tek bir mod tarafından domine edildiği durumları göz önüne alarak geliştirilmiştir. Matematiksel ifadeyle frekans tepki fonksiyonu verimli olarak serilerdeki ilişkili modal parametrelerin etkisi gözlemlenebilmektedir. Bu kabul aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\alpha_{jk} = \sum \frac{{}_{s}A_{jk}}{\omega_s^2 - \omega^2 + i\eta_s\omega_s^2} \tag{3.9}$$

Yukarıdaki eşitlik aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir;

$$\alpha_{jk} = \frac{{}_{r}A_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r\omega_r^2} + \sum_{\substack{s=1 \\ \neq r}}^{N} \frac{{}_{s}A_{jk}}{\omega_s^2 - \omega^2 + i\eta_s\omega_s^2} \tag{3.10}$$

r. mod etrafındaki küçük frekans genişliğinde, yukarıdaki denklemin sağ tarafındaki ifade yaklaşım olarak frekanstan bağımsız bir sabit olarak kabul edilebilir. Reseptans ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\alpha_{jk} = \frac{{}_{r}A_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r\omega_r^2} + {}_{r}B_{jk} \tag{3.11}$$

Frekans tepki fonksiyonlarının Nyquist grafikleri çizildiğinde; her mod civarında; o moda ilişkin etkiler gözükmekte, diğer modların etkileri diğer doğal frekanslar yeterince uzakta ise ihmal edilebilecek seviyelerde olmaktadır.

3.1.2.1 Yarı Güç (Tepe Seçim) Yöntemi

Tek serbestlik dereceli sistemler için en kolay uygulanan yöntem yarı güç (tepe seçim ya da tepe genliği) yöntemidir. Bu yöntemde bütün cevabın yerel moddan kaynaklandığı ve diğer modların o cevap üzerinde hiçbir etki yaratmadığı kabul edilmektedir. Bu yöntem FTF'lerinde modları ayrık olarak gözükebilen, sönümleri rezonans civarında az sönümlü olmayan diğer taraftan diğer modları etkilemeyecek şekilde çok da yüksek olmayan sistemlerin analizi için tercih edilmektedir.

Tepe seçim yöntemi aşağıdaki adımlar ile uygulanır;

i. Öncelikle tekil modlar tepeleri FTF grafiğinde belirlenir, bu tepelerdeki en yüksek tepki o mod için doğal frekans ω_r olarak alınır.

ii. Frekans tepki fonksiyonlarındaki yerel maksimum değerleri ($|\widehat{H}|$) ve tepki seviyesi $|\widehat{H}|/\sqrt{2}$ olan fonksiyon değerleri için frekans genişliği ($\Delta\omega$) belirlenir. Belirlenen iki noktanın değeri ω_a , ω_b yarı-güç noktaları olarak isimlendirilir.

iii. Araştırılan mod için sönüm değeri aşağıdaki ifadeden elde edilir:

$$\eta_r = \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{2\omega_r^2} \simeq \frac{\Delta\omega}{\omega_r} \qquad \textbf{(3.12)}$$

$$2\xi_r = \eta_r \qquad \textbf{(3.13)}$$

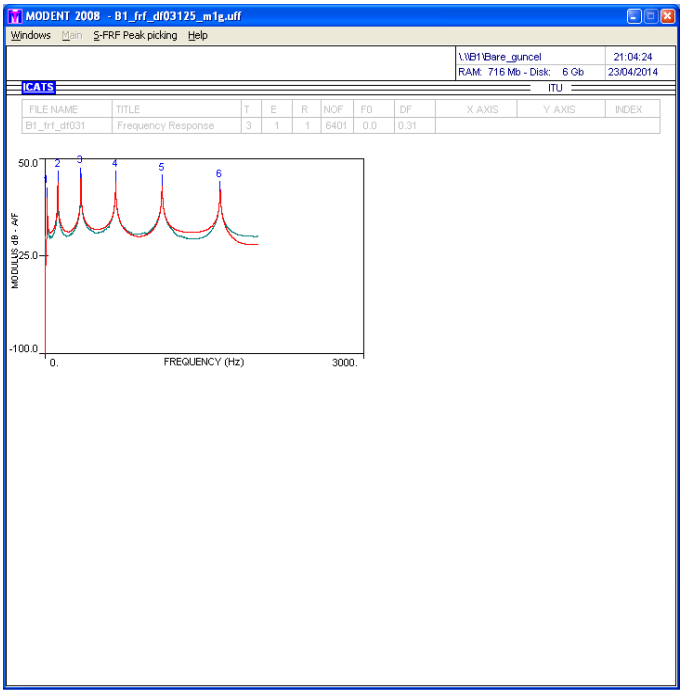
iv. Sonuncu olarak , analiz edilen mod için modal sabit; bu rezonans bölgesindeki bütün tepki FTF serilerindeki tek bir terimden kaynaklandığı kabulüyle aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$|H| = \frac{A_r}{\omega_r^2 \eta_r} \qquad \textbf{(3.14)}$$

ya da

$$A_r = \left|H\right|\omega_r^2\eta_r \tag{3.15}$$

Bu yöntemin bazı kısıtlamaları mevcuttur. Öncelikle sönümün ve modal sabitin değerleri maksimum FTF seviyesinin kesinliğine çok bağlıdır. Ölçüm hatalarının çoğu rezonans değeri civarındadır ve FTF spektrumlarında tek bir değer etrafında yığılan hafif sönümlü yapılara dikkat edilmelidir. Ayrıca bu yöntemle sadece gerçek modal sabitler (gerçek modlar ya da orantılı sönümlü) yapılar incelenebilmektedir. İkinci kısıtlama tekil mod kabulü kesin olarak uygulanabilir olmadığından kaynaklanmaktadır. Birbirinden ayrık olarak gözüken modlarda bile komşu modlardan gelen etkiler fark edilebilir ve toplam tepkiyi değiştirecek şekildedirler. Bu etkilerden kurtulmak için, daire uydurma yöntemi geliştirilmiştir.



Şekil 3.2: Yarı güç yönteminin bilgisayar uygulaması.

3.1.2.2 Daire Uyduma Yöntemi

Daha detaylı bir tek serbestlik dereceli (TSD) analiz yöntemi olan daire uydurma yöntemi, TSD sistemlerde çizdirilen Nyquist grafiğinden hareket edilerek geliştirilmiştir. Nyquist grafikleri incelendiğinde frekans tepki değerlerin daire benzeri bir dağılım gösterdikleri görülmüş ve sönüm modeli için uygun değişkenler seçilirse tam daire şekline dönüşebileceği gözlemlenmiştir.

Yapısal sönüm durumları için frekans tepkisinin reseptans formatı incelenmektedir. Ölçülen FTFlerin grafiklerinden her mod için o moda ait dairelerin özelliklerinin nasıl değiştiğini incelenir. Yapısal sönümlü sistem için ilgilenilen temel eşitlik:

$$\alpha(\omega) = \frac{{}_rA_{jk}}{\omega_r^2(1-(\omega/\omega_r)^2 + i\eta_r)} \tag{3.16}$$

Modal sabiti etkileyen tek faktör ${}_rA_{jk}$, dairenin büyüklüğünü ($\left|{}_rA_{jk}\right|$ kere) ve açısal pozisyonunu ($\angle {}_rA_{jk}$ açısıyla) değiştirmektedir. Şekil 3.3'te α(ω) değerinin grafiği verilmiştir. herhangi bir ω değeri için şu eşitlikler yazılabilir:

$$\tan\gamma = \frac{\eta_r}{1-(\omega/\omega_r)^2} \tag{3.17}$$

$$\tan(90^0 - \gamma) = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1-(\omega/\omega_r)^2}{\eta_r} \tag{3.18}$$

Buradan

$$\omega^2 = \omega_r^2[1-\eta_r \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)] \tag{3.19}$$

elde edilir. Bu eşitliğin θ'ya göre türevi alınırsa

$$\frac{d\omega^2}{d\theta} = \frac{-\omega_r^2\eta_r}{2}\frac{\left(1-(\omega/\omega_r)\right)^2}{\eta_r^2} \tag{3.20}$$

ulaşılır. Bu ifade daire yaylarının yayılmasının ifadesi olarak görülebilir. Bununla birlikte bu yayılmanın maksimum değerine ω=ω$_r$ olduğu zaman, yani doğal frekansta ulaştığı görülebilir. Frekansa göre tekrar türev alındığında; $\omega_r^2 - \omega^2 = 0$ olduğunda

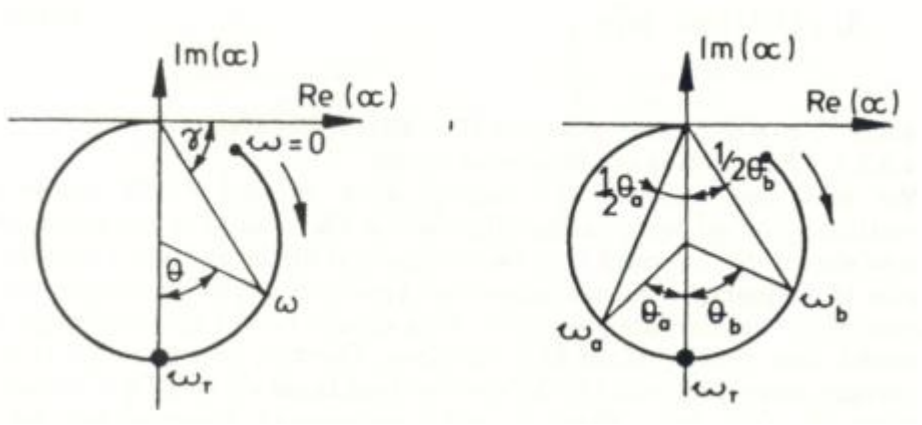
$$\frac{d}{d\omega}\left(\frac{d\omega^2}{d\theta}\right) = 0 \tag{3.21}$$

Sönümün yayılma miktar parametresinden etkilendiğini düşünürsek;

$$\left(\frac{d\theta}{d\omega^2}\right)_{\omega=\omega_r} = -\frac{2}{\omega_r^2 \eta_r} \tag{3.22}$$

olur. Bu ifade özellikle ÇSD sistemlerin analizinde, doğal frekansın yerinin tam bilinmediği durumlarda kullanışlıdır. Her rezonans değerinde, yay üstündeki noktaların arasında yeterli boşluk olursa, doğal frekans değeri elde edilebilir.

Biri doğal frekansın üstünde diğeri doğal frekansın altında iki noktanın var olduğu düşünülsün. Şekil 3.3'de verilen Nyquist Grafiği yardımıyla aşağıdaki ifadeler yazılabilir.



Şekil 3.3: Nyquist Grafiği [33].

$$\tan\left(\frac{\theta_b}{2}\right) = \frac{1-\left(\omega_b/\omega_r\right)^2}{\eta_r} \tag{3.23}$$

$$\tan\left(\frac{\theta_a}{2}\right) = \frac{\left(\omega_a/\omega_r\right)^2-1}{\eta_r} \tag{3.24}$$

Bu iki ifade yardımıyla da ilgilenilen mod için sönüm değeri aşağıdaki gibi bulunur:

$$\eta_r = \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{\omega_r^2\left(\tan\left(\frac{\theta_a}{2}\right)+\tan\left(\frac{\theta_b}{2}\right)\right)} \tag{3.25}$$

Bu değer sönümün gerçek değeri olup, bütün sönüm seviyeleri için geçerlidir. Düşük sönümlü durumlar (kayıp faktörler yüzde 2-3 civarındaysa) söz konusuysa, yukarıdaki eşitlik şu şekilde sadeleştirilebilir:

$$\eta_r \cong \frac{2\left(\omega_a - \omega_b\right)}{\omega_r\left(\tan\left(\frac{\theta_a}{2}\right)+\tan\left(\frac{\theta_b}{2}\right)\right)} \qquad \textbf{(3.26)}$$

$\theta_a = \theta_b = 90^o$ (yarı güç noktaları) olan iki noktayı ele alalım.

$$\eta_r = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_r} \qquad \textbf{(3.27)}$$

Sönümün düşük olmaması durumunda:

$$\eta_r = \frac{\omega_2^{\,2} - \omega_1^{\,2}}{2\omega_r^2} \qquad \textbf{(3.28)}$$

Bu da kesin değer olup her sönüm düzeyi için geçerlidir. Son özellik dairenin çapıyla alakalıdır. Çap modal sabite göre büyütülüp numaratöre eklenirse;

$${}_rD_{jk} = \frac{\left|{}_rA_{jk}\right|}{\omega_r^2\eta_r} \qquad \textbf{(3.29)}$$

olur ve önceden bahsedildiği gibi bütün daire, doğal frekans noktasından geçen prensip çap $\arg({}_rA_{jk})$ açısı kadar sanal eksenin negatif eksenine doğru konumlanmıştır.

Daire uydurma analiz prosedürü aşağıdaki şekilde ilerlemektedir:

i. kullanılacak noktaları seçin
ii. daire uydurun ve kalitesini hesaplayın
iii. doğal frekansı yerleştirin ve sönüm tahmini oluşturun
iv. çeşitli sönüm tahminlerinde bulunun ve dağıtın
v. modal sabitini ve argümanını bulun

İlk adım tepkinin maksimum değerinin etrafında otomatik olarak belirli sayıda noktaların seçimiyle ya da kullanıcının bu noktaları belirlemesiyle yapılabilir.

Kullanılacak noktaları seçerken oluşacak hataları ve istenmeyen noktaları elemek açısından daha iyidir. Seçilen noktalar diğer modların etkilerini içermemeli ve seçilen noktalar dairenin 270^0 lik kısmını içermelidir. Ancak çoğu zaman bu durum sağlanamaz 180^0 civarı bir seçim yapılır. Noktaların seçiminde belirli bir bölgedekilere çok bağlı olmayacak şekilde bir dağılım yapılmasına dikkat edilmelidir. Altı noktadan az seçim kullanılmamalıdır.

İkinci adımda çeşitli yöntemlerle daireler uydurularak, veri noktalarına en yakın sonucu veren daireye ulaşılmaya çalışılmalıdır. Bu durumda iki uygun ölçüt mevcuttur: ilki veri noktasının daireye en yakın olduğu mesafeyi küçültmeye çalışmak, ikincisi veri noktasının daire üzerinde olması gereken yere olan uzaklığı azaltmaya çalışmaktır. Bu adımın sonunda dairenin merkezi ve yarıçapı belirlenir bununla beraber veri noktalarının dairelere olan ortalama karesel sapmalar ile bir kalite faktörü oluşturulur. Yüzde 1-2 seviyesindeki "hatalar" kabul edilebilir seviyelerdedir.

Üçüncü adıma dairenin merkezinden doğal frekans civarındaki noktalara radyal çizgiler çizmekle başlanabilir. Bu çizgiler arasındaki açılar not edilmelidir. Daha sonra bu bölgedeki taranan açı bulunur ve maksimumuma ulaşan değerin olduğu frekans belirlenir. Frekansın yanlış belirlenmesi durumunda sönüm faktörleri ve modal sabit değerleri hatalı olur.

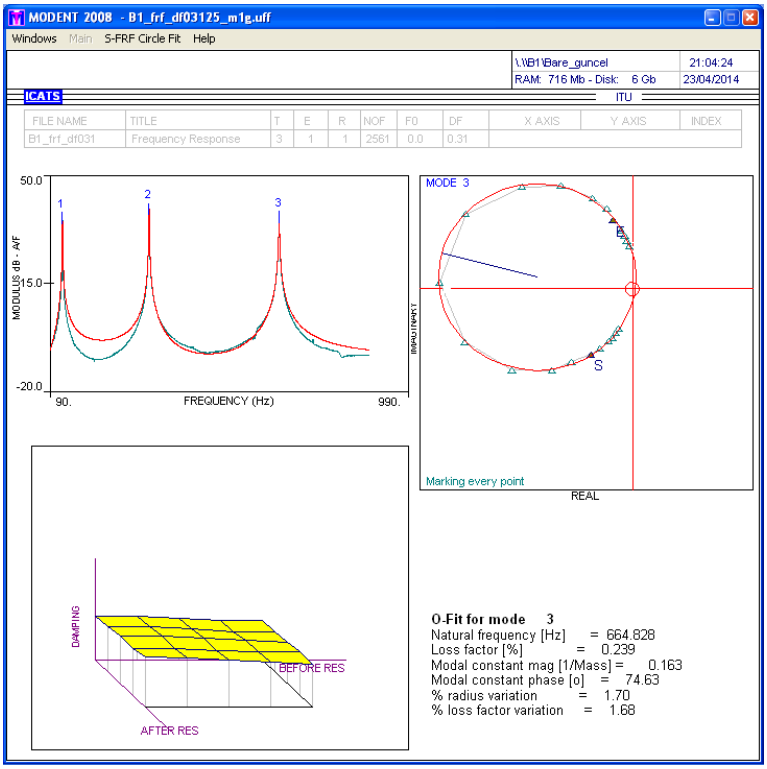
Bir sonraki adımda mevcut noktaların biri doğal frekansın üzerinde diğeri altında olacak şekilde çeşitli birleşimleriyle bir dizi sönüm tahmini yapılır. Bütün bu hesaplamaların ortalama değerleri kullanılabilir ya da her biri için eğilim ayrı olarak incelenebilir. İdeal halde bütün tahminler aynı olacaktır ve ortalama değerin yanında farklarında miktarının incelenmesi faydalıdır. Farklar yüzde 4-5 civarındaysa analiz başarılı, 20- 30 civarındaysa başarısız olarak düşünülebilir.

Son adımda dairenin çapından ve gerçek ile sanal eksenlere göre konumundan modal sabitin genliği ve argümanı bulunur. Bu hesaplama doğal frekans belirlenmiş ve sönüm tahmin edilmiş olduğundan direk yapılabilir.

Son olarak, teorik olarak geliştirilen bir FTF'nun ölçülenin üzerine çizilmesi ve aradaki farkların incelenmesi faydalı olacaktır. İncelenen mod civarında diğerlerinin etkisinden kaynaklanan tepkinin belirlenmesi gereklidir. Bunun için

prensip çapının en yüksek yerinin orijine olan uzaklığı ölçülmelidir. Bu uzaklık ${}_{r}B_{jk}$'ye eşit olmaktadır.

Sönüm faktörünün ortalama değerini bulmak için bu yöntem ile çeşitli tahminler yapılabilir. Her sönüm tahminin dağılımı ve yayılımını gösteren halı grafikleri çizilmelidir. Bu grafikler analizin kalitesini göstermektedir. Elde edilen yüzeyin mümkün olduğunca düz ve yumuşak olması beklenmektedir, yüzeydeki pürüzler ortam gürültüsünden, ölçüm hatalarından ve analizinden ya da yapısal davranışı doğru tahmin edememekten kaynaklanabilir. Tez kapsamında daire uydurma yöntemi ICATS programı yardımıyla uygulanmıştır.



Şekil 3.4: Daire uydurma yönteminin bilgisayar uygulaması.

Halı grafikleri olarak bahsedilen grafikler şeklin sol altındaki grafiklerdir.

3.1.2.3 Ters FTF ve Çizgi Uydurma Yöntemi

Daire uydurma yöntemi geniş ölçekte kullanılsa da, birkaç alternatif yöntem literatürde mevcuttur. Bu alternatiflerden biri de ters FTF ya da çizgi uydurma yöntemidir. Ters FTF yöntemi, karmaşık düzlemde çizildiğinde bir daire yaratan fonksiyonun çarpmaya göre tersi çizildiğinde düz bir çizgi yaratacağı gerçeğine dayanmaktadır. Yapısal sönümlü tek serbestlik dereceli bir sistemin reseptansının

çarpmaya göre tersi çizildiğinde düz bir çizgi şeklinde görülür. Bu durum aşağıdaki eşitliklerden sezilebilir:

$$\alpha(\omega) = \frac{(k - \omega^2 m) - i(d)}{(k - \omega^2 m)^2 + d^2} \tag{3.30}$$

ve

$$\frac{1}{\alpha(\omega)} = (k - \omega^2 m) + i(d) \tag{3.31}$$

Ters FTF'yi kullanarak modal parametreler şu adımlarla bulunur: Öncelikle karesel farkı en düşük olacak şekilde data noktaları arasında en iyi düz çizgi oluşturulur. Bu çizginin sanal ekseni kestiği yer sayesinde sönüm parametreleri tahmin edilebilir. Bu tahminin uygunluğu bakımından veri noktalarının dağılımı da incelenebilir. Noktalar çok dağınık ve birbirlerinden uzaksa, ya da rastgele seçimlerde bir ölçüm hatası yapıldığı düşünülebilir. Ancak belirli bir doğrultu üzerine yerleşmişlerse bir eğriye ya da eğimsiz bir doğruya yakın duruyorlarsa daha analizde ileriye gitmeden, sonuçlarda ayarlanması geren bir durum vardır.

Daha sonraki adımda, ilkinden bağımsız bir en küçük kareler yaklaşımı teorik modelin Real kısmı için uygulanır. Bu sayede kütle ve direngenlik değerleri için bir tahmin yapılır.

Bu uygulama gerçel modlar içeren sistemler ve modları ayrık olarak görülebilen ancak diğer modların yerel olarak baskın olamayan, ilgilenilen mod üzerindeki etkisi giderilecek şekildeki olan sitemlerde verimli olarak kullanılabilir. Fakat bu yöntem ölçülen verinin tam doğal frekansta (ters reseptansın reel kısmının sıfır olduğu nokta) olup olmaması bakımından duyarsızdır. Rezonanstan uzak herhangi bir noktada da düz çizgi gözlemlenebilir.

Çizgi Uydurma

Bu yöntem daire uydurma yöntemine göre daha kullanışlı bir yöntem olarak kabul görmektedir. Ters FTF ($H_{jk}^{-1}(\omega)$) 'nın Reel kısmı frekansın karesine ve Sanal kısmı yine frekansın karesine göre çizilir. Tek serbestlik dereceli bir sistemin FTF'si bu şekilde çizildiğinde grafikler düz çizgiler şeklinde gözükecektir ve bu grafikler ayrı ayrı sönüm, kütle ve direngenlik özellikleri için bilgilerini sunacaktır.

Ancak bu basit form FTF fonksiyonu çoğu zaman olacağı gibi birden fazla modun etkisinde olacağından pek fayda sağlamaz. Tek serbestlik dereceli sistemin avantajlı sonuçları aşağıdaki gibidir:

$$H_{jk}^{-1}(\omega) = (k - \omega^2 m) + i(\omega c \quad yada \quad d) \tag{3.32}$$

birden fazla mod etkidiğinde ilişkili ters Frekans Tepki Fonksiyonu aşağıdaki gibi olur:

$$H_{jk}^{-1}(\omega) = \frac{1}{\sum\left\{(k - \omega^2 m) + i(\omega c \quad yada \quad d)\right\}} \tag{3.33}$$

Çarpmaya göre ters formda modal seriler aşağıdaki şekilde olup, eşitsizlik söz konusudur:

$$H_{jk}^{-1}(\omega) \neq \sum \frac{1}{\left\{(k - \omega^2 m) + i(\omega c \quad yada \quad d)\right\}} \tag{3.34}$$

Ters grafiklerin avantajlarının genel uygulamada sürmesi için birkaç eklenti yapılmalıdır. Tek serbestlik dereceli analizin temel eşitliğiyle başlanırsa:

$$\alpha_{jk}(\omega)_{\omega=\omega_r} \cong \frac{{}_rA_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r\omega_r^2} + {}_rB_{jk} \tag{3.35}$$

Buradaki ${}_rB_{jk}$ (ilgilenilen modun dışındaki modlardan gelen etki) ters grafiği bozmaktadır. Gerçek FTF değeri ile ilgilenilen aralıkta sabit bir frekanstaki değeri (sabitleme frekansı olarak tanımlanır ve Ω olarak gösterilir) arasındaki farkı yeni bir FTF terimi $\alpha'_{jk}(\omega)$ olarak tanımlansın.

$$\alpha'_{jk}(\omega) = \alpha_{jk}(\omega) - \alpha_{jk}(\Omega) \tag{3.36}$$

Modal analizde kullanılacak FTF değişkeni $\Delta(\omega)$ de aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\Delta(\omega) = \frac{\omega^2 - \Omega^2}{\alpha'_{jk}(\omega)} = \mathrm{Re}(\Delta) + i\,\mathrm{Im}(\Delta) \tag{3.37}$$

Buradaki terimler ω frekansına aşağıdaki şekilde bağlıdırlar;

$$\mathrm{Re}(\Delta) = m_R\omega^2 + c_r \quad ; \quad \mathrm{Im}(\Delta) = m_I\omega^2 + c_I \tag{3.38}$$

Buradaki değerlerde

$$m_R = a_r\left(\Omega^2 - \omega_r^2\right) - b_r\left(\omega_r^2\eta_r\right); \tag{3.39}$$

$$m_I = -b_r\left(\Omega^2 - \omega_r^2\right) - a_r\left(\omega_r^2\eta_r\right); \tag{3.40}$$

$$_rA_{jk} = a_r + ib_r \tag{3.41}$$

Analizin ilk adımı şöyle başlar:

(i) Ölçülen FTF verilerini kullanarak rezonans frekansı ω_r etrafındaki bir değeri sabit frekans Ω olarak belirlenir. Daha sonra kalan noktalarla $\Delta(\omega)$'nın olası değerleri hesaplanır.

(ii) Bu değerler Re-(frekans)^2 ve Im-(frekans)^2 grafiklerinde çizilir ve Ωj'nin o değerinde $m_R(\Omega_j)$ ve $m_I(\Omega_j)$'yi hesaplamak için en iyi düz çizgi uydurulmaya çalışılır.

$m_R(\Omega_j)$ ve $m_I(\Omega_j)$ düz çizgilerin eğimleridir ve Ω'nın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$m_R = n_R\Omega^2 + d_R \quad ve \quad m_I = n_I\Omega^2 + d_I \tag{3.42}$$

burada

$$n_R = a_r \quad ; \quad n_I = -b_r \tag{3.43}$$

$$d_R d_R = -b_r\left(\omega_r^2\eta_r\right) - a_r\left(\omega_r^2\right) \quad ; \quad d_I = b_r\left(\omega_r^2\eta_r\right) - a_r\left(\omega_r^2\right) \tag{3.44}$$

$p = n_I/n_R$ ve $q = d_I/d_R$ olsun

$$\eta_r = \frac{(q-p)}{(1+pq)} \quad ; \quad \omega_r^2 = \frac{d_R}{(p\eta_r - 1)n_R} \tag{3.45}$$

$$a_r = \frac{\omega_r^2 \left(pn_R - 1 \right)}{\left(1 + p^2 \right) d_R} \quad ; \quad b_r = -a_r p \tag{3.46}$$

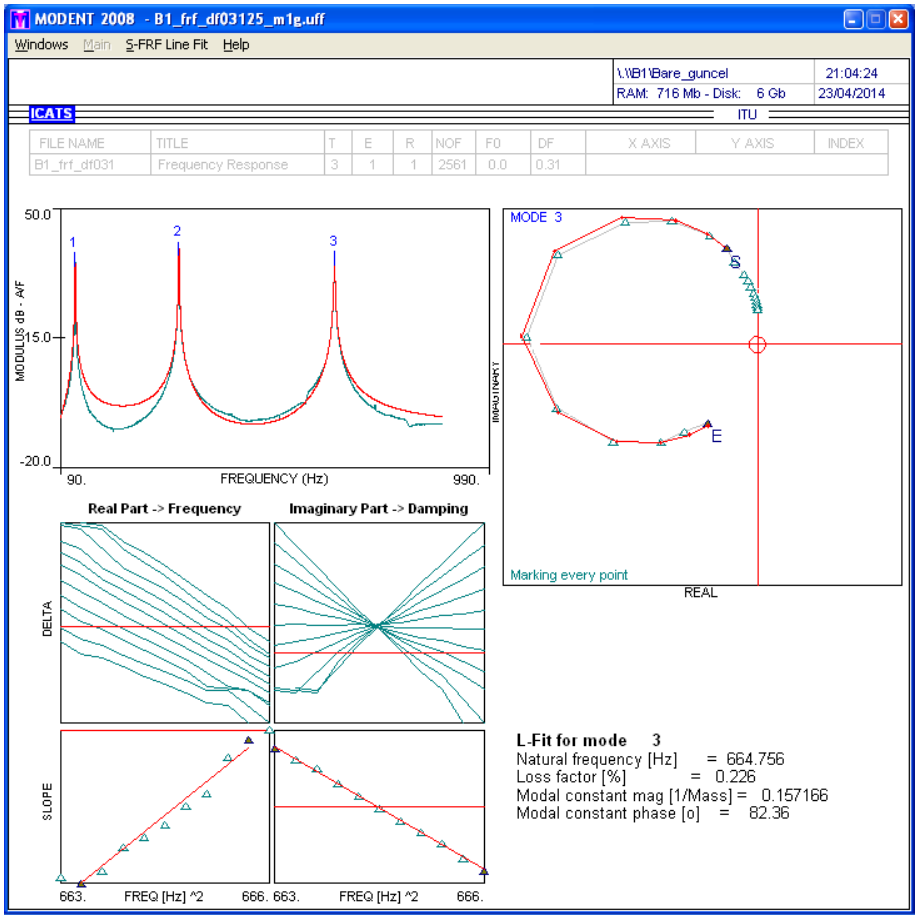
olur. Bu aşamada analiz için gereken dört değişken η_r, ω_r, ${}_r A_{jk} = a_r + ib_r$ için uygun tahminler yapılabilecek noktaya gelinir. Daha sonra analize aşağıdaki adımlarla devam edilir

(iii) İlk şık tekrar uygulanarak elde edilen sonuçlar yardımıyla, belirlenen değerlerin her biri sırasıyla sabitleme frekansı Ω olacak şekilde, $m_R(\Omega_j)$- Ω^2 ve $m_I(\Omega_j)$- Ω^2 grafikleri çizilir.

(iv) Bu iki grafikte noktalara en iyi uyacak düz çizgiler oluşturulur ve bu düz çizgilerin eğimleri n_R ile n_I ve dikey ekseni kestikleri noktalar d_R ile d_I bulunur.

(v) Bulunan bu dört parametreyi kullanarak aranan modal parametreler hesaplanır.

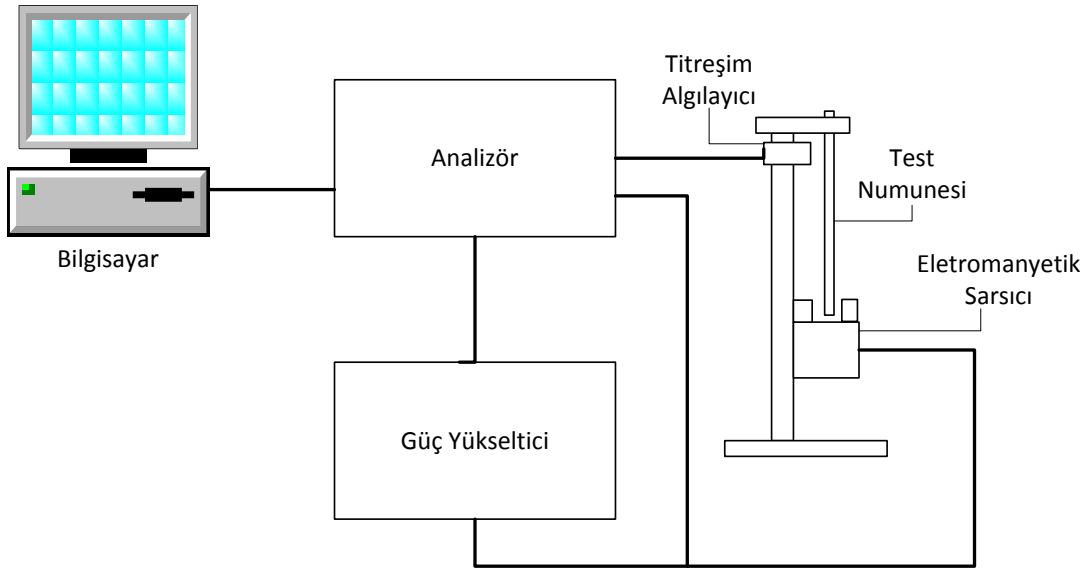
Çizgi uydurma yöntemi daire uydurma ve daha karmaşık yöntemlere göre daha hızlı ve basittir. Ayrıca eldeki verilerin durumuna bakarak hataları, lineer olmayan davranışları ve yanlış sönüm modeli durumlarını gözlemlemekte fayda sağlar. Ters alma işleminin yapısı gereği en iyi çizgiyi belirleyecek noktalar rezonanstan en uzak noktalardır. Rezonans noktası civarındaki değerleri doğru ölçmek sinyal işleme, yapı tahrik bağlantı dinamikleri ve çeşitli sebeplerle zordur. Bu yöntem bu noktaları kullanmayarak ölçüm hatalarına daha az duyarlıdır.



Şekil 3.5: Çizgi uydurma yönteminin bilgisayar uygulaması.

4. VİSKOELASTİK MALZEMELERİN DENEYSEL KARAKTERİZASYONU

Viskoelastik malzemelerin sönüm özelliklerini belirlemek için yukarıda bahsedilen Oberst Kiriş Yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemi uygulamak için temassız elektromanyetik bir sarsıcıyla hazırlanan numunelere tahrik verilmiş, yine temassız bir hız algılayıcısıyla titreşim cevabı ölçülmüştür. Deney sisteminin şematik gösterimi aşağıda, Şekil 4.1'de verilmiştir.

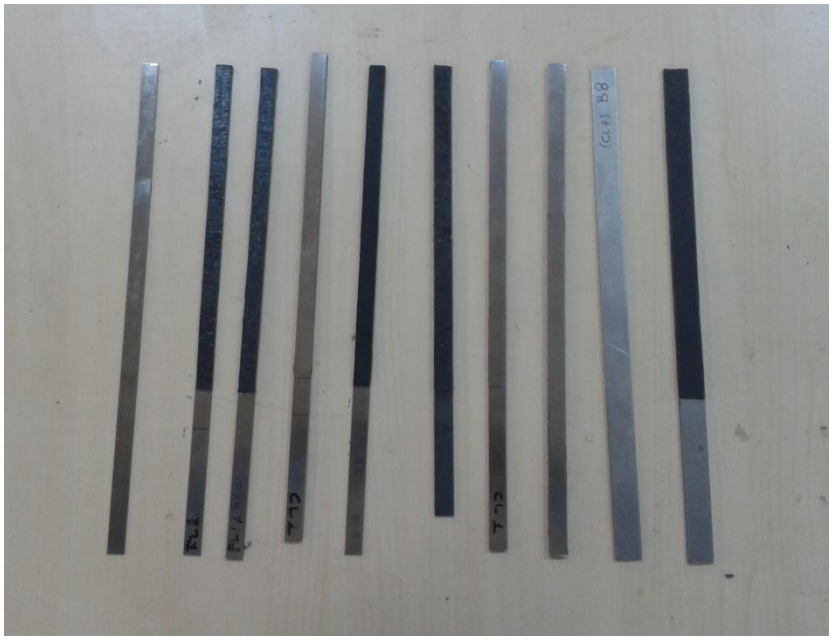


Şekil 4.1: Deneyde kullanılan test düzeneği.

Analizör olarak Brüel & Kjæer TYPE 3109 Modül kullanılmıştır. Sarsıcıya sinyal gönderen analizör aynı zamanda titreşim sinyalini toplamak için de kullanılmaktadır. Titreşim algılayıcısı olarak Brüel & Kjæer MM 0002 kullanılmıştır. Sarsıcıya giden sinyalin seviyesini yükseltmek için kullanılan güç yükseltici; TWS LV18'in güç amfisi kısmıdır. Sarsıcıya giden yükseltilmiş sinyalin gücü, titreşim sinyalinin gücüyle beraber ölçülmektedir. Ölçülen bu sinyaller bilgisayar yardımıyla gözlenmekte ve PULSE programında işlenerek Frekans Tepki Fonksiyonları (FTF) elde edilmektedir. Elde edilen FTFler ICATS programı yardımıyla yukarıda bahsedilen tek serbestlik dereceli analiz yöntemlerini kullanarak incelenmiş,

yapıların doğal frekans ve kayıp faktörleri elde edilmiştir. Daha sonra bu veriler kullanılarak incelenen sönüm malzemelerinin mekanik özellikleri ASTM 756 E standardındaki eşitliklerden hareketle yazılan ve EK A'da verilen kod ile MATLAB yardımıyla hesaplanmıştır.

Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş, ilgilenilen frekans aralığı f=2-2000 Hz olarak alınmıştır. Deney numuneleri rastgele sinyal ile uyarılarak, Hanning pencerelemesi hem tahrik hem tepki sinyaline uygulanmıştır. Numune boyu L=205 mm olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan bazı numuneler aşağıdaki resimde gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Oberst kiriş yönteminde test edilen numuneler.

Elektromanyetik alan içerisinde kalacak kiriş uzunluğu literatürde daha önceden yapılan çalışmalar göz önüne alarak belirlenmiştir [10, 35]. Sonuç olarak, manyetik alanın içerisindeki uzunluk yaklaşık olarak δ = 2.5 mm'dir. Titreşim algılayıcının çubukların tutturulduğu kökten uzaklığı a=33 mm olarak seçilmiştir. Algılayıcının yüzeyi numunelere mümkün olduğunca yakın tutulmuştur. Sinyaldeki gürültü miktarının etkisini azaltmak için ölçümler belirli sayıda ortalama alınarak yapılmalıdır. Önceden yapılan bazı testlerde 10 ve üzeri ortalama almanın yeterli olacağı anlaşılmıştır. Bu tez kapsamında yapılan deneylerde spektrum ölçümleri için 30 ortalama alınmıştır. Frekans çözünürlüğü, analiz yöntemi gibi diğer sinyal işleme değişkenlerinin etkisini görmek için çeşitli malzemeler ile hazırlanan çeşitli

numunelerin çok sayıda FTF'leri ölçülmüş ve incelenmiştir. Çelik çıplak kiriş, "birbirine eş" tek taraftan sönümlü (serbest katmanlı) kirişler, çift tarafı sönümlü (serbest katmanlı) kiriş ve birkaç sandviç (yapılandırılmış katmanlı) numune test edilmiştir. FTF ölçümleri dört farklı frekans çözünürlüğünde gerçekleştirilmiştir, bunlar; Δf = 0.3125, 0.625, 1.25 ve 2.5 Hz'dir. Ölçülen FTFler yarı-güç, daire uydurma, çizgi uydurma yöntemleriyle analiz edilerek modal parametrelere ulaşılmıştır.

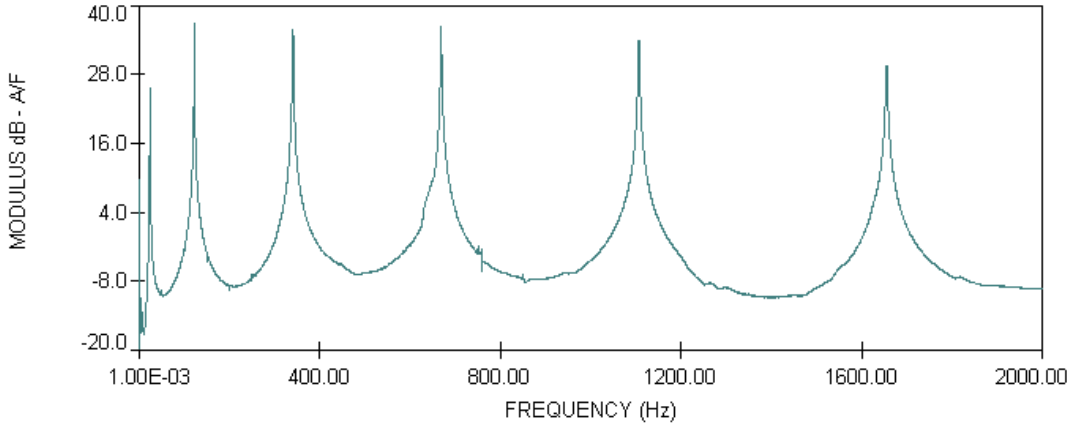
4.1 Çıplak Kirişin Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Sönüm malzemelerinin özelliklerini belirlemek için atılması gereken ilk adım, ölçümlerde kullanılacak çıplak (temel) kirişin özelliklerini belirlemektir. Deneylerde kullanılmak üzere seçilen kirişin geometrik boyutları ve kütlesi aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Çıplak kiriş boyutları ve kütlesi.

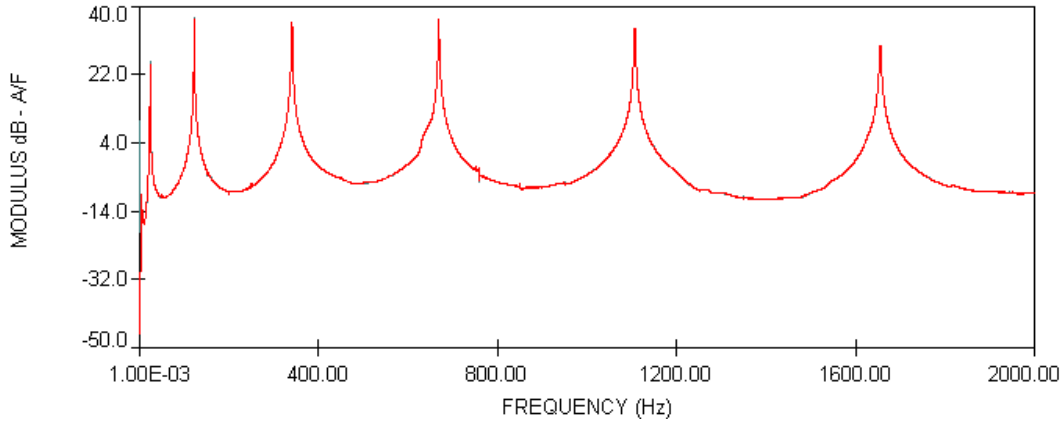
Kütle	27.3 gr
Boy	300 mm
Genişlik	10 mm
Kalınlık	1 mm

Tablodaki verilere göre kullanılan çubuğun yoğunluğu ρ_{celik}=7900 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Çubuğun toplam boyu 300 mm olsa da üzerine yapıştırılan viskoelastik malzemelerin boyu 205 mm'yi geçmemektedir. Kalan kısım mesnetlemek için kullanılmıştır. Çıplak kirişin ölçülen FTF'lerinden biri aşağıda gösterilmektedir.



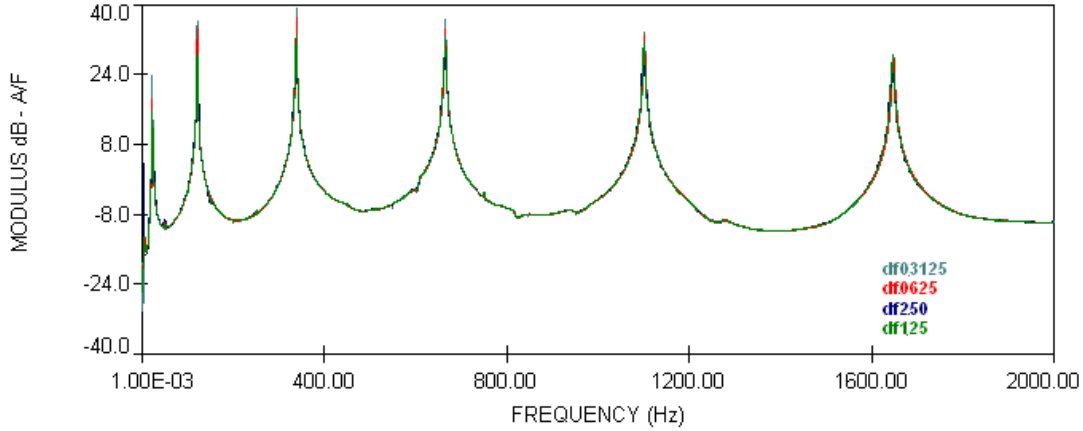
Şekil 4.3: Çıplak numunenin Δf=0.3125 kullanılarak ölçülen FTF'si.

Aynı çözünürlük kullanılarak yapılan tekrarlanabilirlik testi sonunda iki FTF üst üste çizdirilince aşağıdaki grafik elde edilmiştir.



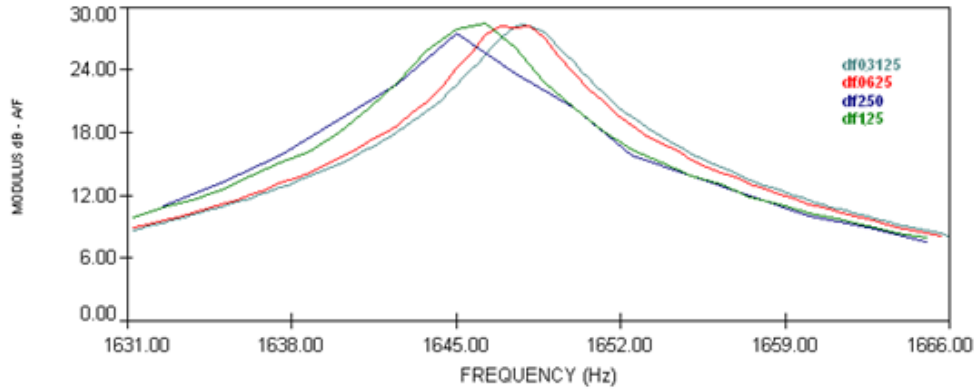
Şekil 4.4: Çıplak kirişin Δf=0.3125 Hz kullanılarak tekrarlanabilirlik testi.

Frekans çözünürlüğü sırasıyla Δf=0.3125 Hz, Δf=0.625 Hz , Δf=1.25 Hz, Δf=2.50 Hz alınarak, ikişer ölçüm yapılmıştır. Aşağıdaki grafikte farklı frekans çözünürlükleriyle elde edilen FTF'ler üst üste çizilmiştir.



Şekil 4.5: Çıplak kirişin farklı çözünürlükteki FTFleri.

Makro seviyede grafiklerde farklılık gözükmese de, detaylı incelendiğinde değişik çözünürlükler için sonuçların bir miktar farklı olduğu görülebilir. Altıncı mod civarına yakınlaşarak elde edilen sonuç Şekil 4.6'da görülebilir. Frekans çözünürlüğü FTF'leri oluştururken önemli bir kriterdir ve etkisi bir sonraki ana bölümde incelenecektir.



Şekil 4.6: Çıplak kirişin 6. modunda frekans çözünürlüğünün etkisi.

Elde edilen FTF'ler Yarı Güç, Daire Uydurma ve Çizgi Uydurma yöntemleriyle analiz edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen çizelgeler aşağıda verilmiştir. Frekans çözünürlüğü düştükçe kayıp faktörlerinin değerleri küçülmektedir.

Çizelge 4.2 : Çıplak kirişin Δf=1.25Hz için doğal frekans ve sönüm değerleri.

	Yarı-Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_n (Hz)	η (%)	f_n (Hz)	η (%)	f_n (Hz)	η (%)	f_n (Hz)	η (%)
2	121.25	1.14			120.54	0.39	120.89	0.77
3	337.50	0.72	337.91	0.63	337.82	0.27	337.74	0.54
4	665.00	0.38	663.97	0.38	664.04	0.25	664.34	0.34
5	1100.63	0.33	1100.56	0.31	1100.46	0.20	1100.55	0.28
6	1646.25	0.25	1645.81	0.26	1645.76	0.19	1645.94	0.23

Çizelge 4.3 : Çıplak kirişin Δf=0.625 Hz için doğal frekans ve sönüm değerleri.

	Yarı-Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_n (Hz)	η (%)	f_n (Hz)	η (%)	f_n (Hz)	η (%)	f_n (Hz)	η (%)
2	120.62	0.61	120.88	0.73	120.68	0.33	120.72	0.56
3	338.12	0.46	338.25	0.40	338.14	0.28	338.17	0.38
4	665.00	0.32	664.67	0.30	664.62	0.24	664.76	0.29
5	1101.25	0.26	1101.33	0.26	1101.31	0.21	1101.30	0.25
6	1647.50	0.22	1647.38	0.24	1647.59	0.20	1647.49	0.22

Çizelge 4.4 : Çıplak kirişin Δf=0.3125 Hz için doğal frekans ve sönüm değerleri.

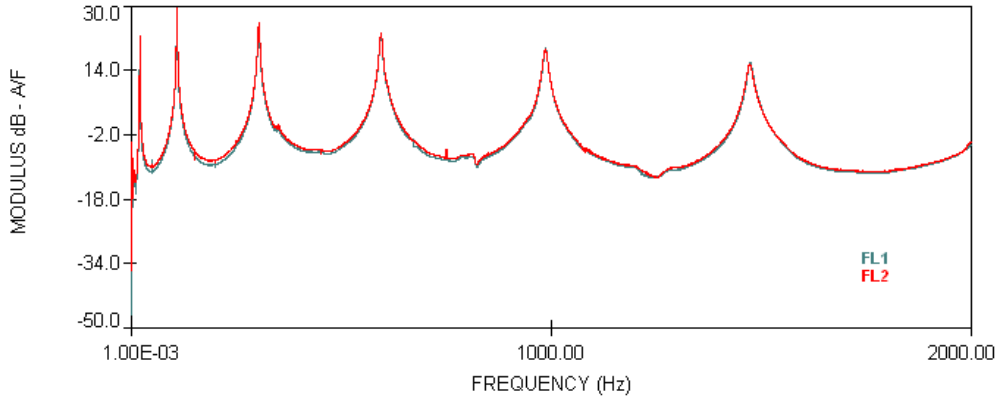
	Yarı Güç		Daire Uydurma		Çizgi Uydurma		Ortalama	
Mod	f_n (Hz)	η (%)	f_n (Hz)	η (%)	f_n (Hz)	η (%)	f_n (Hz)	η (%)
2	120.62	0.59	120.78	0.60	120.71	0.27	120.70	0.49
3	338.12	0.28	338.27	0.27	338.20	0.21	338.20	0.25
4	664.69	0.25	664.85	0.24	664.82	0.22	664.79	0.24
5	1101.56	0.20	1101.59	0.22	1101.59	0.21	1101.58	0.21
6	1647.81	0.22	1648.06	0.22	1648.04	0.22	1647.97	0.22

4.2 Birinci Sönüm Malzemesinin Sönüm Özelliklerinin Belirlenmesi

Ele alınan sönüm malzemesinin mekanik özelliklerini belirlemek için standarttaki yapıları oluşturmakla işe başlanmıştır. Öncelikli yoğunluğu 1953 kg/m^3 olan kauçuk tabanlı bir sönüm malzemesi incelenmek üzere seçilmiştir. Eldeki sönüm malzemesinin kalınlığı h=1 mm'dir.

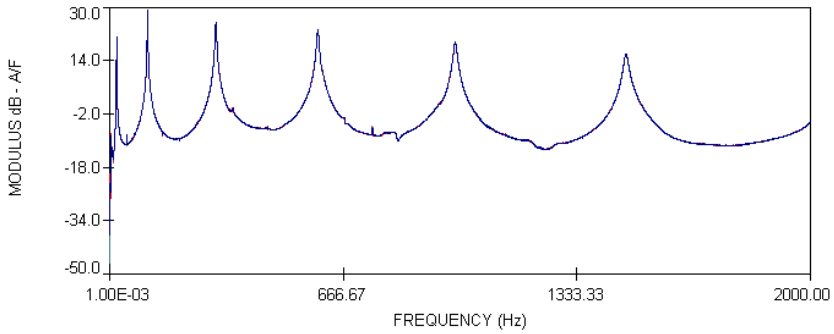
4.2.1 Tek taraftan sönümlü numune

İlk olarak standarttaki en basit kompozit yapı oluşturularak sönüm malzemesinin Elastisite Modülü ve kayıp faktörünün belirlenmesi amaçlanmıştır. Sönüm malzemesi L_d=204 mm ve çıplak kirişin üzerine tam oturacak genişlikte (w=10 mm) hazırlanarak, çıplak kiriş üzerine yapıştırılmıştır. Tek taraftan sönümlü numune olarak "eş" iki yapı hazırlanmıştır. İlki için FL1 ikincisi için FL2 kısaltmaları kullanılacaktır. En düşük frekans çözünürlüğünde yapılan test ile elde edilen FTF'ler Şekil 4.7'de verilmiştir.

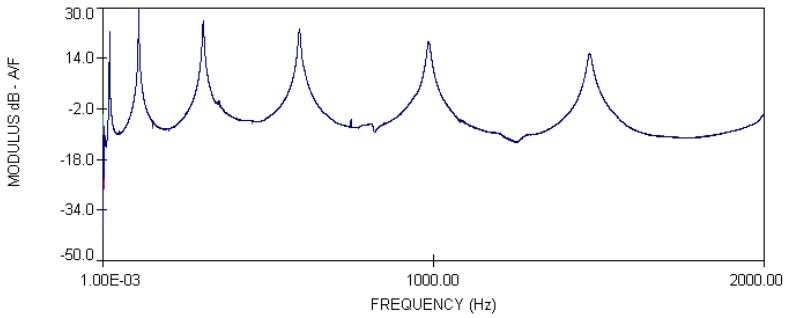


Şekil 4.7: FL1 ile FL2'in Δf=0.3125 Hz'deki FTF'si

Tekrarlanabilirliği kontrol etmek amacıyla, diğer parametreler sabit olacak şekilde her frekans çözünürlüğünde 3 adet ölçüm yapılmıştır. Üç ölçüm üst üste çizdirilerek aşağıdaki grafikte sunulan sonuç elde edilmiştir.



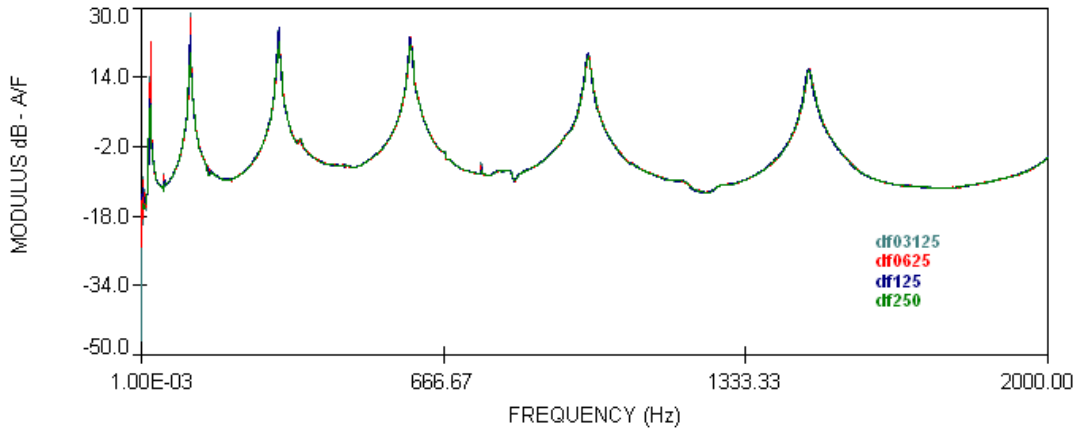
(a) FL1



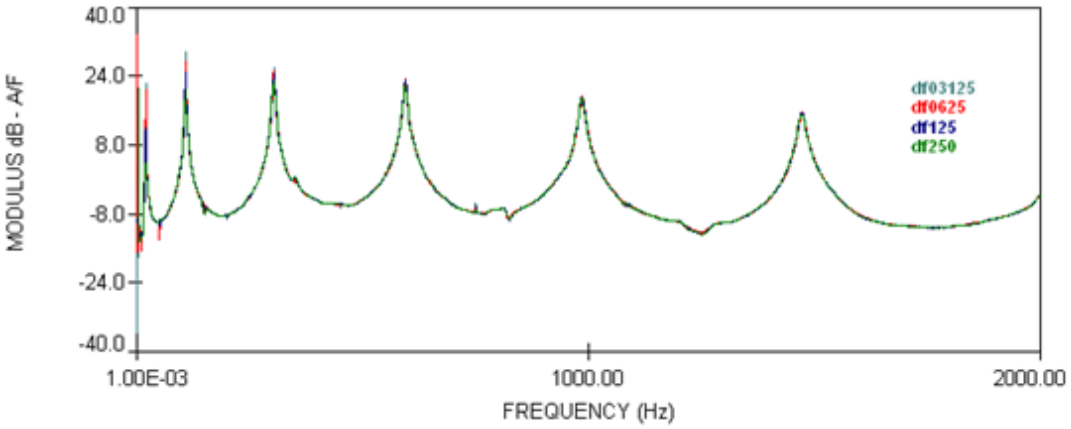
(b) FL2

Şekil 4.8: Tek taraftan sönümlü numuneler içim Δf=0.3125 Hz'deki tekrarlanabilirlik

Farklı çözünürlükteki FTF'lerin bir arada çizildiği grafik Şekil 4.9'da verilmiştir. Frekans çözünürlükleri şekilden de görülebileceği üzere özellikle ilk modlar için FTF'lerin tepe noktalarını değiştirmektedir.



(a) FL1



(b) FL2

Şekil 4.9: FL1 ve FL2 farklı çözünürlükteki FTF'ler

Frekans çözünürlüğüne bağlı olarak FTF'lerdeki değişim analiz sonuçlarını etkilemektedir. Bu FTF'ler kullanılarak yapılan analiz sonuçları aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4.5 : FL1'in Δf=2.5 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	107.5	3.550	108.563	4.216	108.534	1.922	108.20	3.23
3	302.500	2.023	303.417	1.883	302.820	1.158	302.91	1.69
4	594.167	1.380	594.000	1.419	594.154	1.166	594.11	1.32
5	985.833	1.151	986.167	1.276	985.796	1.029	985.93	1.15
6	1473.33	0.943	1473.583	1.059	1473.246	0.945	1473.39	0.98

Çizelge 4.6 : FL1'in Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	108.750	2.056	108.292	2.177	108.073	1.415	108.37	1.883
3	302.500	1.185	303.146	1.306	302.598	1.164	302.75	1.218
4	692.917	1.115	593.396	1.102	593.643	1.085	593.32	1.101
5	985.000	1.000	986.167	1.125	985.216	0.987	984.91	1.037
6	1472.083	0.835	1473.583	0.924	1472.017	0.908	1471.94	0.889

Çizelge 4.7 : FL1'in Δf=0.625 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	108.120	1.330	107.625	1.820	108.047	0.955	107.93	1.368
3	303.120	1.262	303.104	1.339	302.918	1.189	303.05	1.264
4	593.750	0.887	593.688	1.046	593.931	0.987	593.79	0.973
5	985.413	0.909	985.395	0.999	985.772	0.980	985.53	0.963
6	1472.920	0.815	1472.937	0.889	1472.930	0.883	1472.93	0.862

Çizelge 4.8 : FL1'in Δf=0.3125 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	108.090	1.096	108.042	1.051	108.075	0.945	108.07	1.031
3	303.052	1.112	302.896	1.154	302.949	1.118	302.97	1.128
4	594.157	0.973	594.042	1.014	594.152	0.996	594.12	0.994
5	986.250	0.928			985.762	0.978	986.01	0.953
6	1473.440	0.870	1473.094	0.946	1473.362	0.922	1473.30	0.913

Çizelge 4.9 : FL2'in Δf=2.5 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	107.500	3.985	108.750	4.487	108.357	1.880	108.20	3.451
3	302.500	2.533	303.750	2.314	302.931	1.431	303.06	2.093
4	594.167	1.315	593.833	1.458	593.871	1.224	593.96	1.332
5	985.000	1.246	984.458	1.327	984.929	1.155	984.80	1.243
6	1472.500	1.091	1472.083	1.096	1471.202	1.054	1471.93	1.080

Çizelge 4.10 : FL2'in Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	108.750	2.048	108.917	1.940	108.213	1.291	108.63	1.760
3	303.333	1.416	303.104	1.592	302.957	1.297	303.13	1.435
4	594.167	1.201	593.333	1.161	594.136	1.101	593.88	1.154
5	985.000	1.177	985.250	1.147	985.089	1.097	985.11	1.140
6	1471.667	1.031	1471.333	1.022	1471.421	0.974	1471.47	1.009

Çizelge 4.11 : FL2'in Δf=0.625 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri.

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	108.330	1.508	108.704	1.709	108.309	1.152	108.45	1.456
3	303.120	1.335	302.958	1.417	303.216	1.253	303.10	1.335
4	593.927	1.083	594.313	1.127	594.275	1.065	594.17	1.092
5	985.620	0.974	985.146	1.106	985.200	1.081	985.32	1.054
6	1471.670	0.911	1472.645	0.963	1471.963	1.000	1472.09	0.958

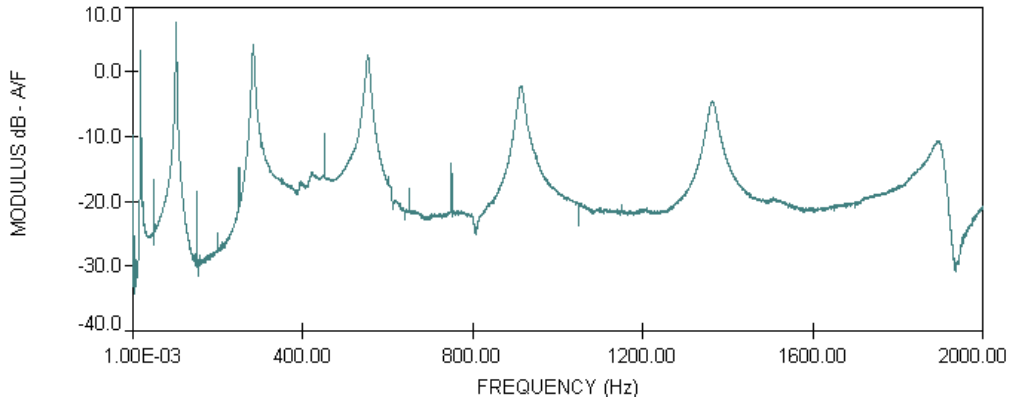
Çizelge 4.12 : FL2'in Δf=0.3125 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri.

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	108.440	1.054	108.354	1.103	108.326	1.061	108.37	1.073
3	303.440	1.093	303.000	1.211	303.080	1.146	303.17	1.150
4	594.273	1.005	594.063	1.088	594.290	1.078	594.21	1.057
5	985.310	1.006			985.365	1.072	985.34	1.039
6	1472.187	0.888			1471.572	0.965	1471.88	0.926

Tek taraftan sönümlü numune için sonuçlar incelendiğinde frekans çözünürlüğü küçüldükçe sönüm faktörü değerlerinin çıplak kiriş için olduğu gibi küçüldüğü görülmüştür.

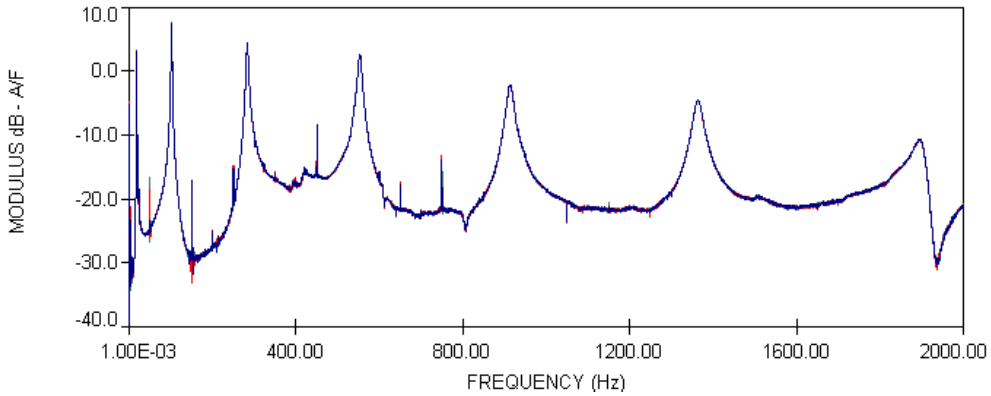
4.2.2 Çift taraftan sönümlü numune

Tek taraftan sönümlü yapı kullanılarak yapılan ölçümler sonucu hesaplamalar bu malzeme için malzeme özelliklerini belirlemekte yetersiz olmuştur. Tek taraftan sönümlü yapıda olduğu gibi çift taraftan sönümlü yapılar kullanmanın amacı da Elastisite modülü ve eksenel kayıp faktörünü belirlemektir. Standartlara uygun olarak inşaa edilen numunenin test edilmesi sonucu Δf=0.3125 Hz çözünürlükle elde edilen FTF'si Şekil 4.10'da gösterilmiştir. İki taraftan sönümlü numune için BSD1 kısaltması kullanılmıştır.



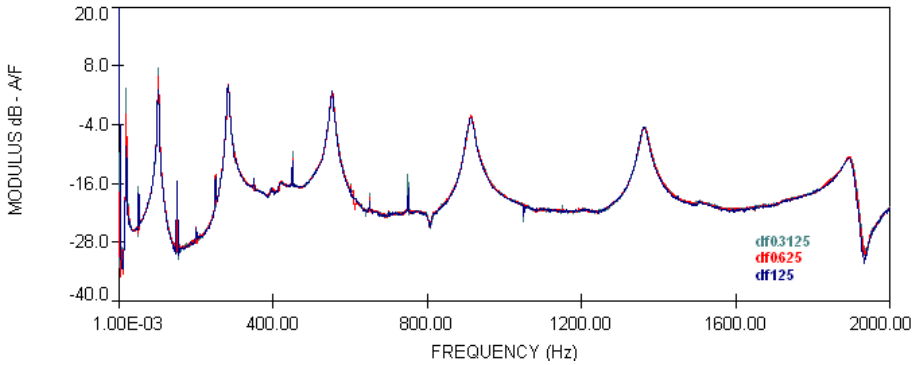
Şekil 4.10: İki taraftan sönümlü numunenin Δf=0.3125 Hz çözünürlükteki FTF'si.

Tekrarlanabilirliği kontrol etmek amacıyla yapılan üç ölçümün sonucu Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Tekrarlanabilirlik iyi olarak sağlanmıştır.



Şekil 4.11: BSD1'in Δf=0.3125 Hz çözünürlükteki tekrarlanabilirliği.

Farklı frekans çözünürlükleriyle elde edilen FTF'ler Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Frekans çözünürlüğünün iki taraftan sönümlü numune için de FTF'lerin tepe noktalarını değiştirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12: BSD1'in Δf=0.3125 Hz, Δf=0.625 Hz ve Δf=1.25 Hz çözünürlükteki FTF'leri

Elde edilen FTF'lerin analizi yapılarak aşağıdaki çizelgelerdeki doğal frekans ve kayıp faktörü değerleri elde edilmiştir. Aşağıdaki çizelgelerde iki taraftan sönümlü numunenin farklı frekans çözünürlükleri ve farklı analiz yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 : BSD1'in Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_m (Hz)	η_m (%)	f_m (Hz)	η_m (%)	f_m (Hz)	η_m (%)	f_m (Hz)	η_m (%)
2	102.50	2.81	102.04	4.36	101.37	1.98	101.97	3.050
3	282.50	1.96	282.15	2.04	282.75	1.91	282.47	1.971
4	552.50	1.57	552.42	1.89	552.51	1.85	552.47	1.769
5	912.50	1.92	911.54	1.95	912.11	1.96	912.05	1.941
6	1361.67	1.63	1362.00	1.72	1362.15	1.63	1361.94	1.658

Çizelge 4.14 : BSD1'in Δf=0.625 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_m (Hz)	η_m (%)	f_m (Hz)	η_m (%)	f_m (Hz)	η_m (%)	f_m (Hz)	η_m (%)
2	101.66	2.03	101.69	2.52	101.55	1.92	101.63	2.158
3	283.12	2.03	282.88	2.01	282.84	1.87	282.94	1.971
4	552.50	1.89	553.29	1.74	552.69	1.84	552.83	1.821
5	912.71	1.67	912.21	1.83	912.87	1.87	912.59	1.792
6	1362.92	1.63			1362.61	1.68	1362.77	1.651

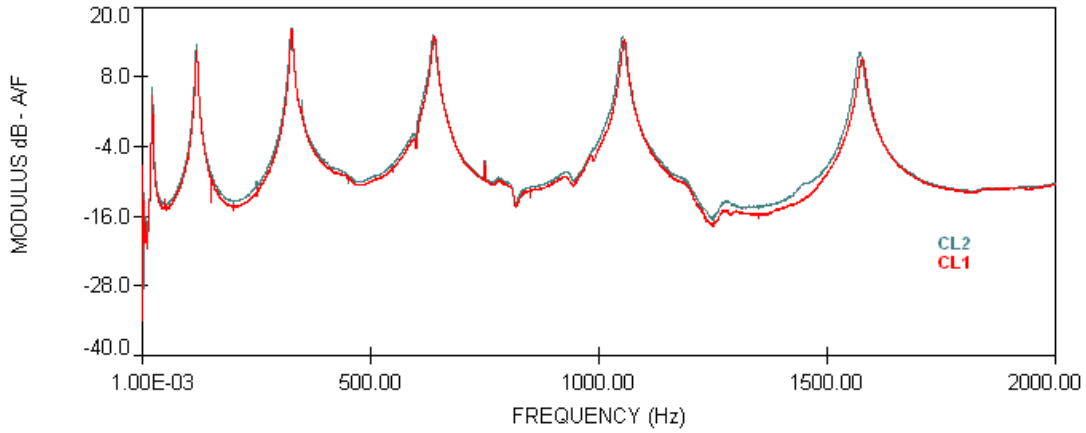
Çizelge 4.15 : BSD1'in Δf=0.3125 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri.

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f (Hz)	η (%)	f (Hz)	η (%)	f (Hz)	η (%)	f (Hz)	η (%)
2	101.35	1.61	101.42	1.77	101.49	1.57	101.42	1.649
3	282.29	1.62	282.21	1.83	282.97	1.86	282.49	1.768
4	551.67	1.50	552.50	1.88	552.90	1.77	552.36	1.714
5	909.79	1.56			913.35	1.84	911.57	1.698
6	1359.12	1.27			1364.16	1.59	1361.64	1.428

Frekans çözünürlüğündeki küçülmenin belirlenen kayıp faktörleri değerlerini de küçülttüğü görülmüştür.

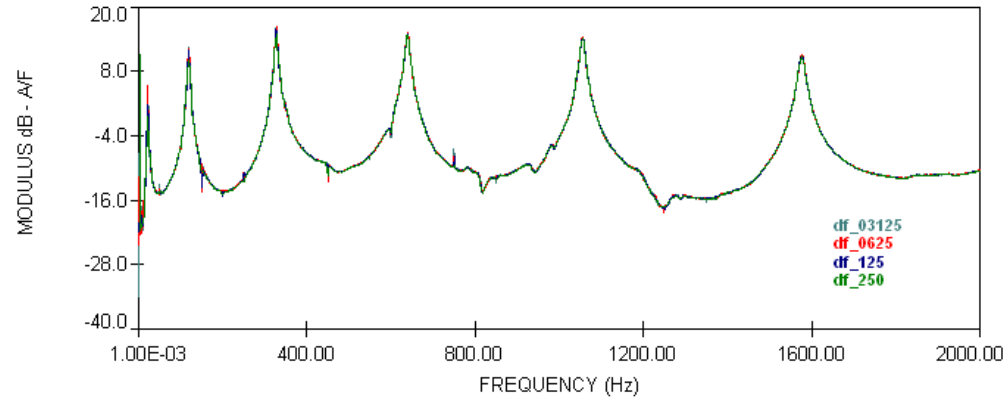
4.2.3 Sandviç numuneler

Eğilme yönünde aktif etkileri olan parametreler belirlendikten sonra, kayma yönündeki etkilerin belirlenmesi için sandviç tipi numuneler hazırlanmıştır. Alt ve üst kiriş ile sönüm malzemesinin kalınlığı 1 mm olarak kullanılmıştır. Birbiriyle "eş" iki numune için elde edilen FTF'leri aşağıda gibidir.

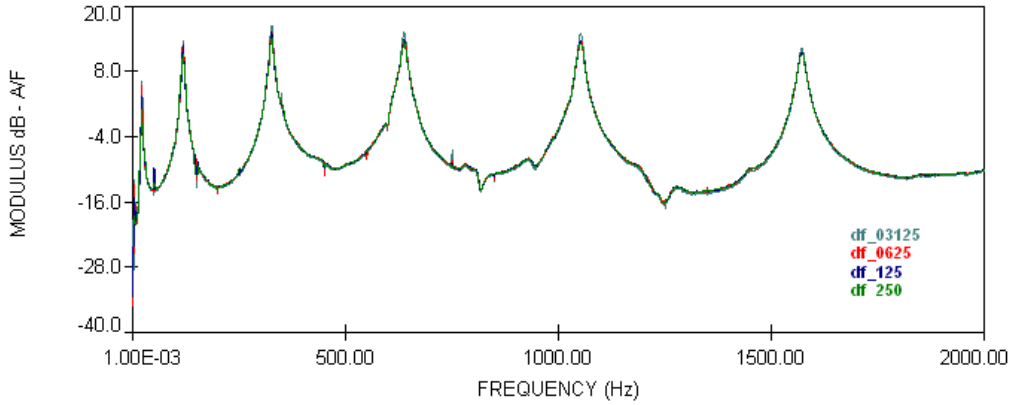


Şekil 4.13: Sandviç yapıların Δf=0.3125 Hz'deki FTFsi

Deneylerin tekrarlanabilirlikleri incelendiğinde sonuçlar yine birbirine çok yakın çıkmıştır. Farklı frekans çözünürlükleri için elde edilen FTF'ler aşağıdaki Şekil 4.14'te üst üste çizdirilmiştir.



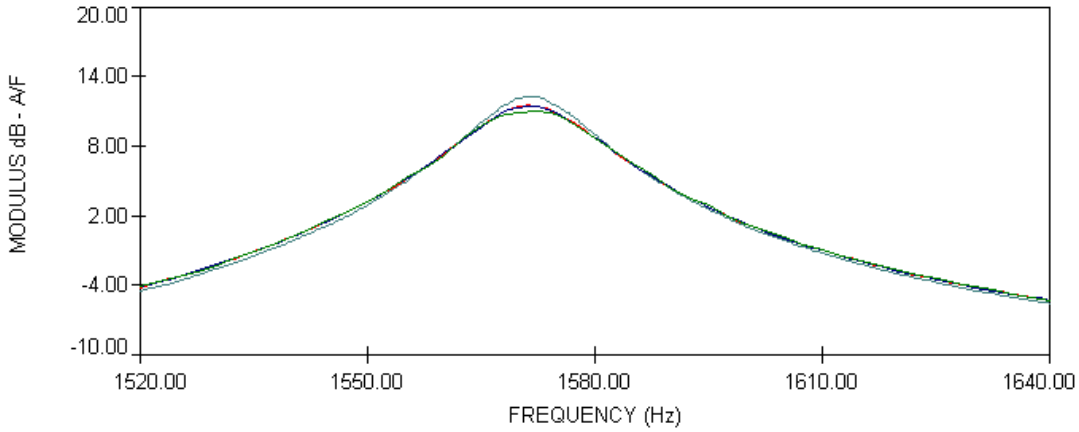
(a) CL1



(b) CL2

Şekil 4.14: Sandviç yapıların farklı çözünürlükteki FTF'leri.

Bu grafiklere yakından bakılırsa örneğin CL2 için aşağıda görülebileceği gibi frekans çözünürlükleri diğer konfigurasyonla karşılaştırıldığında çok fark yaratmamıştır.



Şekil 4.15: CL2'nin altıncı moduna yakından bakış.

Yukarıdaki FTF'leri kullanarak üç analiz yöntemiyle kompozit yapının doğal frekans ve kayıp faktörleri elde edilmiştir. Sonuçlar aşağıdaki çizelgelerdedir. CL1 numunesiyle eş olarak üretilen CL2 numunesi için de sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.16 : CL1'in Δf=2.5 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)
2	119.6	5.79	119.6	5.21	118.7	4.3	119.3	5.11
3	327.5	2.33	327.0	2.51	326.8	2.3	327.1	2.39
4	638.8	1.90	639.4	1.88	639.4	1.9	639.2	1.90
5	1055.8	1.22	1055.5	1.28	1055.2	1.2	1055.5	1.25
6	1575.4	1.03	1575.6	1.18	1576.2	1.1	1575.7	1.10

Çizelge 4.17 : CL1'in Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)
2	118.8	4.3	119.6	4.4	118.9	4.3	119.1	4.31
3	327.1	2.2	327.1	2.3	326.9	2.0	327.1	2.17
4	638.8	1.8	638.9	1.8	639.2	1.8	639.0	1.81
5	1055.0	1.3	1055.2	1.2	1055.1	1.1	1055.1	1.18
6	1575.8	1.0	1576.3	1.1	1576.4	1.0	1576.2	1.04

Çizelge 4.18 : CL1'in Δf=0.625 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)
2	119.2	4.01	118.9	4.08	118.8	4.0	119.0	4.04
3	327.5	1.80	327.1	1.99	327.1	2.0	327.2	1.94
4	639.4	1.55	439.6	1.68	639.3	1.7	572.8	1.64
5	1055.4	1.19	1054.9	1.16	1055.2	1.2	1055.2	1.17
6	1576.3	1.07	1574.7	1.08	1576.2	1.0	1575.7	1.06

Çizelge 4.19 : CL1'in Δf=0.3125 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)
2	118.8	3.87	119.0	4.00	118.9	4.0	118.9	3.96
3	326.9	1.90	326.9	2.04	327.0	2.0	326.9	1.98
4	639.2	1.57	639.3	1.63	639.0	1.7	639.1	1.63
5	1055.0	0.94	1054.4	1.10	1055.3	1.2	1055.1	1.06
6	1576.8	0.87			1576.3	1.0	1576.5	0.94

Çizelge 4.20 : CL2'in Δf=2.5 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)
2	117.5	6.4	118.8	5.4	118.1	4.5	118.1	5.4
3	326.7	3.2	325.7	3.5	325.5	2.7	326.0	3.1
4	637.5	2.4	638.1	2.7	637.2	2.4	637.6	2.5
5	1051.7	1.6	1051.9	1.6	1052.2	1.4	1051.9	1.5
6	1571.7	1.3	1571.4	1.2	1571.1	1.2	1571.4	1.2

Çizelge 4.21 : CL2'in Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)
2	118.8	4.5	118.1	5.3	118.2	4.3	118.4	4.7
3	326.3	2.7	326.1	2.8	325.9	2.6	326.1	2.7
4	636.7	2.0	637.8	2.3	637.7	2.2	637.4	2.2
5	1051.3	1.4	1051.8	1.5	1051.6	1.4	1051.6	1.4
6	1571.7	1.1	1572.0	1.1	1571.2	1.2	1571.6	1.1

Çizelge 4.22 : CL2'in Δf=0.625 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)
2	118.5	4.6	118.1	4.4	118.3	4.1	118.3	4.4
3	326.0	2.5	326.1	2.5	325.9	2.6	326.0	2.6
4	637.9	2.0	637.4	2.3	637.9	2.2	637.7	2.2
5	1052.1	1.5	1051.5	1.4	1051.9	1.5	1051.8	1.4
6	1571.3	1.1	1570.8	1.0	1571.1	1.2	1571.0	1.1

Çizelge 4.23 : CL2'in Δf=0.3125 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

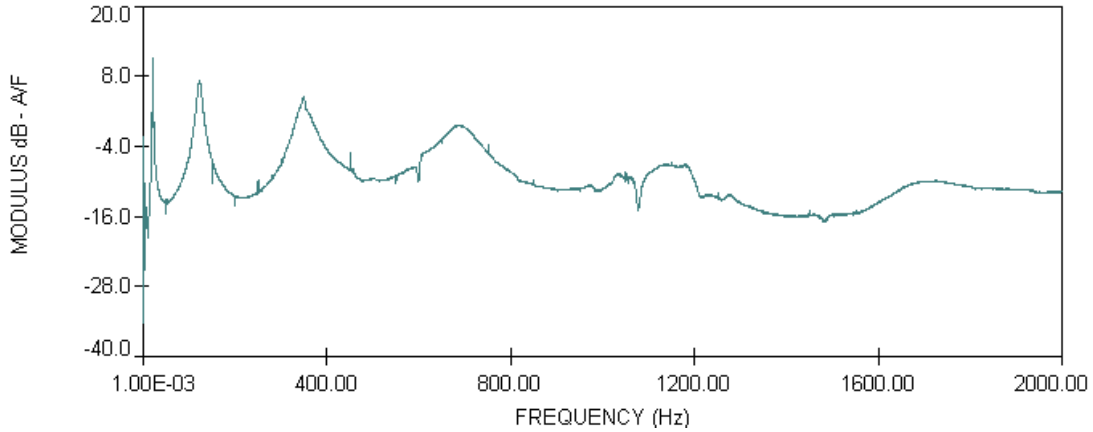
	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)	f_s (Hz)	η_s (%)
2	118.4	4.4	118.3	4.0	118.2	4.0	118.3	4.1
3	325.6	2.3	326.0	2.2	326.0	2.4	325.9	2.4
4	637.5	1.8			637.3	2.0	637.4	1.9
5	1052.5	1.2			1051.2	1.3	1051.7	1.3
6	1571.6	0.9	1570.3	1.0	1571.0	1.1	1571.1	1.1

4.3 İkinci Sönüm Malzemesin Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Tez kapsamında CATSİS firmasından alınan, yoğunluğu ρ_{dm} = 1460 kg/m^3 olan Bitum içeren ikinci bir sönüm malzemesinin malzeme özellikleri incelenmiştir.

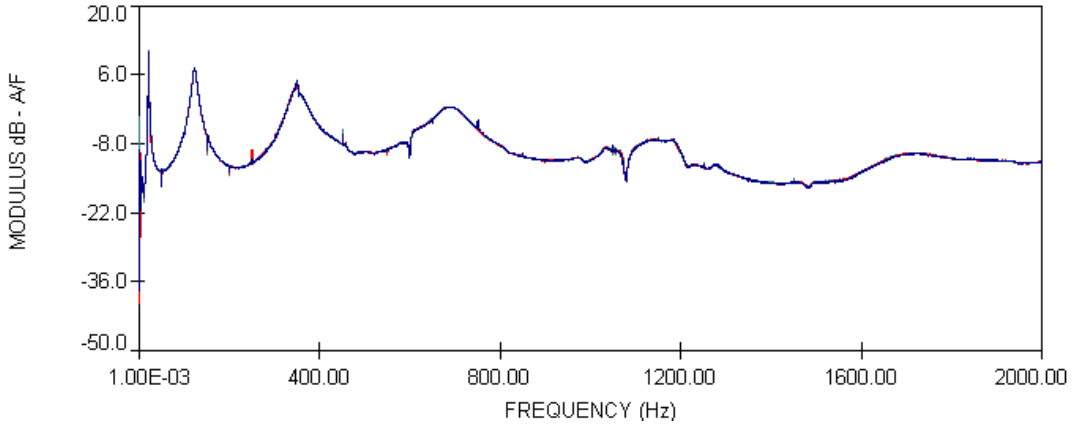
4.3.1 Tek taraftan sönümlü numune ölçümleri

İkinci sönüm malzemesinin eğilme yönündeki mekanik özelliklerini belirlemek için çalışmalara tek taraftan sönümlü numune hazırlanarak başlanmıştır. Sönüm malzemesi L_d=202 mm ve çıplak kirişin üzerine tam oturacak genişlikte (w=10 mm) hazırlanarak, çıplak kiriş üzerine yapıştırılmıştır. Ölçümler için aktif boy L=203 mm olarak belirlenmiştir. İkinci sönüm malzemesinin kalınlığı h=2 mm'dir. Hazırlanan numuneler bu sefer 5 farklı çözünürlükte ölçülmüştür, bunlar Δf=0.3125 Hz, Δf=0.625 Hz , Δf=1.25 Hz, Δf=2.50 Hz, Δf=5.0 Hz'dir. Elde edilen FTF'lerin bir kısmı aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

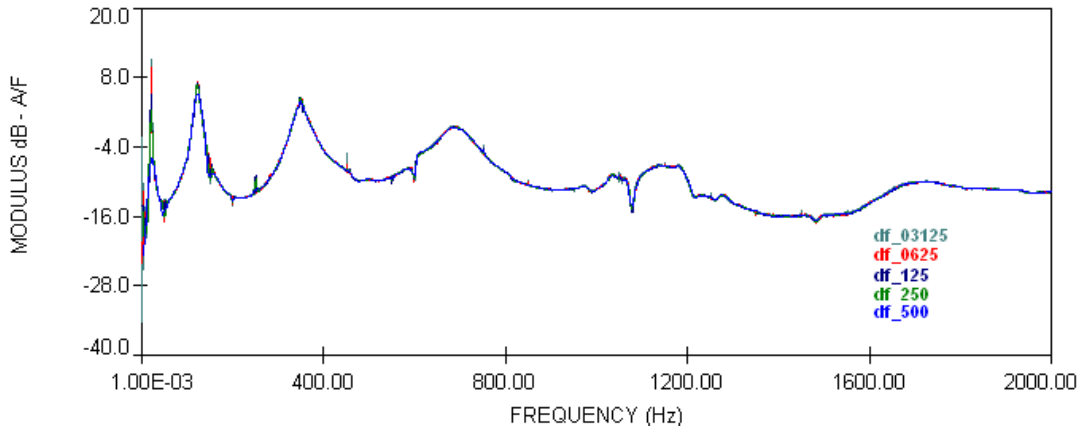


Şekil 4.16: İkinci sönüm malzemesiyle hazırlanan tek taraftan sönümlü numune (FL7) için Δf=0.3125 Hz çözünürlüğüyle elde edilen FTF.

Görüldüğü üzere diğer sönüm malzemesiyle hazırlanan numunelere göre daha sönümlü bir yapı oluşmuştur ve 5. ile 6. mod kolay seçilememektedir. Beş frekans çözünürlüğü ile elde edilen FTF'ler Şekil 4.18'de üst üste çizilmiştir.

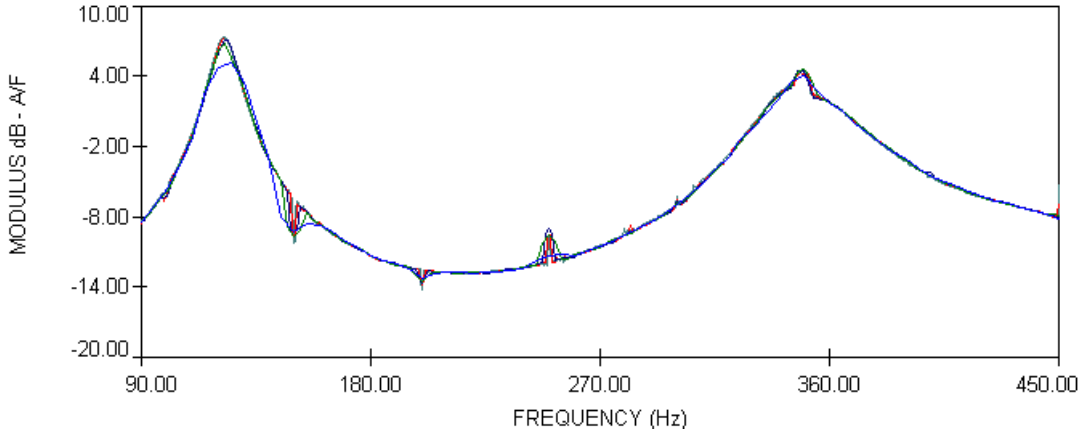


Şekil 4.17: FL7 için Δf=0.3125 Hz tekrarlanabilirlik testi.



Şekil 4.18: FL7'nin 5 frekans için FTF'leri.

Frekans çözünürlüğüne göre FTF'lerin önceki numunelerde olduğu gibi tepelerinin değiştiği görülmektedir. Yakından bakıldığında aşağıdaki şekilden bu etki daha iyi görülebilir. Şekil 4.19'da ilk modlar için farklı frekans çözünürlüklerindeki FTF'ler gösterilmiştir. Bu şekilden görülen diğer bir etki 50 Hz'ün katlarındaki spektrum bozulmalardır. Bu gürültüler elektrik şebekesinin 50 Hz olan frekansından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.19: FL7'nin farklı frekans çözünürlüklerinde FTFlere yakın bakış.

Elde edilen FTF'ler analiz edilmeye çalışılmış, "ince" çözünürlüklerde ikinci, üçüncü ve dördüncü mod analiz edilememiştir. Δf=5.0 Hz, Δf=2.5 Hz, Δf=1.25 Hz frekans çözünürlüklerindeki FTF'lerin analiziyle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Sonuçlara göre ikinci sönüm malzemesiyle hazırlanan numunelerin sönüm seviyeleri (kayıp faktörleri) birinci sönüm malzemesine göre daha yüksektir. Tek taraftan sönümlü numunenin kayıp faktörleri değerleri %10 civarındadır. Kayıp faktörlerinin değerleri frekans çözünürlüğündeki azalmayla beraber azalmaktadır.

Çizelge 4.24 : FL7'nin Δf=5.0 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri.

	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	125.0	6.5	124.1	13.0	125.2	10.3	124.8	9.9
3	350.0	6.5	347.7	11.4	348.1	10.2	348.6	9.4
4	688.3	6.5	687.7	13.1	691.5	13.9	689.2	11.1

Çizelge 4.25 : FL7'nin Δf=2.5 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

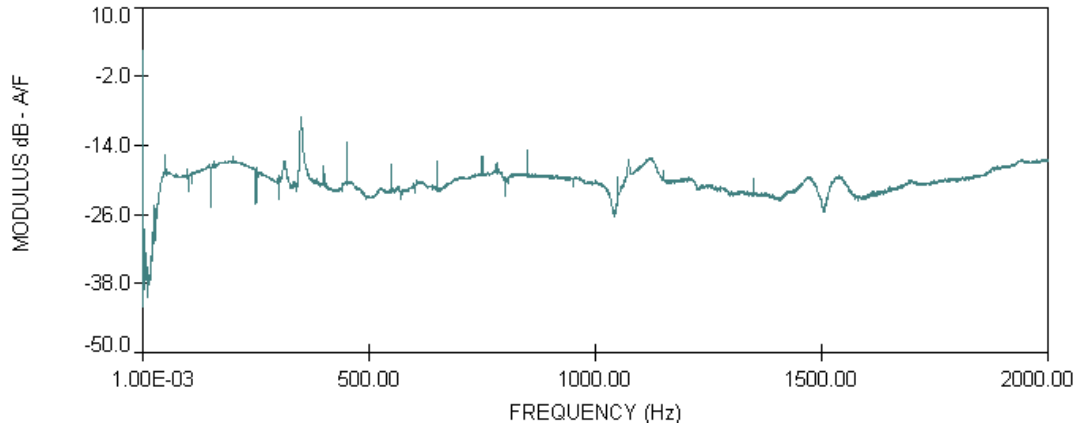
	Yarı Güç		**Daire Uydurma**		**Çizgi Uydurma**		**Ortalama**	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	122.5	6.5	122.6	11.1	122.6	9.4	122.6	9.0
3	349.2	5.1	349.8	10.4	346.6	10.7	348.5	8.8
4	689.2	6.5	684.3	12.6	689.4	12.9	688.1	10.3

Çizelge 4.26 : FL7'nin Δf=1.25 Hz ile yapılan ölçüm sonucu doğal frekans ve sönüm değerleri

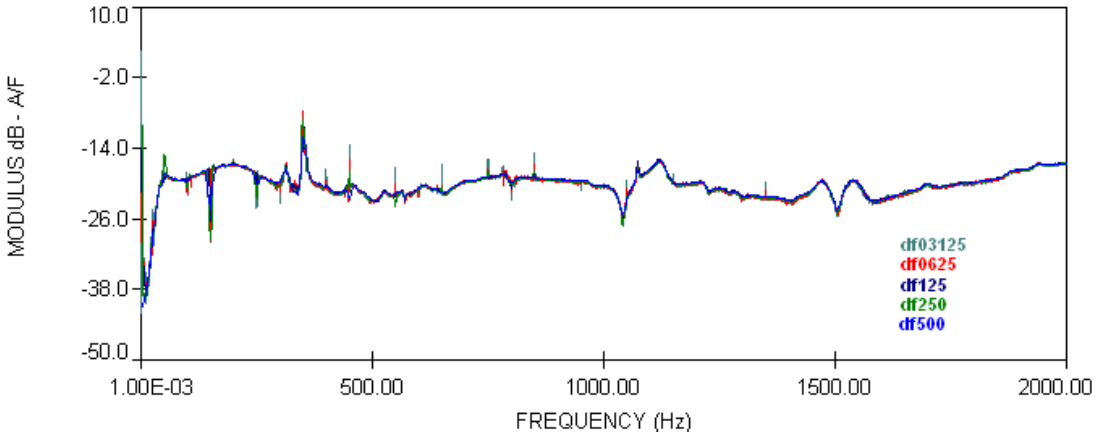
	Yarı Güç		Daire Uydurma		Çizgi Uydurma		Ortalama	
Mod	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)	f_c (Hz)	η_c (%)
2	122.9	6.5	122.1	9.5	122.5	9.2	122.5	8.4
3	348.8	4.4	349.4	10.1	345.5	9.2	347.9	8.0
4	688.8	6.5	684.0	11.0	682.9	11.7	685.2	10.0

4.3.2 Sandviç numuneler

Kayma modülü ve kayma kayıp faktörünü belirlemek için sandviç tipi numuneler hazırlanmış ve ölçümleri yapılmıştır. Üst ve alt katmanlar 1 mm kalınlıktaki çelikten, ara katman 2 mm kalınlıktaki sönüm malzemesinden oluşmaktadır. Birbiriyle "eş" iki sandviç numune hazırlanmış, bunlar CL4 ve CL5 olarak isimlendirilmiştir. Bu numuneler 5 farklı frekans çözünürlüğünde ölçümler yapılmıştır. Bunlar; Δf=0.3125 Hz, Δf=0.625 Hz, Δf=1.25 Hz, Δf=2.5 Hz ve Δf=5.0 Hz'dir.

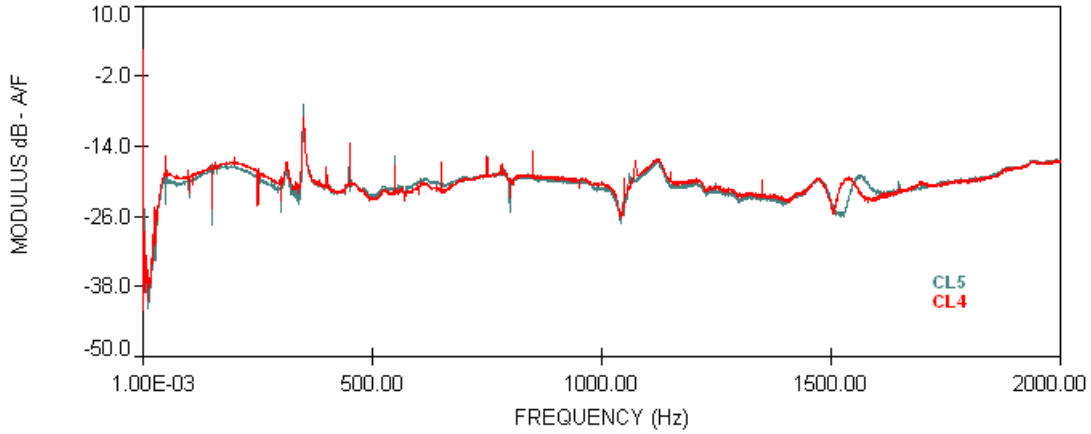


Şekil 4.20: CL4 için Δf=0.3125 Hz'deki FTF.



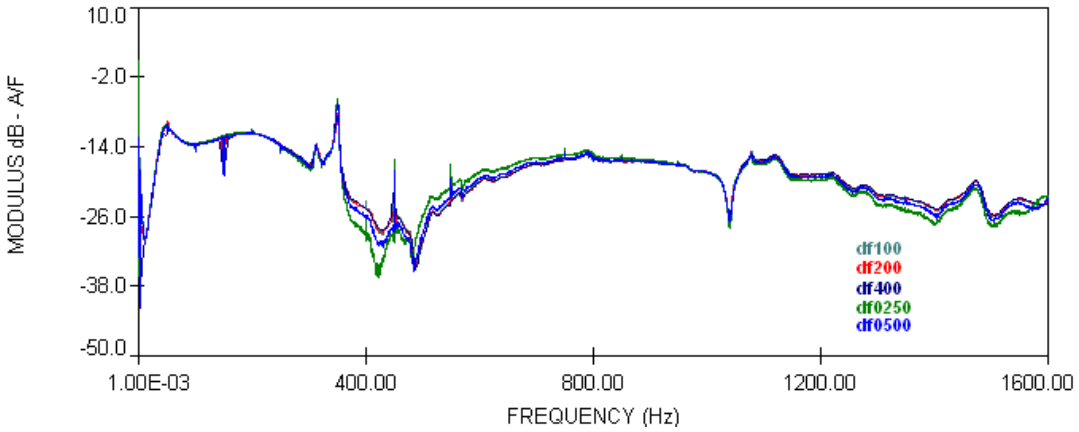
Şekil 4.21: CL4'ün farklı frekans çözünürlüklerindeki FTF'leri.

Şekil 4.20'de sandviç yapılı CL4 numunesinin Δf=0.3125 Hz çözünürlük ile elde edilen FTFsi gösterilmiştir. Beş farklı çözünürlük ile elde edilen FTF'ler Şekil 4.21'de çizilmiştir. Daha önce bahsedilen elektrik şebekesinin problem olduğu 50 Hz ve katlarındaki gürültüler bu grafikte de belirlenmiştir. CL4 için ilgilenilen frekans aralığında doğal frekansları belirleyecek tepeler görülememiştir. CL5 için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. İki numune üst üste çizdirildiğinde Şekil 4.22 elde edilmiştir.

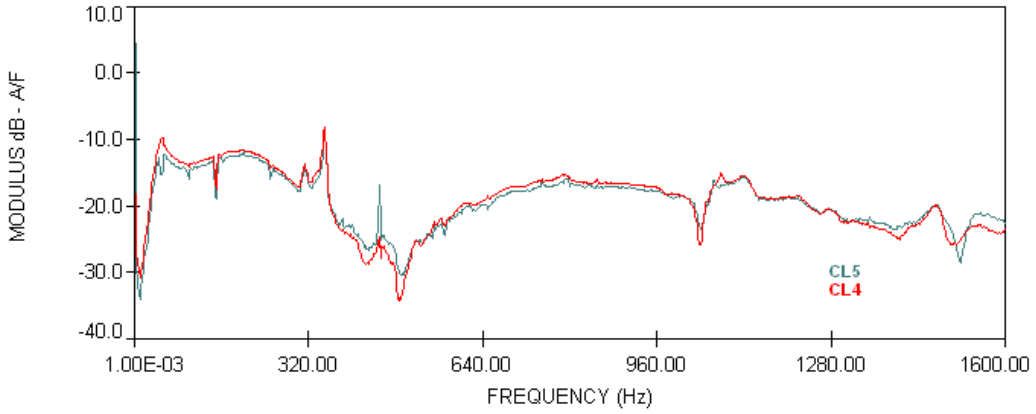


Şekil 4.22:CL4 ve CL5 in Δf=0.3125 Hz'deki FTF'leri.

Şekilde görüldüğü gibi iki numune yaklaşık eş olarak oluşturulabilmiştir. Mod şekillerinin görülebilmesi için kirişin manyetik alan etkisi altındaki uzunluğu arttırılmıştır. Bu uzunluk yaklaşık iki katına çıkarıldığında FTF'ler aşağıdaki resimdeki hali almıştır.

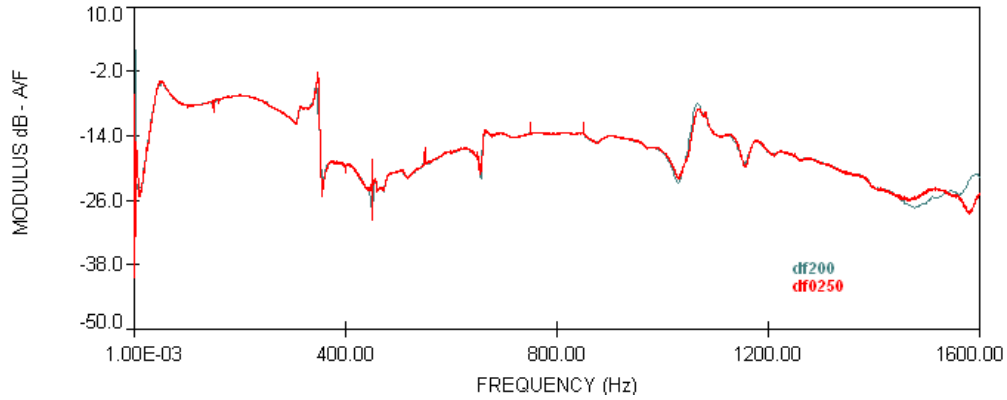


Şekil 4.23: CL4 için manyetik etki altındaki uzunluk arttırıldığında FTF'ler.



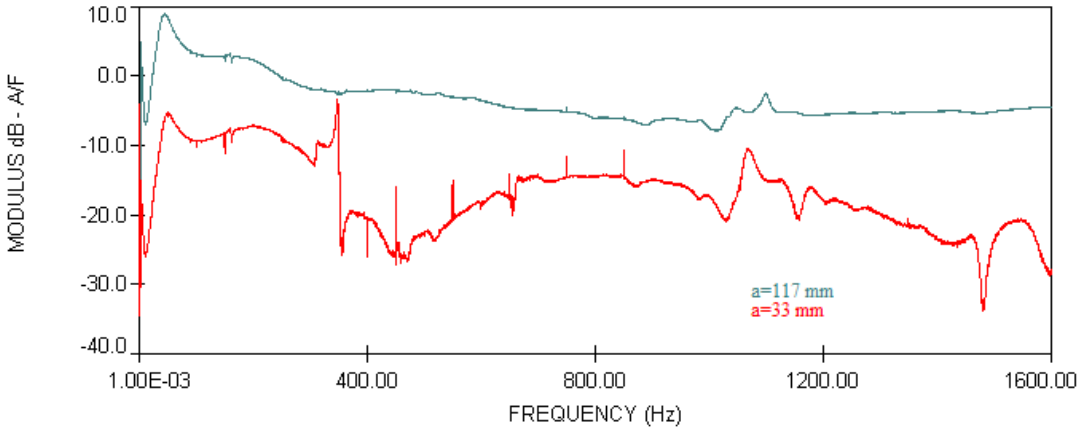
Şekil 4.24: CL4 ve CL5 in manyetik etki uzunluk arttırıldığında çıkrığında Δf=2.0 Hz çönürlükteki FTF'leri.

Manyetik etki altındaki uzunluk maksimum değerine çıkarılmış ve yeniden ölçümler yapılmıştır, ancak bu ölçümler sonucunda da aşağıdaki grafikten görülebileceği gibi mod şekillerinin belirlenebileceği veriler yine elde edilememiştir.



Şekil 4.25: CL4 için manyetik etki altındaki uzunluk maksimumken Δf=2.0 ve Δf=0.250 iken FTFler.

CL5 için de durum aynı şekildedir. Manyetik titreşim algılayıcısının yeri değiştirilerek kökten a=117 mm uzaklığa taşınmış ve ölçümler tekrar yapılmıştır. İki algılayıcı mesafesiyle CL5 için en "ince" frekans çözünürlüğü olan Δf=0.25 Hz'de yapılan test sonuçları aşağıdaki grafikte verilmiştir.



Şekil 4.26: CL5 için algılayıcı iki farklı konumdayken elde edilen FTFler.

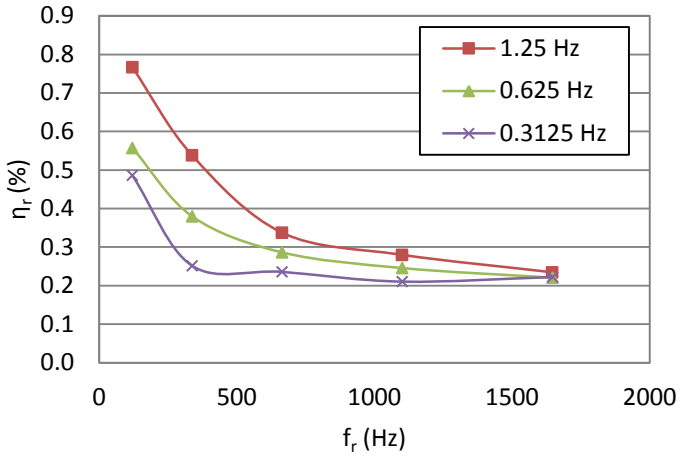
Deneysel sonuçlara bakıldığında birçok parametrenin sonuçları etkilediği ve malzeme özellikleri hesaplanırken farklı sonuçlara neden olacağı görülmektedir. En doğru malzeme sonuçlarını elde etmek için frekans çözünürlüğü, analiz yöntemi ve manyetik alan etkisi altındaki uzunluğun sonuçları nasıl etkilediğinin incelenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

4.4 Deney Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde Oberst kiriş yöntemi ile sönüm malzemelerinin özellikleri belirlenirken deney sonuçlarını etkileyecek değişkenlerden olan frekans çözünürlüğü, analiz yöntemi ve manyetik tahrik altındaki çubuk uzunluğu incelenmiştir.

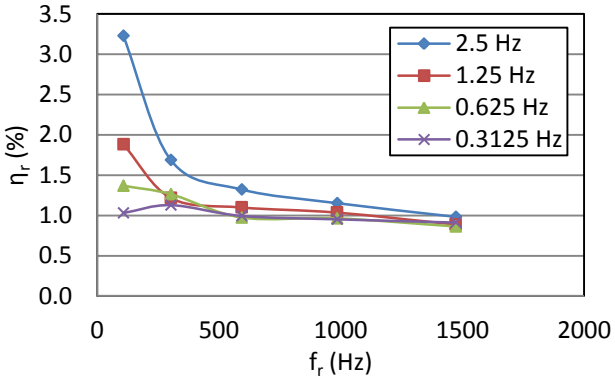
4.4.1 Frekans çözünürlüğünün etkileri

Daha önceki bölümlerde farklı çözünürlüklerde bir çok farklı numune için yapılan deneylerin sonuçları gösterilmiştir. Frekans çözünürlüğü FTF'lerin ölçüm sıklığını belirleyerek okunan değerleri değiştirmektedir. Bu etkiyi incelemek için farklı analiz yöntemlerinin ortalama değerleri kullanılarak, farklı frekanslar için analiz edilen değerler grafikler halinde verilmiştir. 1 numaralı sönüm malzemesi ile yapılan deneyler için ilk olarak çıplak kiriş incelenmiştir. Şekil 4.27'de farklı çözünürlüklerdeki analizler sonucu elde edilen kayıp faktörleri (η_r) doğal frekanslara (f_r) göre çizilmiştir.

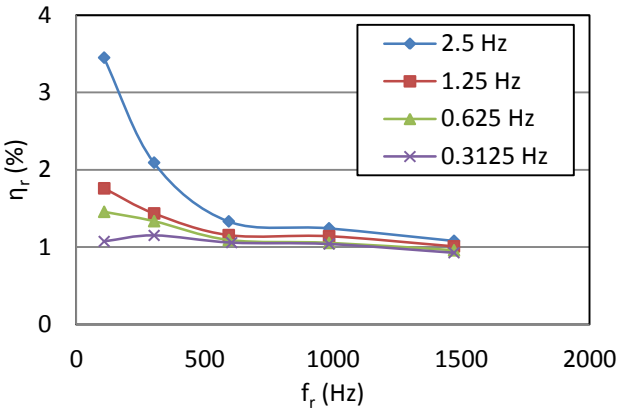


Şekil 4.27: Çıplak kiriş için frekans çözünürlüğünün kayıp faktörü üzerindeki etkisi.

Benzer şekilde, grafikler tek taraftan sönümlü, çift taraftan sönümlü ve sandviç numuneler sonuçlarından hareketle de çizilerek sırasıyla Şekil 4.28 , Şekil 4.29, Şekil 4.30 da verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere değişik frekans çözünürlüklerinde özellikle ilk modların değerleri birbirinden çok sapmaktadır. Mod numarası arttıkça sapma miktarı azalmakta değerler birbirine yakınsamaktadır. Bu sebeple en ince frekans çözünürlüğü seçilmesi öngörülmektedir. Ancak çok ince frekans çözünürlüklerinde yüksek modların analizi bazen zorlaşmaktadır. Önerilen bir yöntem olarak ilk birkaç düşük mod için çok iyi bir frekans çözünürlüğü, diğer modlar için biraz daha kaba bir frekans çözünürlüğü kullanımı öngörülmüştür.

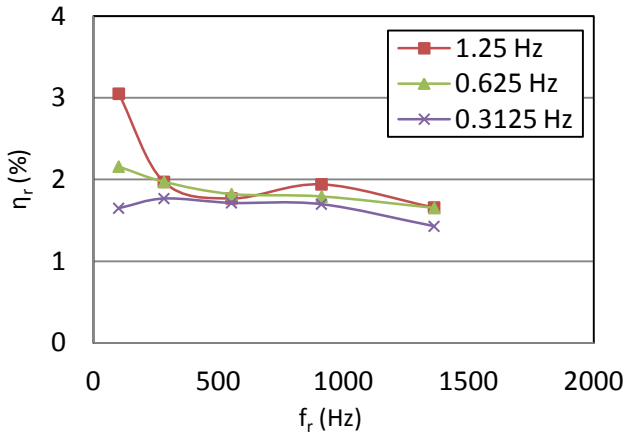


(a) FL1

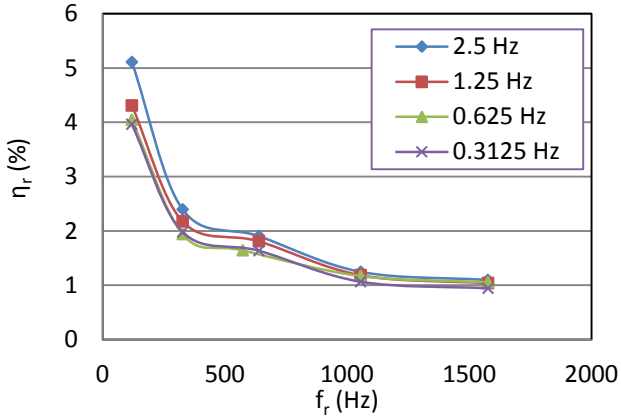


(b) FL2

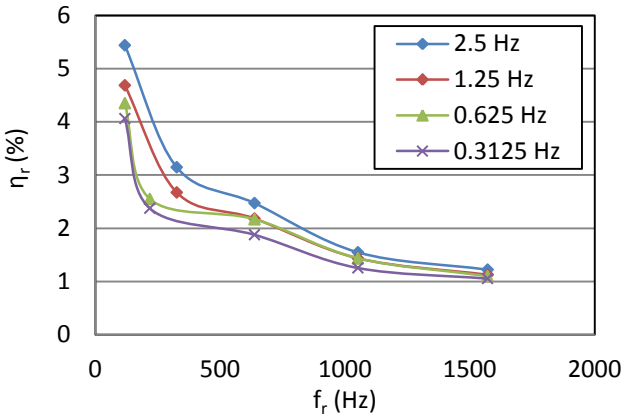
Şekil 4.28: Tek taraftan sönümlü numunler için frekans çözünürlüğü etkilerinin incelenmesi.



Şekil 4.29: Çift taraftan sönümlü numune için frekans çözünürlüğü etkisi.



(a) CL1

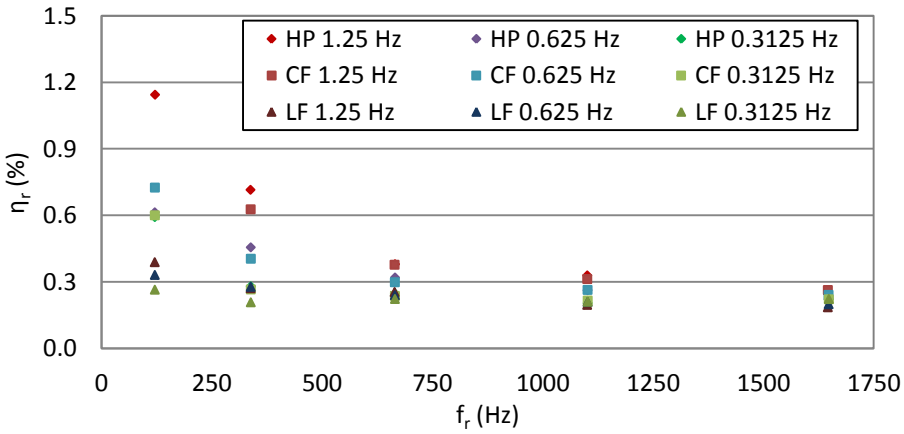


(b) CL2

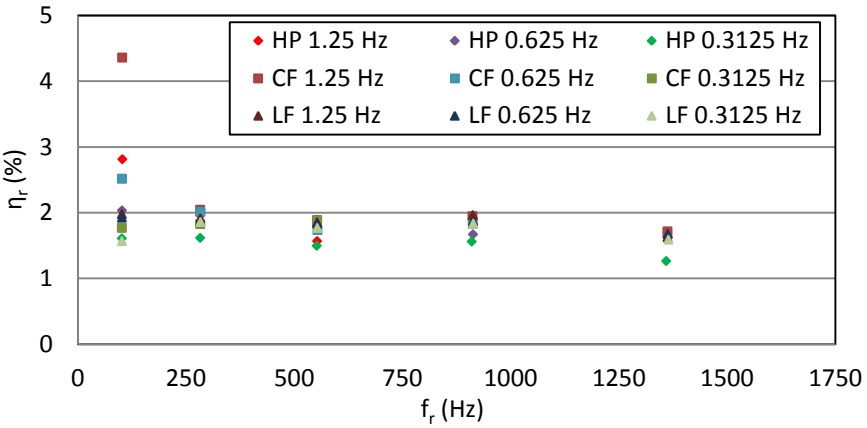
Şekil 4.30: Sandviç yapıların frekans çözünürlüğü etkilerinin incelenmesi.

4.4.2 Analiz metodunun etkisi

Tek serbestlik dereceli sistemlerin analizi için tez kapsamında kullanılan üç yöntem : Yarı-güç, Daire uydurma ve Çizgi Uydurma yöntemleridir. Bunlar grafiklerle incelerken İngilizce baş harflerinin kısaltmaları (sırasıyla HP, CF, LF) olarak gösterilmiştir. Üç frekans çözünürlüğüne ve üç analiz yöntemine göre çıplak kiriş ve birinci sönüm malzemesiyle hazırlanan çift taraftan (serbest katman) sönümlü numuneler için ölçülen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur.

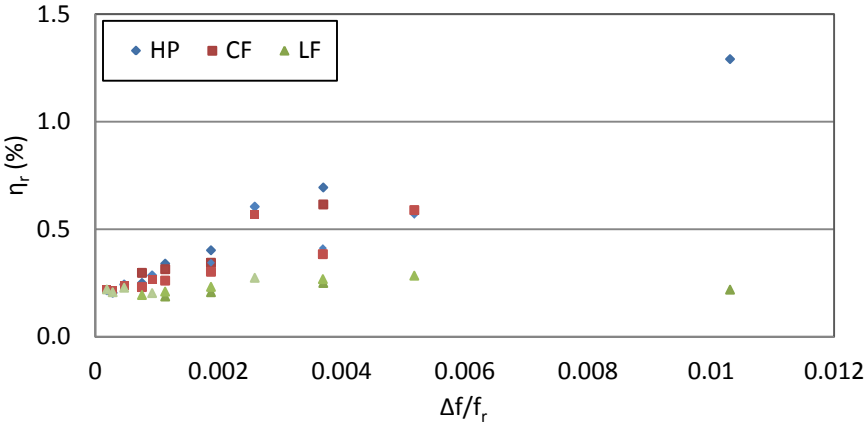


Şekil 4.31: Çıplak kiriş için yöntem grafikleri.

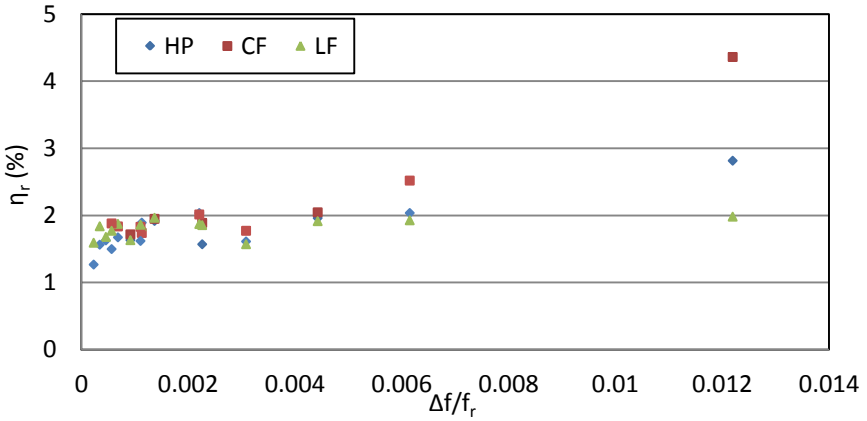


Şekil 4.32: Çift taraftan sönümlü numune için yöntem grafikleri.

Grafikler incelendiğinde bazı frekans çözünürlüklerinde Daire uydurma yöntemiyle sönüm değerlerinin elde edilemediği görülebilir. Yöntemlerin etkisini frekans çözünürlüğünden biraz daha ayrı gözlemleyebilmek için normalize frekans oranı adı verilen yeni bir parametre tanımlanmıştır ($\Delta f/f$). Bu yeni parametreyi kullanarak yine çelik ve birinci sönüm malzemesiyle hazırlanan çift taraftan sönümlü kiriş için sonuçlar Şekil 4.33 ve Şekil 4.34 çizilmiştir.



Şekil 4.33: Çıplak kirişin Δf/f e karşılık kayıp faktörü grafiği.

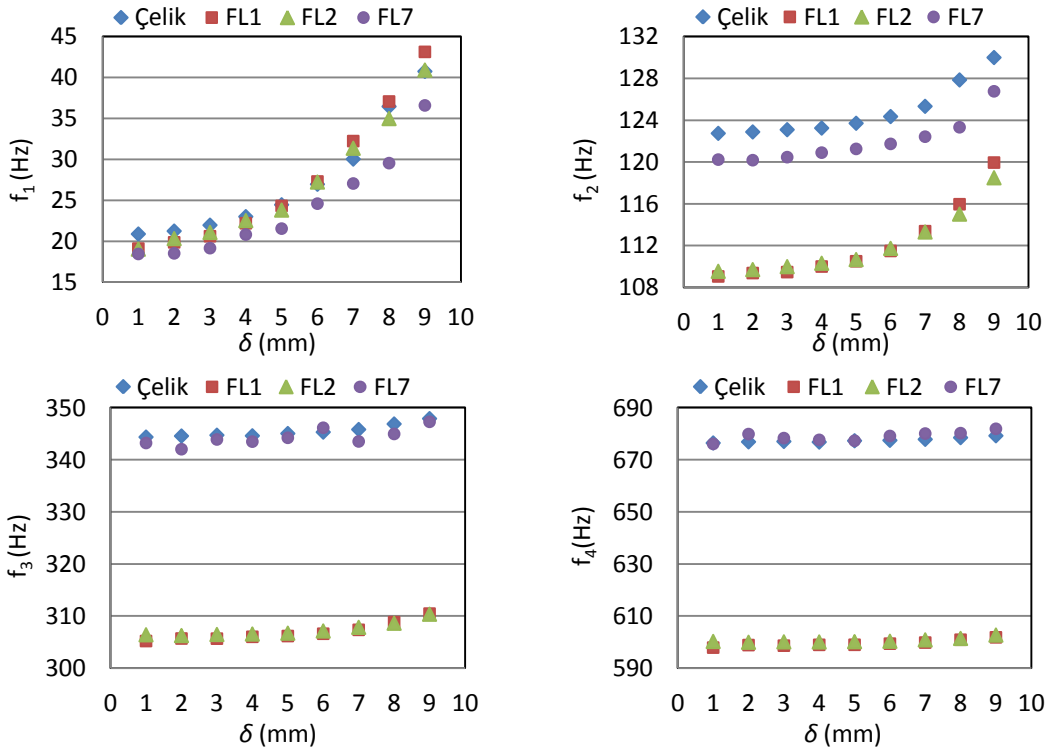


Şekil 4.34: BSD1'in Δf/f e karşılık kayıp faktörü grafiği.

Sonuçlar incelendiğinde normalize frekans oranı 0.01'den büyük olduğu durumlarda Yarı-güç ve Daire uydurma yöntemlerinin iyi sonuç vermediği görülmektedir. Öte yandan çıplak kirişin malzeme özelliklerinin frekansa bağlı olarak değişmediği ve sönüm faktörünün düşük olması gerektiği bilindiğinden, bu şartları en iyi sağlayan yöntem Çizgi uydurma yöntemi olarak belirlenmiştir.

4.4.3 Manyetik tahrik altındaki uzunluğun etkisi

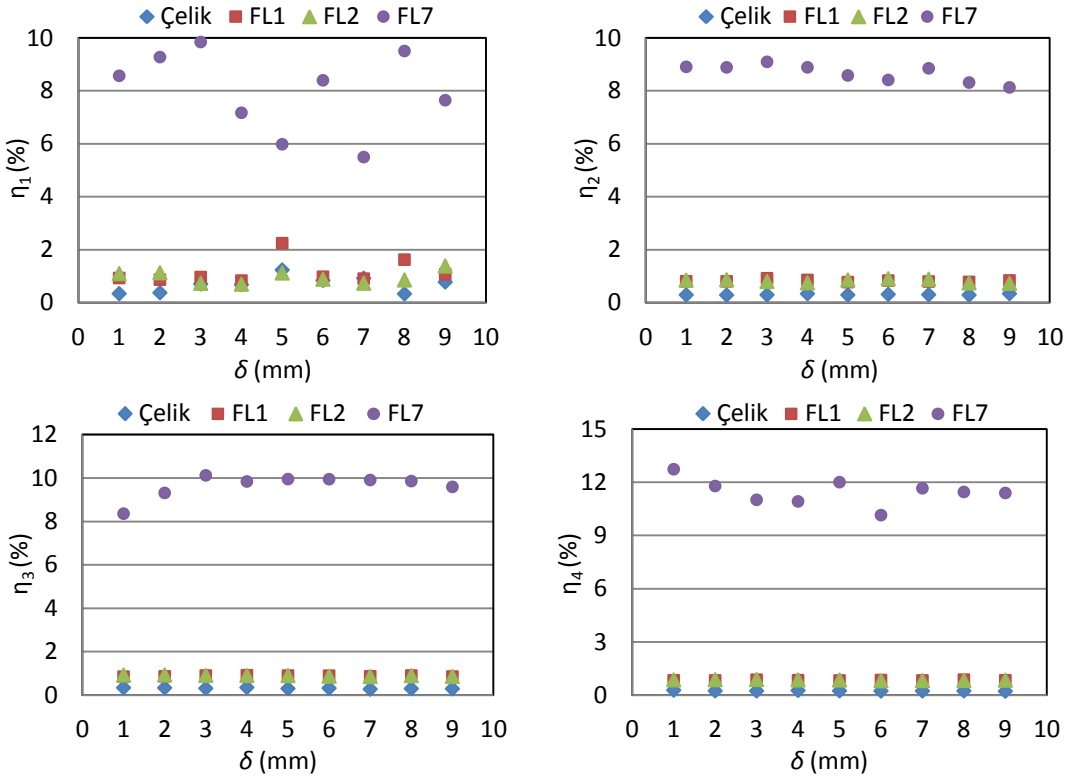
Oberst kiriş yöntemindeki manyetik tahrik altındaki bölgenin uzunluğunun modal parametreler üzerindeki etkisi son zamanlarda bir kaç çalışmada incelenmiştir [10,11,35]. Tez kapsamında yapılan çalışmada çıplak kiriş, birinci sönüm malzemesiyle hazırlanan tek taraftan sönümlü numuneler ve ikinci sönüm malzemesiyle hazırlanan tek taraftan sönümlü numune için, manyetik tahrik altındaki uzunluk δ=1-9 mm arası değiştirilerek ölçümler yapılmış, yapılan ölçümler çizgi uydurma yöntemiyle analiz edilerek doğal frekanslar (f_r) ve kayıp faktörleri (η_r) elde edilmiştir. İlk dört mod şekli için doğal frekansların girinti uzunluğu δ'ya bağlı değişimi aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 4.35: Çıplak kiriş ve sönüm malzemeleriyle hazırlanan numunelerin belirlenen doğal frekansları.

Görüldüğü gibi özellikle ilk iki mod için tahrik sisteminin ölçüme eklediği lineer olmayan bir davranış söz konusudur. Körük ve Şanlıtürk bu etkiyi test çubuğunun ucuna bağlı lineer olmayan bir yay şeklinde modellemişlerdir [35].

Aşağıdaki grafikte, dört mod şekli için belirlenen kayıp faktörlerinin δ'ya bağlı olarak değişimleri gösterilmiştir (Şekil 4.36). Grafiklerde 1. Mod için değerler verilmiş olsa da, bu mod şekli malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmamalıdır. İlk mod şekli için bulunan kayıp faktörlerinin uyumsuz davranışları bu modun belirlenmesi sırasında karşılaşılan zorluklardan kaynaklanmaktadır. Diğer mod şekillerinde ise δ değişkenine bağlı olarak belirlenen kayıp faktörlerinin çok bir artım ya da azalım göstermediği belirlenmiştir. Buna göre kayıp faktörlerinin manyetik etki altındaki uzunluğuna bağlı olarak değişmediği söylenebilir. Grafikteki küçük farklılıkların sönümün karakterinden, çizgi uydurma yönteminin hassaslığından, malzemenin sertleşmesinden, vb. etkilerden kaynaklandığı kabul edilmiştir.



Şekil 4.36: Çıplak kiriş ve sönüm malzemeleriyle hazırlanan numunelerin belirlenen kayıp faktörleri.

Netice itibariyle, temassız tahrik sisteminin test sırasında sisteme eklediği sönüm ihmal edilebilecek seviyelerdedir. Ayrıca, bütün numuneler için frekans üzerindeki nonlineer etkinin mod numarası arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu yönelimin bir nedeni , düşük mod numaralarına sahip doğal frekansların elektromanyetik etkiden

kaynaklanan numunenin ucundaki ek katılığa daha duyarlı olması olarak açıklanabilir. Düşük modlardaki uç yer değiştirmelerinin daha fazla olması sebebiyle, lineer olmayan yayın daha sert tepki vermesi bir diğer neden olarak gösterilebilir.

4.5 Malzeme Özelliklerinin Hesaplanması

Farklı frekans çözünürlüklerine, analiz yöntemlerine ve manyetik etki altındaki uzunluk değerlerine göre; her numune için en uygun değerler seçilerek standarttaki hesaplamalar yapılmıştır.

Çelikler için sönüm seviyelerinin % 0.2 ve ya daha düşük olacağı bilinmektedir [6]. Bu bilgiye göre değerlere bakıldığında en uygun değerlerin Çizgi Uydurma yöntemiyle elde edildiği görülmektedir. En iyi (hassas) çözünürlükteki yani Δf=0.3125 Hz'deki Çizgi uydurma yöntemine göre belirlenen bu doğal frekansları kullanarak MATLAB yardımıya çıplak kirişin doğal frekanslarındaki Elastisite modülleri hesaplanmış ve Çizelge 4.27 de verilmiştir.

Çizelge 4.27 : Çelik kirişin Elastik Modülü.

f (Hz)	E (GPa)
120.70	198.36
338.20	198.61
664.79	199.86
1101.58	200.8
1647.97	201.4

Çelik malzemeler için Elastisite modülünün değerinin frekansla değişmemesi beklenir. Yapılan hesaplamalarda yaklaşık olarak bu durum elde edilmiştir. Çubuğun sönüm değerleri aynı frekans çözünürlüğündeki Çizgi Uydurma Yöntemi ile elde edilen sönüm değerleri olarak kabul edilmiştir.

Tek taraftan sönümlü numuneler (FL1 ve FL2) için yapılan hesaplamalar sonucu bu konfigürasyonun, yöntemdeki tedbirlerden $(f_c/f_n)^2(1+DT) \geq 1.01$ koşulunu sağlamadığı için güvenilir sonuçlar elde edilememiştir.

Çift taraftan sönümlü numune (BSD1) için yapılan hesaplamalarla birinci sönüm malzemesinin Elastisite modülü ve kayıp faktörü belirlenmiştir. Farklı frekans çözünürlükleriyle elde edilen ve farklı analiz yöntemleri ile belirlenen malzeme özellikleri aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4.28 : Birinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 frekans çözünürlüğü ile yapılan test sonucu belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri.

	Yarı-Güç		Daire Uydurma		Çizgi Uydurma	
Mod	***E* (MPa)**	***η* (%)**	***E* (MPa)**	***η* (%)**	***E* (MPa)**	***η* (%)**
2	591.78	39.04	518.15	68.56	411.51	38.69
3	326.2	47.86	306.47	52.89	340.3	44.78
4	247.03	50.42	244.73	61.25	247.32	59.35
5	196.29	77.46	179.64	85.79	189.52	81.83
6	156.49	82.32	160.32	84.83	162.06	79.54

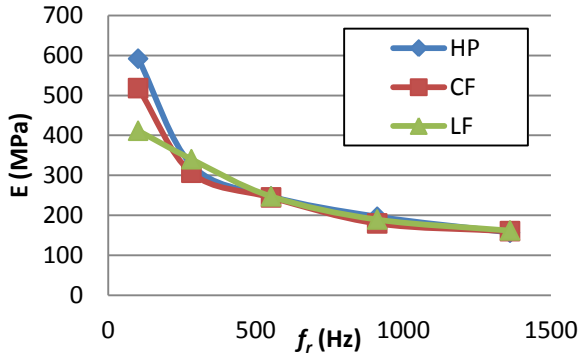
Çizelge 4.29 : Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.625 frekans çözünürlüğü ile yapılan test sonucu belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri.

	Yarı-Güç		Daire Uydurma		Çizgi Uydurma	
Mod	***E* (MPa)**	***η* (%)**	***E* (MPa)**	***η* (%)**	***E* (MPa)**	***η* (%)**
2	457.58	35.88	462.4	44.1	440.09	35.2
3	361.2	44.96	347.6	46.18	345.38	43.23
4	247.03	60.7	269.7	51.33	252.49	57.86
5	199.94	66.18	191.3	75.73	202.72	73.12
6	171	75.47			167.4	79.42

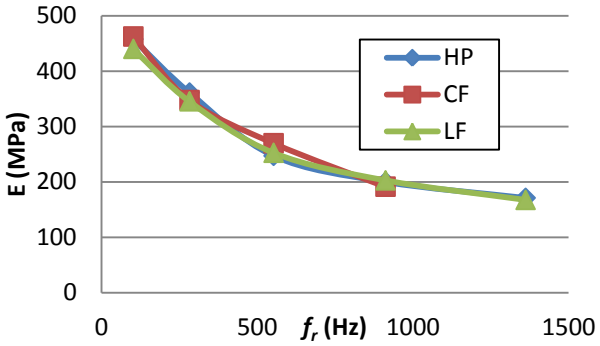
Çizelge 4.30 : Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.3125 frekans çözünürlüğü ile yapılan test sonucu belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri.

	Yarı-Güç		Daire Uydurma		Çizgi Uydurma	
Mod	***E* (MPa)**	***η* (%)**	***E* (MPa)**	***η* (%)**	***E* (MPa)**	***η* (%)**
2	408.34	31.69	419.4	33.96	430.56	29.39
3	314.36	40.99	309.9	46.95	352.72	42.14
4	223.21	53.16	247	60.38	258.52	54.4
5	149.32	82.25			211.05	69.17
6	126.92	78.78			185.42	68.02

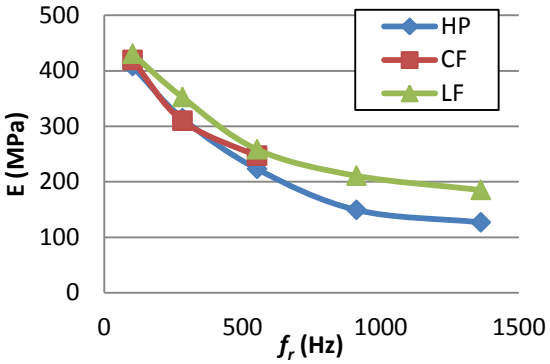
Çizelgeler incelendiğinde, farklı frekans çözünürlüğü ve analiz yönteminin belirlenen malzeme özelliklerinde farklılık yarattığı görülmektedir. Daire Uydurma Yöntemi ile Δf=0.625 ve Δf=0.3125 frekans çözünürlüklerinde başarısız olmuş,doğal frekans ve kayıp faktörleri değerleri elde edilememiştir. Elastisite modülünün doğal frekans ile değişimi, farklı frekans çözünürlüğü ve analiz yöntemi ile olan ilişkisi Şekil 4.37, 4.38 ve 4.39 da sunulmuştur.



Şekil 4.37: Birinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri.



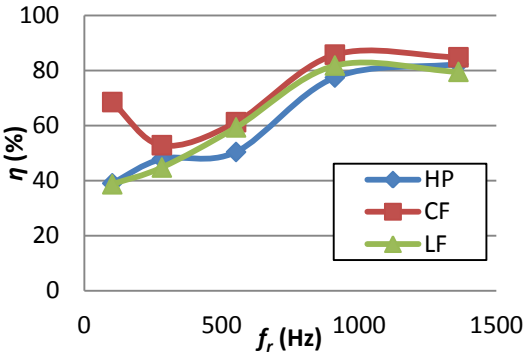
Şekil 4.38: Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.625 frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri.



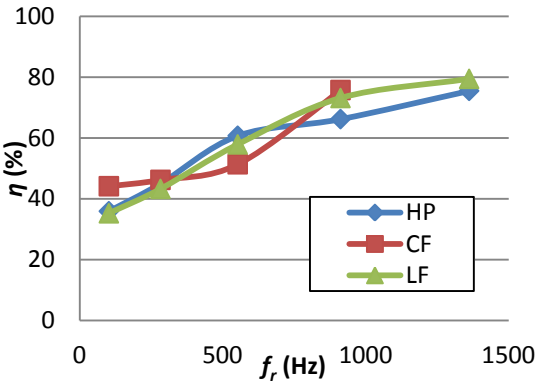
Şekil 4.39: Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.3125 frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri.

Yukarıdaki şekillerde görüldüğü üzere tüm analiz yöntemleri ile elde edilen Elastisite modülü tüm grafiklerde frekans artışıyla beraber azalım göstermekdir. Bu durum klasik viskoelastik malzeme davranışı ile uyumlu değildir. Bu durumun malzemenin yapıştırılması ve/veya titreşim genliğine bağlı lineer olmayan davranışından kaynaklanabileceği düşünülmektedir ve ileride yapılması önerilen çalışmalardan birisidir. Daha önceki analizlerden elde edilen deneyimlere göre çizgi uydurma

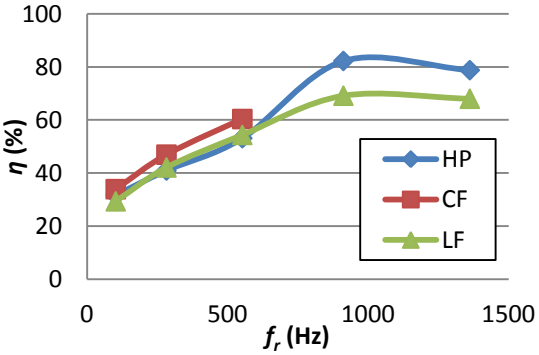
yöntemiyle elde edilen sonuçların daha güvenilir olduğu söylenebilir. Kayıp faktörlerinin belirlenen değerleri için doğal frekanslara karşılık grafikleri de aşağıda verilmiştir. Bu grafiklere bakıldığında kayıp faktörü eğrilerinin yöneliminin yarı güç ve daire uydurma yöntemleri için, farklı frekans çözünürlüklerinde bir miktar farklı davrandığı görülmüştür. Fakat çizgi uydurma yöntemiyle elde edilen eğriler bütün çözünürlüklerde benzer yönelimler göstermektedir.



Şekil 4.40: Birinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri.



Şekil 4.41: Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.625 frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri.



Şekil 4.42: Birinci sönüm malzemesinin Δf=0.3125 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri.

Çizelgelerden hareketle hesaplamalarda Çizgi Uydurma yöntemi ile belirlenen değerlerden ikinci mod için Δf=0.3125 Hz çözünürlük ile elde edilen değerler, diğer modlar için Δf=0.625 Hz çözünürlük ile elde edilen değerler kullanılmıştır. Sonuç olarak belirlenen malzeme özellikleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.31 : Birinci sönüm malzemesinin eğilme yönündeki malzeme özellikleri.

Mod no.	*f* (Hz)	*E* (MPa)	η_{dm} (%)
2	101.55	433.7	30.53
3	282.84	346.1	43.15
4	552.69	253.0	57.75
5	912.87	203.2	72.90
6	1362.61	167.9	79.17

Yukarıda da belirtildiği gibi, sönüm malzemesinin Elastisite modülü frekansa bağlı olarak azalmaktadır. Ancak, ırken, kayıp faktörü tipik viskoelastik malzeme davranışı sergilemekte, frekansa bağlı olarak artmaktadır.

Sönüm malzemesinin kayma modülü ve kayma yönündeki kayıp faktörünü bulmak için sandviç tipi numuneler test edilmiştir. Sandviç tipi numuneler (CL1 ve CL2) için yapılan hesaplamalarda, yine en ince çözünürlük olan Δf=0.3125 Hz'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.32 : Birinci sönüm malzemesinin kayma yönündeki malzeme özellikleri.

CL1				*CL2*			
Mod no.	*f* (Hz)	*G* (KPa)	η_{dm} (%)	*Mod no.*	*f* (Hz)	*G* (KPa)	η_{dm} (%)
2	118.9	16.262	49.45	2	118.212	15.843	50.63
3	327.0	25.003	43.15	3	325.896	26.939	48.26
4	639.0	36.943	48.27	4	637.502	41.555	50.75
5	1055.3	49.63	41.8	5	1051.397	52.979	42.52
6	1576.3	66.848	38.61	6	1570.804	74.564	38.21

Görüldüğü gibi, hesaplanan kayma modülü (G) değerleri malzemenin elastik modülüne kıyasla çok düşük seviyededir. Dolayısıyla tabloda görülen değerlerin malzemenin gerçek özelliklerini yansıtmadığı düşünülmektedir. Bu sonuçların, numune hazırlanırken katmanların birbirine iyi yapışamamasından ya da yapıştırıcıdan kaynaklanmış olabileceği sanılmaktadır. Numune hazırlama ve yapıştırma etkilerinin daha detaylı incelenmesine ihtiyaç vardır.

İkinci Sönüm malzemesiyle hazırlanan tek taraftan sönümlü (serbest katman) numuneyle yapılan deneylerin sonucunda belirlenen değerler aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4.33 : İkinci sönüm malzemesinin Δf=5 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılan test sonucu belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri.

	Yarı-Güç		Daire Uydurma		Çizgi Uydurma	
Mod	***E* (GPa)**	***η* (%)**	***E* (GPa)**	***η* (%)**	***E* (GPa)**	***η* (%)**
2	1.2859	23.35	1.2197	48.48	1.3007	36.71
3	1.2774	23.5	1.217	42.65	1.2275	37.93
4	1.287	23.49	1.2789	47.56	1.3304	49.09

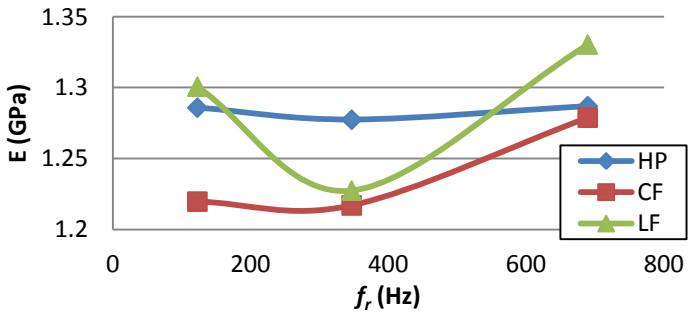
Çizelge 4.34 : İkinci sönüm malzemesinin Δf=2.5 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılan test sonucu belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri.

	Yarı-Güç		Daire Uydurma		Çizgi Uydurma	
Mod	***E* (GPa)**	***η* (%)**	***E* (GPa)**	***η* (%)**	***E* (GPa)**	***η* (%)**
2	1.1033	26.06	1.1105	44.29	1.1105	37.5
3	1.2564	18.66	1.2722	37.71	1.1882	40.72
4	1.2992	23.34	1.2331	46.93	1.3019	46.25

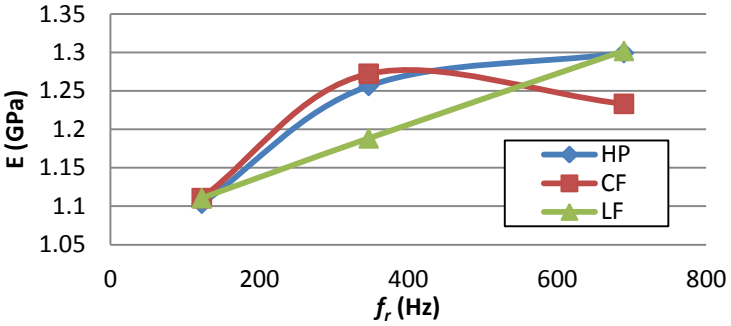
Çizelge 4.35 : İkinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 Hz frekans çözünürlüğü ile yapılan test sonucu belirlenen eğilme yönündeki malzeme özellikleri.

	Yarı-Güç		Daire Uydurma		Çizgi Uydurma	
Mod	***E* (GPa)**	***η* (%)**	***E* (GPa)**	***η* (%)**	***E* (GPa)**	***η* (%)**
2	1.1322	25.57	1.0744	38.83	1.1033	36.88
3	1.2458	16.19	1.2616	36.84	1.1596	35.64
4	1.2938	23.41	1.2291	41.07	1.2143	44.06

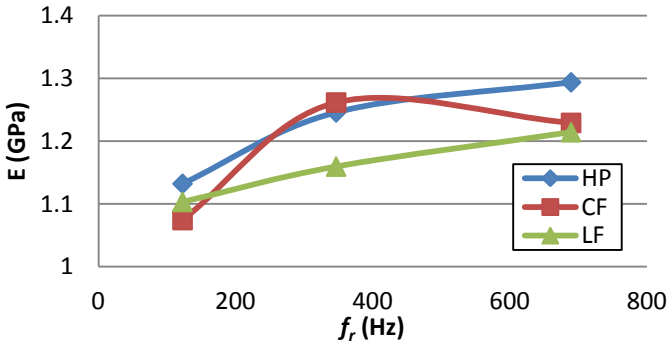
Bu çizelgelerdeki sonuçlara göre Elastisite modülü değerleri farklı analiz yöntemi kullanıldığında birbirine yakın Elastisite modülü değerleri elde edilmesine karşın, kayıp faktörleri ciddi farklılık göstermektedir. Belirlenen Elastisite modülü değerlerinin doğal frekans ile değişimi aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur. 5 Hz yüksek frekans çözünürlüğüyle elde edilen eğriler, düşük çözünürlüklü olanlardan oldukça farklıdır. Frekans ile birlikte Elastisite Modülünün değerinin artması viskoelastik malzemeler için beklenen bir özelliktir. Bu özelliği en iyi yansıtan analiz yöntemi çizgi uydurma yöntemidir.



Şekil 4.43: İkinci sönüm malzemesinin Δf=5 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri.

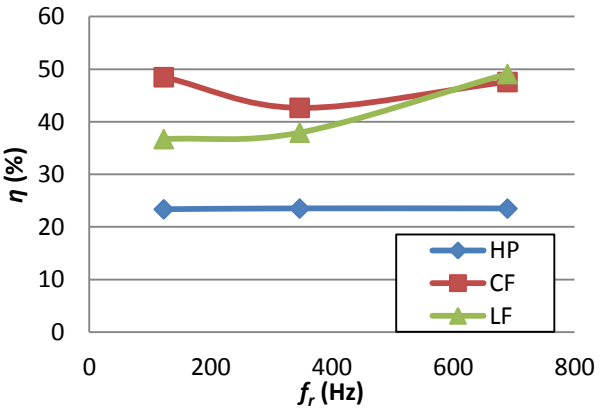


Şekil 4.44: İkinci sönüm malzemesinin Δf=2.5 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri.

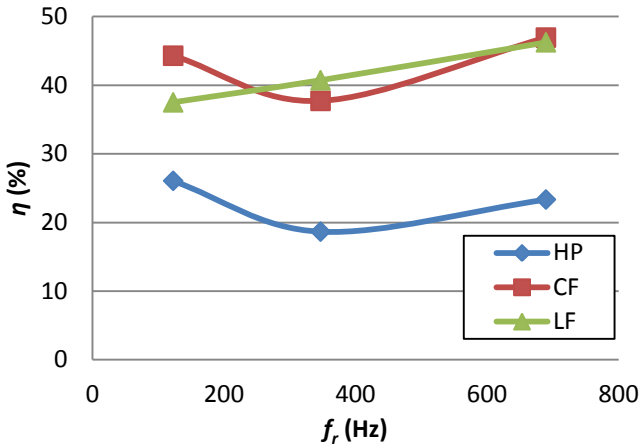


Şekil 4.45: İkinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen Elastisite Modülü değerleri.

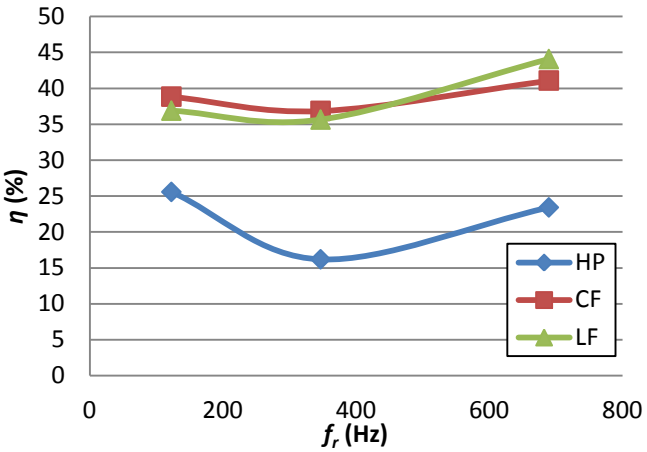
Kayıp faktörleri de bir öncekine benzer şekilde aşağıdaki grafiklerde çizilmiştir.



Şekil 4.46: İkinci sönüm malzemesinin Δf=5 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri.



Şekil 4.47: İkinci sönüm malzemesinin Δf=2.5 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri.



Şekil 4.48: İkinci sönüm malzemesinin Δf=1.25 Hz frekans çözünürlüğü ile belirlenen kayıp faktörü değerleri.

Yarı-güç Yöntemi'nde görülen düşük değerler yanıltıcıdır. Çünkü yüksek sönüm değerlerinde analiz programı bu yöntem için doğru sonuç vermemektedir.

Belirlenen değerlerden Δf=2.5 Hz çözünürlükteki değerlerin kullanılması uygun bulunmuştur. Buna göre frekans bandında görülebilen 3 mod için hesaplanan malzeme özellikleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.36 : İkinci sönüm malzemesinin eğilme yönündeki malzeme özellikleri.

Mod no.	*f* (Hz)	*E* (MPa)	η_{dm} (%)
2	122.59	1109.6	37.51
3	346.64	1189.3	40.88
4	689.36	1301.3	46.10

İkinci sönüm malzemesi için frekans arttıkça Elastisite modülünün değeri ve kayıp faktörünün değeri de artmaktadır. Sandviç yapıda hazırlanan numunelerin deneyleri sonucunda yapının doğal frekansları ve kayıp faktörleri belirlenemediğinden malzemenin kayma yönündeki özellikleri hesaplanamamıştır.

5. VİSKOELASTİK MALZEMELİ YAPILARIN MODELLENMESİ

Sonlu elemanlar yaklaşımı günümüzde, endüstiride deney maliyetlerini düşürmek, nihai tasarıma karar vermeden önce yol gösterici olmak, zaman ve iş gücü tasarrufu etmek gibi yararlarından dolayı, özellikle araştırma geliştirme ve tasarım birimlerinde sıkça kullanılmaktadır. Bu kullanım ticari programlar sayesinde olmaktadır. Ancak yapılar için geliştirilen sonlu elemanlar ve bu elemanlar kullanılarak yapılan analizler teorik olarak gelişime ihtiyaç duymaktadır. Bu bölümde yapılan çalışmalarda viskoelastik sönüm malzemesi barındıran basit yapıların modellenmesi ve modellerin deneylerle doğrulanması hedeflenmiştir.

5.1 Vizkoelastik Sönüm Malzemeli Sonlu Eleman Modeli

Çok katmanlı kompozit yapıları özelliklerini barındıracak tek bir katman halinde modellemek tercih edilen bir yöntemdir [34] ve bu yöntem aktif serbestlik dereceleri sayısını yükseltmemek gibi bir avantaja sahiptir. Teorik model ise her katmanın özelliklerini ve katmanların nasıl uygulandığına bağlıdır. Tez kapsamında kullanılacak olan model Şanlıtürk ve Körük tarafından geliştirilmiş olup, üst üste konan tekil düz kabuk tip katmanları göz önüne alarak, herhangi bir kabuk elemanın kompozit eleman oluşturmak için kullanılmasına olanak vermektedir [9]. Ayrıca bu elemanın delme serbestlik derecesi θ_z ye sahip oluğunu belirtmekte fayda vardır. Sönüm karakteristiğine sahip her katmanın karmaşık direngenlik matrisi $\mathbf{k}_{si}$* ve kütle matrisleri $\mathbf{m}_{si}$'dir. Katmanların birbirlerine tamamen bağlı olduğu kabulüyle kompozit elemanın geometrisi oluşturulmuştur. Tarafsız eksenden olan uzaklıklarına göre her malzeme için gerekli geometrik parametreler hesaplanır. Her katmanın tarafsız düzlemden ötelemesi z_i'dir [9]. Önce her katmanın direngenlik ve kütle matrisleri, katmanlar tarafsız düzlemdeymiş gibi hesaplanır. Daha sonra kompozit yapı içerisinde duracakları yere göre ötelenerek, z_i'ye göre $\mathbf{k}_{si}$* ve $\mathbf{m}_{si}$ dönüştürülür. Bu dönüşüm tarafsız düzlem ve ilgilenilen katmandaki nodal yerdeğiştirmeler ve kuvvetlerin ilişkisi sayesinde yapılır.

$$U = TU_0 \tag{5.1}$$

Burada;

$$U_i = \left[u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi} \right]^T$$

$$U_0 = \left[u_0, v_0, w_0, \theta_{x0}, \theta_{y0}, \theta_{z0} \right]^T$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -z_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Buradaki alt indis *i* katman numarasını, **T** de dönüşüm matrisi göstermektedir. Her katmanın direngenlik ve kütle matrisleri tarafsız düzleme göre aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$K_{si}^* = \begin{bmatrix} T & 0 & 0 & 0 \\ & T & 0 & 0 \\ & & T & 0 \\ & & & T \end{bmatrix}^T k_{si}^* \begin{bmatrix} T & 0 & 0 & 0 \\ & T & 0 & 0 \\ & & T & 0 \\ & & & T \end{bmatrix}$$

$$M_{si} = \begin{bmatrix} T & 0 & 0 & 0 \\ & T & 0 & 0 \\ & & T & 0 \\ & & & T \end{bmatrix}^T m_{si} \begin{bmatrix} T & 0 & 0 & 0 \\ & T & 0 & 0 \\ & & T & 0 \\ & & & T \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

Burada **0** 6x6 sıfır matrisidir. Son olarak kompozit elemanın direngenlik ve kütle matrisleri, elemanı oluşturan her katmanın toplanmasıyla elde edilir:

$$K_c^* = \sum_{i=1}^{n} K_{si}^*; \quad M_c = \sum_{i=1}^{n} M_{si} \tag{5.3}$$

Bu eşitliklerdeki *c* alt indisi kompozit kabuğu temsil etmektedir. Tarafsız bölgeye göre kompozit elemanın kütle ve direngenlik matrisleri oluşturulduğunda, matrisler global koordinat sistemine göre dönüştürülüp, sönümlü yapıların doğal frekansları ve modal sönüm değerleri standart özdeğer problemi çözümüyle hesaplanır:

$$\left(K^{*}-\lambda^{2}M\right)\Psi=0 \tag{5.4}$$

Burada **K*** sistemin karmaşık direngenlik matrisi, **M** sistemin kütle matrisidir. Karmaşık özdeğer probleminin çözümü Altuzay İterasyon Yöntemi [20] kullanılarak elde edilmiştir ve aşağıdaki gibidir:

$$\lambda_r^2;\vec{\Psi}_r\ r=1,2,...,n \tag{5.5}$$

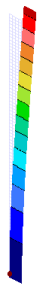
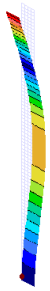
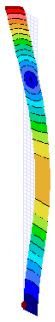
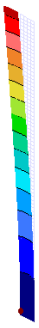
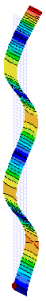
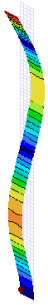
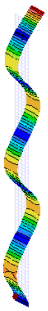
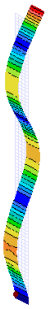
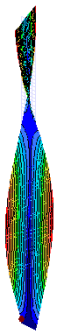
Burada λ_r^2 ve Ψ_r karmaşık özdeğer ve özvektör (mod şekilleri) dir. $\lambda_r^2=\omega_r^2(1+j\eta_r)$ tanımıyla doğal frekans ve kayıp faktörleri;

$$\omega_r^2=\mathrm{Re}\left(\lambda_r^2\right);\quad \eta_r=\mathrm{Im}\left(\lambda_r^2\right)/\mathrm{Re}\left(\lambda_r^2\right) \tag{5.6}$$

Sonlu elemanlar yaklaşımı için teorisi yukarıdaki şekilde geliştirilen FINES programındaki sönümsüz homojen kabuk elemanı 3SLH04 ve sönümlü kompozit kabuk eleman 3MIC04 kullanılmıştır.

İkinci sönüm malzemesiyle hazırlanan serbest katmanlı ve sandviç yapılar FINES programında 328 elemanla modellenmişler. Sonlu elemanlar sonuçları Oberst kiriş yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İkinci sönüm malzemesiyle hazırlanan FL7 numunesinin modeli ile belirlenen mod şekilleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Çizelgede yapının ilk 10 modu verilmiştir. Oberst kiriş yöntemiyle sadece eğilme modları belirlenebilmektedir. Yapıdaki sönümün artması sebebiyle ikinci, üçüncü ve dördüncü eğilme mod şekline ait doğal frekanslar Oberst Kiriş Yöntemi (OKY) ile belirlenebilmiştir. Bunlar aşağıdaki tablodaki; ikinci, dördüncü ve beşinci sıradaki mod şekillerine karşılık gelmektedir.

Çizelge 5.1 : FL 7 numunesinin FINES ile tahmin edilen doğal frekansları ve mod şekilleri.

Mod	***Şekli***	***f*(Hz)**	**Mod**	***Şekli***	***f*(Hz)**
1		19.23	6		711.54
2		120.46	7		1031.98
3		166.48	8		1092.00
4		337.21	9		1631.02
5		660.68	10		2136.30

Bunun yanında daha karmaşık yapıları temsil edecek şekilde paslanmaz çelikten, boyutları Çizelge 5.2'de verilen L şeklinde plakalar modellenmiştir. Bu plakaların çıplak halleri 3SLH04 elemanıyla, yama olarak sönüm malzemesi yapıştırılmış halleri 3MIC04 elemanıyla modellenmiştir. L plakaların elastik modülü değeri 205 GPa, yoğunluk değeri 7850 kg/m^3 'tür.

Çizelge 5.2 : L Plakaların geometrik boyutları.

Genişlik	200 mm
Kısa Kenar Uzunluğu	300 mm
Uzun Kenar Uzunluğu	400 mm
Kalınlık	1.5 mm

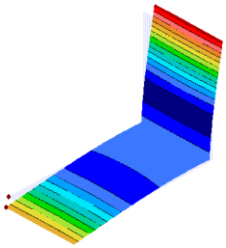
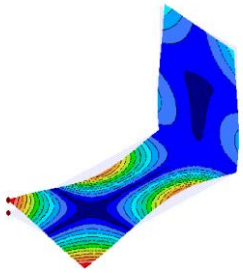
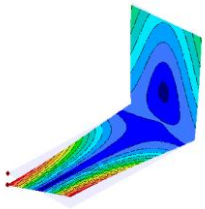
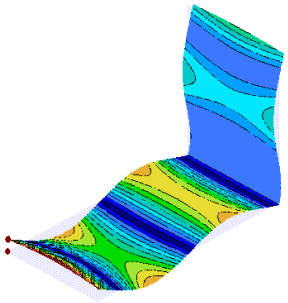
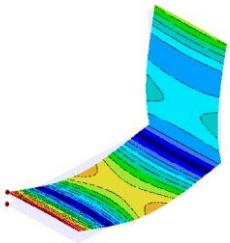
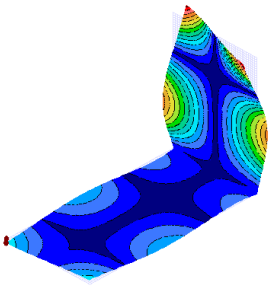
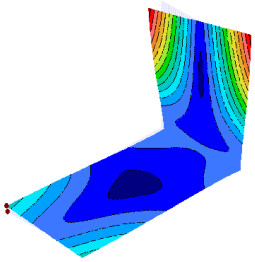
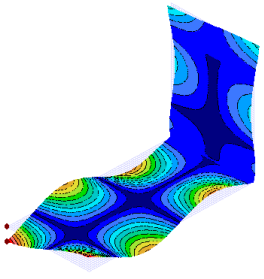
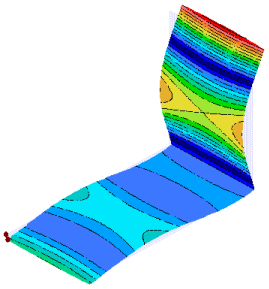
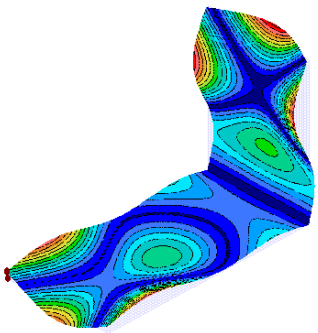
Yama olarak L plakanın köşesinden 60 mm uzağa 200 mm genişliğinde (L plakanın genişliği ile aynı olacak şekilde) ve 100mm uzunluğunda sönüm malzemesi yapıştırılarak serbest katmanlı yapı elde edilmiştir. Daha sonra sönüm malzemesinin üzerine uzunluğu ve genişliği sönüm malzemesiyle aynı, kalınlığı 1 mm olan paslanmaz çelik bir levha yapıştırılarak kısıtlı katman yamalı bir yapı elde edilmiştir. FINES'in yanında, L plakalar ABAQUS programıyla da toplamda 5600 eleman ile modellenmiştir. Elemanların kenar uzunlukları tüm modellerde 5 mm'dir. ABAQUS programında her katman S4R kabuk elemanları ile ayrı ayrı modellenerek birbirlerine bağlanmıştır. ABAQUS programında Modal Birim Şekil Değiştime Enerjisi Yöntemi (MBŞEY) kullanılarak Lanczos çözücü ile her elemanın enerjisi elde edilmiş. Daha sonra bu enerjiler L plakaları oluşturan katmanlar bazında toplanarak aşağıdaki formülde [40] yerine konulmuştur.

$$\eta^{(r)} = \left(\eta_d^{(r)} V_d^{(r)} + \eta_b^{(r)} V_b^{(r)}\right) \Big/ \left(V_d^{(r)} + V_b^{(r)}\right) \tag{5.7}$$

Burada $\eta_d^{(r)}$, r. moda göre viskoelastik katmanın kayıp faktörü, $V_d^{(r)}$ birim şekil değiştirme enerjisidir. $V_b^{(r)}$ de benzer şekilde r. mod için çıplak L plakanın birim şekil değiştirme enerjisidir. Kısıtlı katmanlı yapıda bu formüle birer sönüm ve enerji terimi daha eklenecektir.

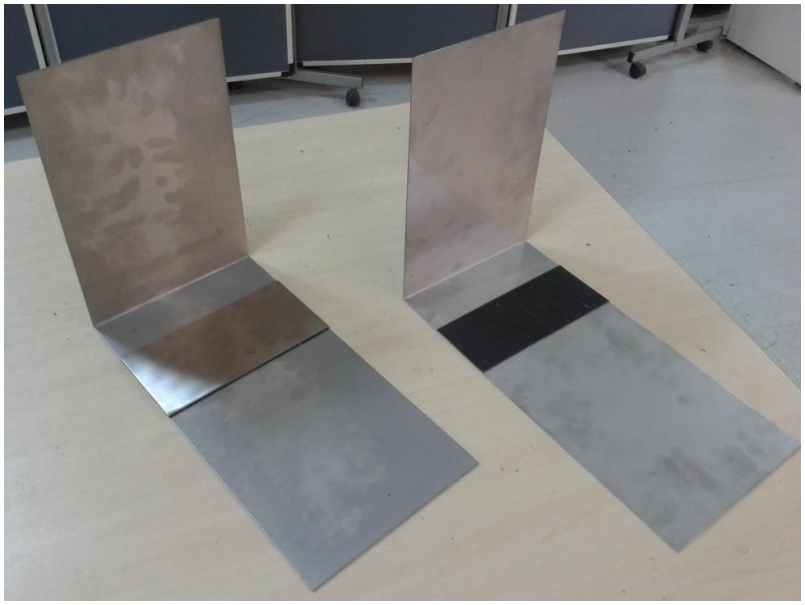
Çıplak L plaka için FINES ortamında modal analiz yapıldığında elde edilen mod şekilleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Çıplak L plakanın FINES ile tahmin edilen doğal frekansları ve mod şekilleri.

Mod	***Şekli***	***f*(Hz)**	**Mod**	***Şekli***	***f*(Hz)**
1		12.91	6		105.17
2		33.75	7		130.84
3		43.55	8		150.15
4		46.63	9		204.25
5		78.41	10		209.42

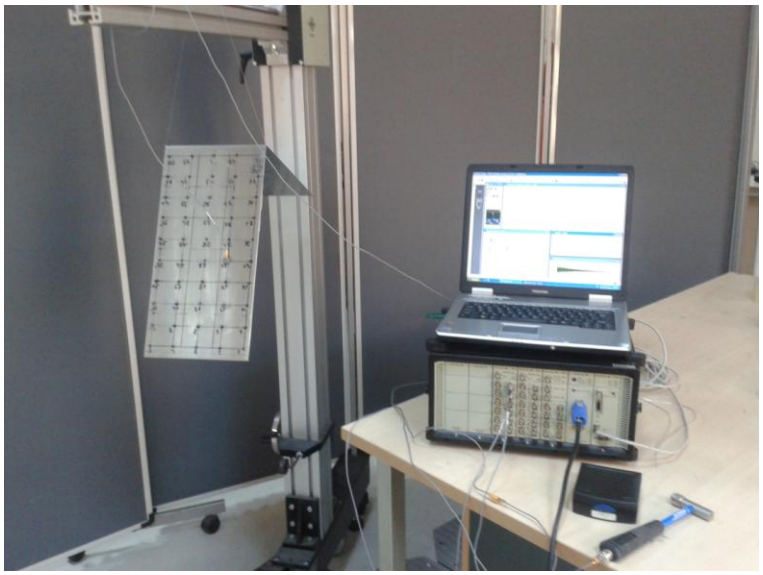
5.2 Modal Testler

Sonlu elemanlar yardımıyla geliştirilen modelin sonuçlarının doğruluğunun gerçek hayattaki deneylerle doğrulanması gerekmektedir. Bunun için L plakalar inşa edilerek, modal çekiç yardımıyla modal teste tabi tutulmuştur. Oluşturulan L plakalar Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Soldaki yapı kısıtlı katmanlı sönümlü; yani viskoelastik malzemeyi sınırlandıracak bir katman içeren L plaka, sağdaki serbest katmanlı plakadır.



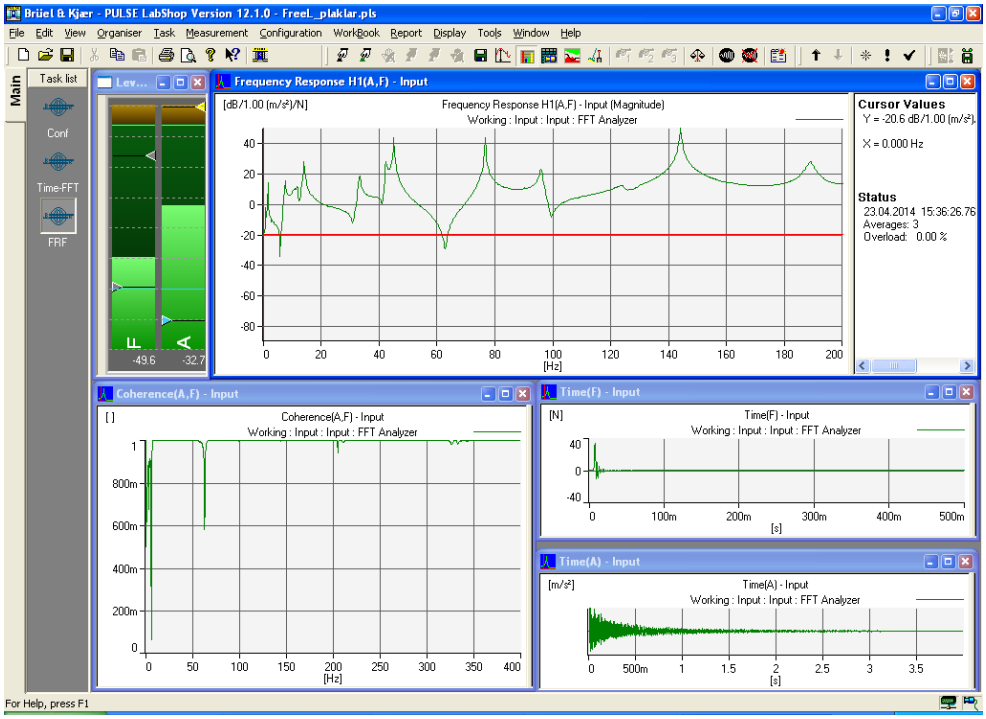
Şekil 5.1: Modal teste tabi tutulan L plakalar.

L plakalara modal test yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı unsurlar vardır. Plakaların modal parametrelerini doğru bir şekilde ölçebilmek için bu plakaların asılırken kullanılacak düzeneğin, sisteme ek sönüm eklememesi gerekmektedir. Bu yüzden L plakalar ince bir misina kullanılarak bir konsola asılmıştır. Modal testlerde bir modal çekiç ile sisteme kuvvet uygulanarak, sistemin ivmesi ivmeölçer ile ölçülür. Ölçülen ivme sinyalinin ve kuvvet sinyalinin Fourier dönüşümü yapılarak elde edilen spekturumları birbirine bölünerek Frekans Tepki Fonksiyonları elde edilir. Tez kapsamında kullanılan modal test düzeneği aşağıdaki Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2: Modal test düzeneği.

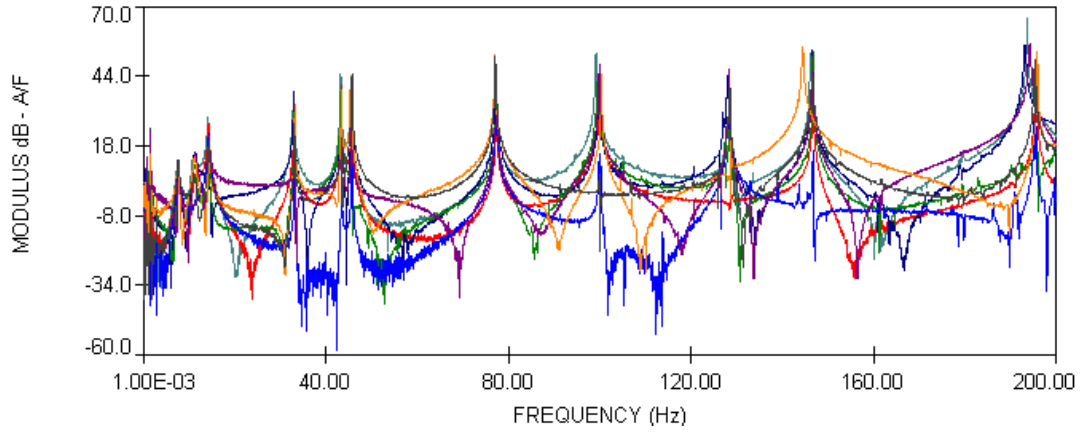
Kullanılan modal çekiç Dytran markasının 5800B5 modeli, kullanılan ivmeölçer Brüel & Kjaer 4507 B tek eksenli ivmeölçerdir. İvme ölçerin sisteme kütle ve sönüm özelliği ekleyeceği akılda tutulmalıdır. Sinyaller Brüel & Kjaer 16 kanallı analizörüyle toplanıp, Pulse programı yardımıyla görüntülenmiştir.



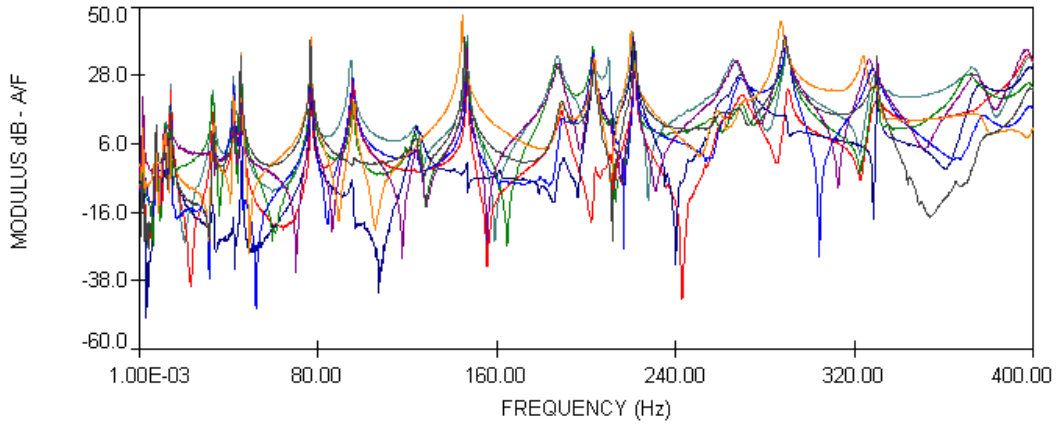
Şekil 5.3: Pulse Programı yardımıyla modal test.

Modal test yapılırken dikkat edilecek bir diğer nokta ise, levha üzerindeki bazı noktaların bazı mod şekilleri için bilgi sağlayamayacağıdır. Modların düzgün şekilde

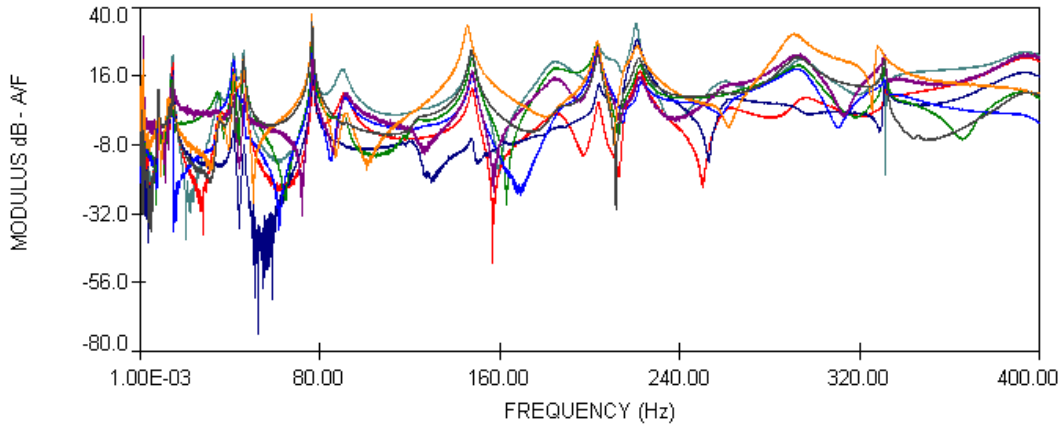
belirlenebilmesi için, levha üzerinden çok sayıda ölçüm almak gerekmektedir. Bu amaçla levhalar üzerinde uzunluğu 40mm genişliği 45 mm boyutunda olan diktörtgen çizilmiş, levhalar üzerinde 90 nokta belirlenerek ivme ölçer bu noktalarda gezdirilmiş ve tepkiler ölçülmüştür. Elde edilen FTF'ler her yapı için üst üste çizdirilerek doğal frekanslar belirlenmiştir.



(a) Çıplak levha



(b) Parça sönüm malzemesi yapıştırılmış levha



(c) Katmanlı yama ile oluşturulmuş levha

Şekil 5.4: Levhalar için seçilen sekiz noktadan elde edilen FTF'ler.

Belirlenen bazı FTF'ler kullanılarak yapılar için 2-200 Hz aralığındaki doğal frekanslar ve kayıp faktörleri incelenmiştir. Sonuçların ortalamaları alınarak yapının doğal frekans ve kayıp faktörleri belirlenmiştir.

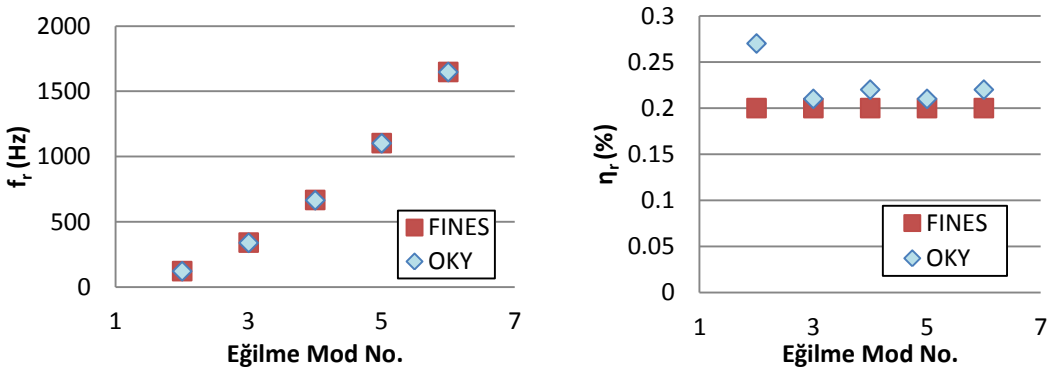
5.3 Deneysel Sonuçlar ile Sonlu Elemanlar Sonuçlarının Karşılaştırması

Bu bölümde deneylerden elde edilen verilerle, sonlu eleman modellerinin analizinden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Önce Oberst kiriş yöntemi ile test edilen yapıların sonuçları, FINES programında yukarıda bahsedilen elemanlarla oluşturulan model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.4'te Çıplak kiriş için karşılaştırma tablosundan görülebileceği üzere OKY yöntemi ve FINES ile belirlenen doğal frekans değerleri birbirlerine çok yakındır.

Çizelge 5.4 : Çıplak kirişin Oberst Kiriş Yöntemi ve FINES yardımıyla belirlenen doğal frekanslar ve kayıp faktörleri.

OKY		**FINES**	
***f* (Hz)**	***η* (%)**	***f* (Hz)**	***η* (%)**
120.7	0.27	121.5	0.2
338.2	0.21	340.23	0.2
664.79	0.22	666.9	0.2
1101.58	0.21	1102.9	0.2
1647.97	0.22	1648.42	0.2

Çizelgedeki sonuçlar aradaki hataların miktarını görsel hale getirebilmek için Şekil 5.5 çizilmiştir. Kayıp faktörlerindeki değerlerin çelik malzemeler için aslında çok düşük olduğu bilinmektedir. Deneysel olarak belirlenirken okunan yüksek değerler hava sürtünmesinin kirişler üzerindeki özellikle ilk eğilme modlarına etkisinin fazla olmasındandır. Düşük mod numarasına sahip hareketlerde titreşimin genliği fazla olduğundan hava direncinin, dolayısı ile hava kaynaklı sönüm de fazla olmaktadır.



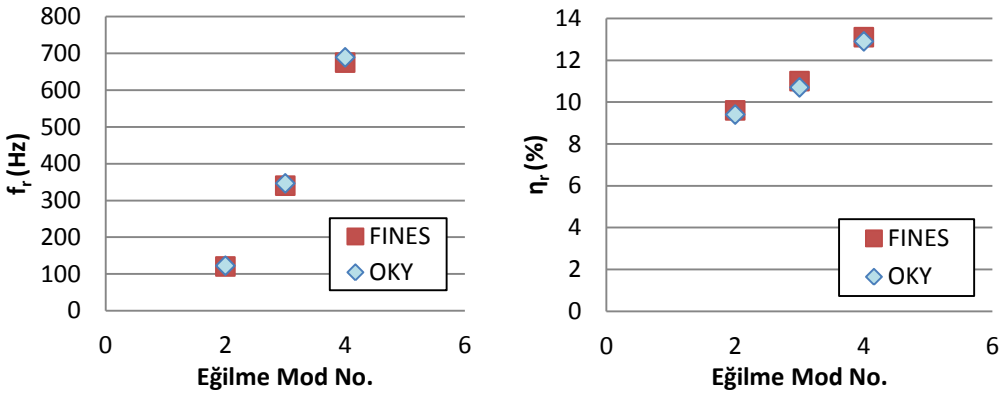
Şekil 5.5: Çıplak kirişin Oberst Kiriş Yöntemi ve Fines ile belirlenen doğal frekans ve kayıp faktörleri.

İkinci sönüm malzemesini çıplak kirişin bir tarafına yapıştırarak oluşturulan FL7 numunesinin iki yöntemle elde edilen sonuçları Çizelge 5.5'te mevcuttur. Malzeme özellikleri için Oberst kiriş deneyinden elde edilen verilerden yararlanılmıştır. Doğal frekanslardaki üç farklı Elastisite modülü ve kayıp faktörü değeri, ilgili frekans civarınki analizi için kullanılmıştır. Poisson oranı literatürde viskoelastik malzemeler için uygun 0.4 olarak alınmıştır.

Çizelge 5.5 : Serbest katmanlı Oberst numunesinin deneysel olarak ve FINES yardımıyla belirlenen doğal frekanslar ve kayıp faktörleri.

	Deneysel		***FINES***	
Mod	***f* (Hz)**	***η* (%)**	***f*(Hz)**	***η*(%)**
2	122.6	9.4	120.5	9.6
3	346.6	10.7	340.3	11.0
4	689.4	12.9	675.0	13.1

Serbest katmanlı yapı için deneysel ve sonlu elemanlar ile belirlenen doğal frekans ve sönüm değerleri çizelgeden de görülebileceği üzere birbirlerine yakındır. Sonuçlar Şekil 5.6 çizilmiştir. Üç mod şekli için de yöntemler arasındaki farklar çok küçüktür.



(a) Doğal Frekanslar (b) Kayıp Faktörleri

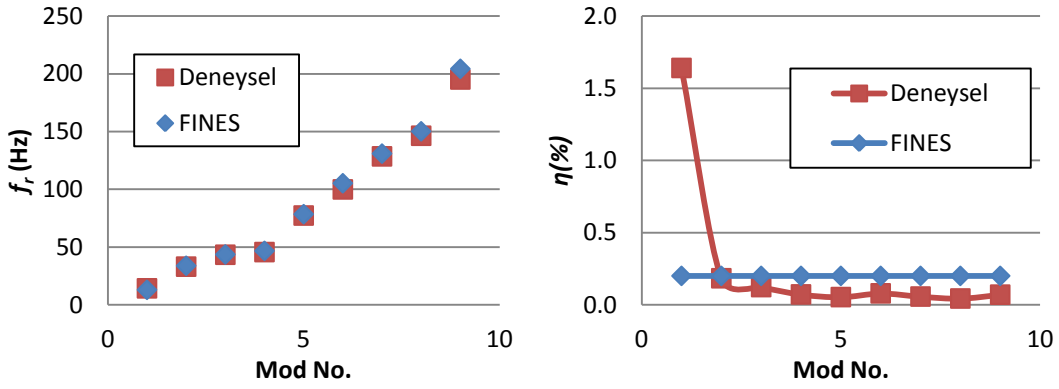
Şekil 5.6: FL7 numunesinin OKY ve FINES ile belirlenen doğal frekans ve kayıp faktörü değerlerinin karşılaştırılması.

Basit çubuk şeklindeki yapıların modellenmesinden sonra L şeklindeki plakalar modellenmiştir. L plakalar için elde edilen deneysel sonuçlar ve FINES modellerinin sonuçlarının karşılaştırması aşağıdaki çizelgelerde yapılmıştır. Çizelge 5.6'da tahmin edildiği belirtilen %0.2 sönüm oranı, aslında malzeme için tanımlanan sönüm oranıdır.

Çizelge 5.6 : Çıplak L plakanın deneysel ve FINES ile belirlenen doğal frekanslar ve kayıp faktörleri.

	FINES		Deneysel	
Mod	***f*(Hz)**	***η*(%)**	***f*(Hz)**	***η*(%)**
1	12.912	0.200	14.222	1.640
2	33.745	0.200	32.980	0.184
3	43.552	0.200	43.293	0.122
4	46.633	0.200	45.590	0.072
5	78.406	0.200	77.236	0.053
6	105.173	0.200	99.846	0.079
7	130.840	0.200	128.463	0.057
8	150.153	0.200	146.311	0.043
9	204.250	0.200	195.014	0.070

Görüldüğü gibi deneysel ve sayısal olarak elde edilen doğal frekanslar arasındaki farklar çok azdır. Kayıp faktörleri arasındaki fark ise daha fazladır. Çeliğin kayıp faktörünün frekansla değişmeyen sabit bir değer olduğu bilinmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar modeli oluşturulurken kayıp faktörü için tek bir değer girilmiştir. FINES modeli homojen bir yapı olduğundan ve aslında çelik malzeme için biraz büyük değer olan η=%0.2 tanımlandığından modal sönüm oranları bütün modlar için aynıdır.. Deneysel olarak belirlenen değerler ilk mod hariç, bu değerden çok daha düşük daha gerçek sonuçları yansıtmaktadır. İlk moddaki büyük değer, titreşim genliğinin fazla olması sebebiyle, plaka hareket ederken üzerine etkiyen hava sürtünmesi, bağlama elemanı gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Diğer modlar için deneysel sönüm değerlerinin yaklaşık aynı seviyede kaldığı **Şekil 5.7** yardımı ile söylenebilir. Çıplak L plaka için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin bu yapının dinamiğini doğru yansıttığı sonucuna varılmıştır.



(a) Doğal Frekanslar (b) Kayıp Faktörleri

Şekil 5.7: Yalın L plakanın modal test ve FINES ile belirlenen doğal frekans ve kayıp faktörleri arasındaki farklar.

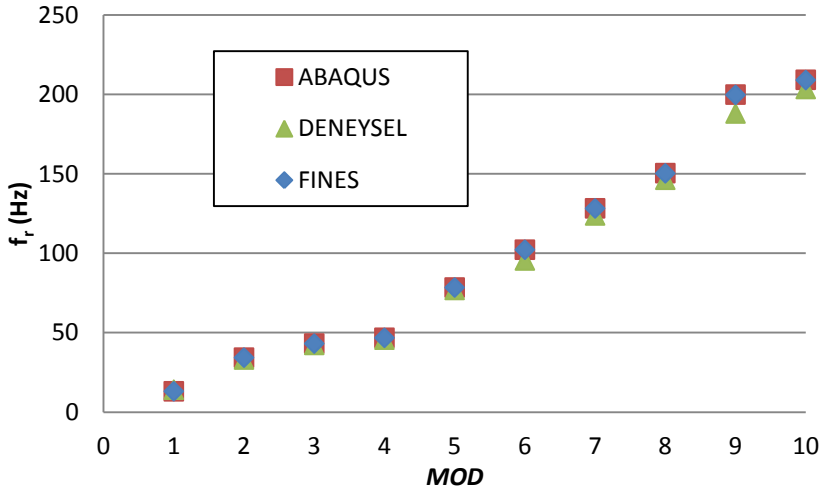
Çıplak plaka için sonuçlar karşılaştırıldıktan sonra, malzeme özellikleri belirlenen ve daha güvenilir olduğu kabul edilen İkinci sönüm malzemesi (CATSİS) ile

oluşturulan yamalı plakaların modelleri oluşturulup sayısal tahminler yapılmış ve deneysel verilerlerle Çizelge 5.7'de karşılaştırılmıştır.

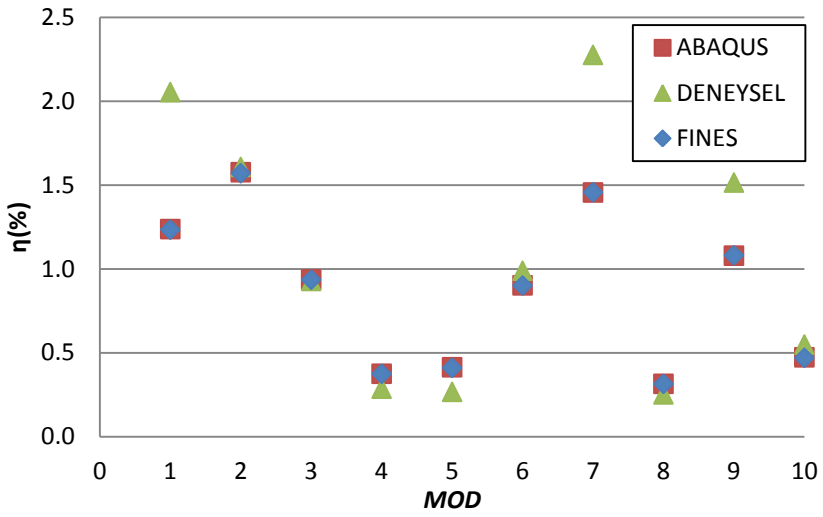
Çizelge 5.7 : Serbest katmanlı L plakanın deneysel olarak, FINES ve ABAQUS ile belirlenen doğal frekanslar ve kayıp faktörleri.

	FINES		**Abaqus**		**Deneysel**	
Mod	f_r **(Hz)**	η**(%)**	f_r **(Hz)**	η**(%)**	f_r **(Hz)**	η**(%)**
1	13.034	1.234	13.031	1.237	14.04	2.054
2	34.205	1.571	34.213	1.577	33.028	1.608
3	43.080	0.935	43.087	0.937	42.225	0.928
4	46.691	0.374	46.723	0.375	45.564	0.286
5	78.363	0.410	78.369	0.414	76.827	0.267
6	102.148	0.901	102.18	0.902	95.389	0.989
7	128.150	1.457	128.24	1.456	123.75	2.276
8	150.253	0.314	150.39	0.315	146.226	0.252
9	199.673	1.081	199.85	1.079	187.944	1.515
10	208.993	0.470	209.15	0.473	203.367	0.549

Mod numarasına göre sonlu elemanlar ve deneysel veriler arasındaki farklar oldukça küçüktür. Doğal frekans ve belirlenen kayıp faktörleri mod numarasına göre Şekil 5.8'de karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi doğal frekans sonuçları birbirine çok yakındır. Diğer taraftan sonlu elemanlar modeli modal sönümü oldukça iyi bir hassassiyet ile tahmin edebilmiştir. Sönüm tahmini sonuçları hem nitelik hem de nicelik açısından oldukça iyidir. Serbest katmanlı yapıların dinamik davranışı FINES kabilyetleri ile başarılı bir şekilde tahmin edilebilmektedir.



(a) Doğal Frekanslar



(b) Kayıp Faktörleri

Şekil 5.8: Catsis sönüm malzemesinin yama olarak yapıştırıldığı L plakanın deneysel ve FINES ile belirlenen özelliklerinin karşılaştırılması.

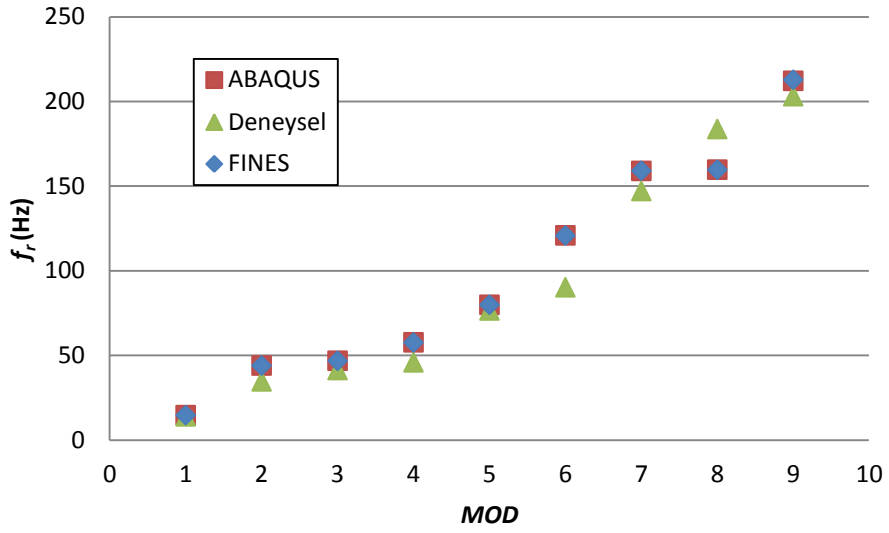
Son olarak CATSİS malzemesiyle hazırlanan sandviç yapıdaki yamalı L plakanın modeli oluşturularak analiz edilmiş ve deneysel sonuçlarla FINES sonuçları Çizelge 5.8'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.8 : Kısıtlı katmanlı L plakanın deneysel ve FINES ile bulunan doğal frekanslar ve kayıp faktörleri.

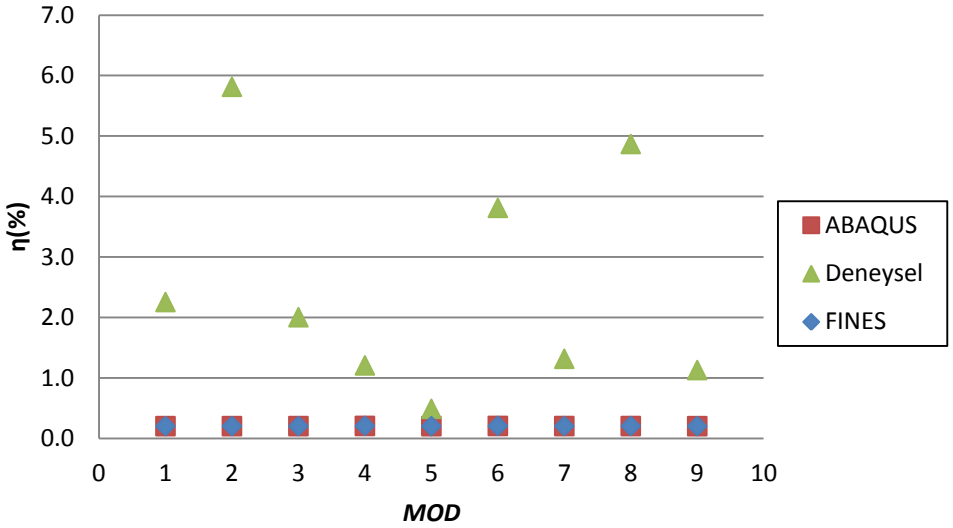
	FINES		**ABAQUS**		**Deneysel**	
Mod	***f*(Hz)**	***η*(%)**	***f*(Hz)**	***η*(%)**	***f*(Hz)**	***η*(%)**
1	14.676	0.201	14.672	0.201	13.965	2.253
2	43.963	0.201	44.009	0.201	34.642	5.813
3	46.787	0.201	46.823	0.201	41.347	2.002
4	57.581	0.205	57.720	0.204	45.876	1.205
5	79.884	0.200	79.864	0.200	76.525	0.487
6	120.775	0.204	120.890	0.204	90.227	3.811
7	159.083	0.202	158.960	0.202	147.086	1.314
8	159.677	0.202	159.710	0.202	183.708	4.867
9	212.808	0.200	212.180	0.200	203.099	1.128

Çıplak ve serbest katmanlı sönümlü L plakalar için sonuçlar birbirine çok yakın olmasına karşın, sınırlı katmanlı sönümlü L plakanın deneysel sonuçları ile sonlu elemanlar sonuçları, özellikle sönüm değerleri açısından birbirinden uzaktır. Bu durum, FİNES'in kompozit elemanının malzemenin kayma yönündeki sönüm davranışını modellemede başarısız olduğunu göstermektedir. Mevcut FINES elemanının sadece Elastisite modülü ve Poisson oranı parametresini kullandığı

bilinmektedir. FINES'deki kompozit elemanın kayma yönündeki sönümü daha iyi modelleyebilmesi için geliştirilmesi gerekmektedir.



(a) Doğal Frekanslar



(b) Kayıp Faktörleri

Şekil 5.9: Catsis sönüm malzemesiyle sandviç olarak yapıştırılan yamalı L plakanın deneysel ve FINES ile belirlenen özelliklerinin karşılaştırılması.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Değerlendirmeler

Bu tez çalışması kapsamında makina mühendisliğinin başlıca sorunlarından olan titreşimin azaltılması için sıkça kullanılan viskoelastik malzemeler incelenmiştir. Öncelikle literatürdeki çalışmalara yer verilmiş ve ayrıntıları belirtilmiştir. Daha sonra titreşim hareketine dair teorik bilgiler verilmiştir. Viskoelastik malzemelerin genel özellikleri ve davranışlarından bahsedilmiş, çevresel etkilere duyarlılıkları anlatılmıştır. Sonraki bölümde Viskoelastik malzemelerin özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesini sağlayan Oberst kiriş yöntemi anlatılmıştır. Elde edilen frekans tepki fonksiyonlarının nasıl analiz edilip modal parametrelere ulaşılacağı verilmiştir. Farklı sönüm malzemelerinin özelliklerini bulmak için, çıplak kirişler, bu malzemelerle hazırlanan tek taraftan sönümlü, iki taraftan sönümlü ve sandviç kirişler test edilmiştir. Frekans çözünürlüğü, modal analiz metodu ve manyetik etki altındaki uzunluk gibi deney parametrelerinin sonuçlara etkisi irdelenmiştir. Uygun bulunan değerler kullanılarak malzemelerin mekanik özellikleri elde edilmiştir. Oluşturulan yapılar, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek, belirlenen değerlerin sonlu eleman yaklaşımındaki sonuçlarıyla karşılaştırması yapılmıştır. Daha sonra L şeklindeki plakaların üzerine incelenen sönüm malzemeleri yama olarak yapıştırılmış oluşturulan bu yeni yapılar modal teste tabi tutulmuştur. Bu karmaşık yapılar ile sonlu elemanlardaki modelleri karşılaştırılmıştır.

Viskoelastik malzemeler uygulamada sıkça kullanılsa da özelliklerinin hassas olarak belirlemek hala bazı zorluklar içermektedir. Oberst kiriş yöntemi klasik bir yöntem olmasına rağmen malzeme sonuçlarına etkide bulunacak bir çok parametresi mevcuttur. Bu parametrelerden frekans çözünürlüğünün kayıp faktörleri hassas tespit edebilmek için mümkün olduğunca küçük seçilmesi gerekmektedir. Kaba frekans çözünürlükleri özellikle ilk modlar için kayıp faktörü değerlerini çok yükseltmektedir. Öte yandan çok küçük çözünürlükler bazı modların bazı yöntemlerle analizinde yazılım kısıtları nedeni ile zorluklar çıkarmaktadır. İlk modlar

için küçük çözünürlüklü sonraki modlar için biraz daha büyük çözünürlüklü deney yapılması önerilmektedir. Doğru çözünürlükte elde edilen FTFlerin analiz edilme yöntemine göre de farklı sonuç verdiği tez kapsamında yapılan çalışmaların başka bir çıkarımıdır. Yarı güç yöntemi ve daire uydurma yöntemi doğal frekansların çok belirgin, sivri tepeler halinde olması durumunda efektif sonuç vermekte, aksi takdirde sonuçlar bir miktar hata içermekte, küçük frekans çözünürlüklerine ihtiyaç duymaktadırlar. Öte yandan çizgi uydurma yöntemi büyük frekans çözünürlüklerinde bile uygun sonuçlar vermektedir. Kullanım olarak da çizgi uydurma yöntemi en kolay yöntem olarak değerlendirilmiştir. Bir diğer parametre manyetik tahrik altındaki uzunluktur. Bu uzunluk arttıkça numuneler daha iyi tahrik edilmektedir. Ancak manyetik uyarıcı sistem çubuğun ucuna lineer olmayan davranışlı bir yay etkisi katmaktadır. Bu durum özellikle ilk modlar için okunan doğal frekans değerlerini çok etkilemektedir. Bunun tersine tahrik altındaki uzunluğun değişiminin kayıp faktörleri değerlerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür.

Sonlu elemanlar ile yapılan çalışmalarda önce Oberst yapıları için ikinci sönüm malzemesiyle hazırlanan tek taraftan sönümlü numunenin sonuçları ile deney sonuçları birbirine yakın bulunmuştur. Oberst kiriş testiyle ikinci sandviç yapının analizi gerçekleştirilemediğinden bir karşılaştırma yapılamamıştır. İnşaa edilen L plakaların sonlu eleman modelinin analiziyle deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, çıplak ve serbest katmanlı yapılar için iyi bir yakınlık görülürken, kısıtlı katmanlı sönümlü yapı için bu durum söz konusu olmamıştır.

6.2 İleride Yapılabilecek Çalışmalar

İleride yapılabilecek araştırmalar için öneriler aşağıda listelenmiştir:

- Oberst kiriş yöntemi testini farklı ortam sıcaklıklarında gerçekleştirerek malzeme özelliklerini belirlemek.
- Oberst kiriş yöntemindeki, manyetik algılayıcının köke olan uzaklığının sonuçları nasıl değiştirebileceğini incelemek.
- Frekans çözünürlüğünün doğal frekanslarla oranını inceleyerek optimum aralığı belirlemek.
- Yapıştırıcı etkisinin belirlenmesi.
- Daha uygun malzeme seçimi ve daha iyi yapıştırıcı uygulaması ile ölçülebilir sandviç yapılar hazırlayarak kayma modülü ve o yöndeki kayıp faktörünü hassas şekilde ölçebilmek.

- Frekansa göre Elastisite modülünün düşmesine sebep olan nonlineer etkilerin araştırılması.
- Özellikle sandviç yapıların özelliklerini daha iyi yansıtabilecek sonlu eleman geliştirilmesi.

KAYNAKLAR

[1] **Oberst, H.** (1952). Über die dæmfung der biegeschwingungen dünner beche durch fest haftende belage, *Acustica **2**,* 181-184

[2] **Ross D., Ungar E.E., Kerwin Jr., E.M.,** (1959). Damping of plate flexural vibrations by means of viscoelastic laminate, *Proceedings of ASME Structural Damping,* New York, pp 49-87.

[3] **Gross B.,** (1953). Mathematical Structure of the Theories of Viscoelasticity, Herman, Paris.

[4] **Kerwin Jr.,** (1959). Damping of flexural waves by constrained viscoelastic layer, *J. Acoust. Soc.* **31**, 952-962.

[5] **DiTaranto R.A.,** (1965). Theory of vibratory bending for elastic and viscoelastic layered finite-length beams, *ASME J. Appl. Mech.* **32**, 881-886.

[6] **ASTM E-756-93,** (1993). Standard Test Method for Measuring Vibration Damping Properties of Materials, American National Standard, ABD

[7] **Wojtowicki J.L.**, **Jaouen L., Panneton R.,** (2004). New approach for the measurement of damping properties of materials using the Oberst beam. *Rev. Sci. Instrum.* **75** (8), 2569-2574

[8] **SAE J1637-FEB91,** (1993). Laboratory measurement of the composite vibration damping properties of materials on a supporting steel bar, Soc. Autom. Eng.

[9] **Sanliturk K.Y., Koruk H.,** (2013). Development and validation of a composite finite element with damping capability, *Composite Strıctures,* **97**, 136-146.

[10] **Koruk H., Sanliturk K.Y.,** (2012). Identification and removal of adverse effects of non-contact electromagnetic excitation in Oberst Beam Test Method, *Mechanical Systems and Signal Processing,* **30**, 274-295.

[11] **Koruk H., Sanlıturk K.Y.,** (2010). On measuring dynamic properties of damping materials using oberst beam method, *Proceedings of ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA2010,* İstanbul, Türkiye

[12] **Martinez-Agirre M., Elefabarrieta M. J.,** (2011). Dynamic characterization of high damping viscoelastic materials from vibration test data, *Journal of Sound and Vibration,* **330**, 3930-3943.

[13] **Wang H.J., Chen L.W.,** (2002). Vibration and damping analysis of a three-layered composite annular plate with a viscoelastic mid-layer, *Composite Structure*, **58**, 563-570.

[14] **Kristensen R.F., Nielsen K.L., Mikkelsen L.P.,** (2008). Numerical studies of shear damped composite beams using a constrained damping layer, *Composite Structures,* **83,** 301-311.

[15] **Lepoittevin G., Kress G.,** (2010). Optimization of segmented constrained layer damping witg mathematical programming using strain energy analysisi and modal data, *Materials and Design,* **31**, 14-24.

[16] **Woodhouse J.,** (1998). Linear damping models for structural vibration. *Journal of Sound and Vibration* **215**, 547-569.

[17] **Gaunaris G.D., Anifantis N.K.,** (1999). Structural damping determination by finite element approach, *Compoters and Structures*, **73**, 445-452.

[18] **Koruk H., Sanliturk K.Y.,** (2011). Damping uncertainity due to noise and exponential windowing, *Journal of Sound and Vibration,* **330**, 5690-5706.

[19] **Rastogi N.,** (2005). Forced frequency response analysis of multi material systems. *Proceedings of SAE noise and vibration conference and exhibition,*Grand Traverse, MI, ABD.

[20] **Bathe K.J.,** (1982). Finite element procedures in engineering analysis. Prentice-Hall.

[21] **Cortes F., Elejabarietta M.J.,** (2006). An approximate numerical method for the complex eigen problem in systems characterized by a structural damping matrix, *Journal of Sound and Vibration*, **296**, 166-182.

[22] **Rao M.D., Echempati R., Nadella S.,** (1997). Dynamic analysisi and damping of composite structures embedded with viscoelastic layers, *Composite Part B.*, **28**, 547-554.

[23] **Zhang S.H., Chen H.L.,** (2006). A study on the damping characteristics of laminated composites with integral viscoelastic layers, *Composite Structures,* **74**, 63-69.

[24] **Cortes F., Elejabarietta M.J.,** (2008). Structural vibration of flexural beams with thick unconstrained layer damping, *International Jounal of Solids and Structures*, **45**, 5805-5813.

[25] **Moreira R.A.S., Rodrigues J.D.,** (2006). A layerwise model for thin soft core sandwich plates. *Computers and Structures*, **84**, 1256-1263.

[26] **Plagianakos T.S., Saravanos D.A.,** (2003). Mechanics and finite elements for damoed dynamic characteristics of curvilinear laminates and composite shell structures, *Journal of Sound and Vibration*, **263**, 399-414

[27] **Xie Z., Shepard Jr. W. S.,** (2009). Development of a single-layer dinite element and a simplified finite element modeling approach for constrained layer damped structures, *Finite Elements in Analysis and Design*,**45**, 530-537.

[28] **Castel A., Loredo A., El Hafidi A., Martin B.,** (2012). Complex power distribution analysis in plates covered with passive constrained layer damping patches, *Journal of Sound and Vibration*,**331**, 2485-2498.

[28] **Amichi K., Atalla N.,** (2009). A new 3D finite element for sandwich beams with a viscoelastic core, *Journal of Vibration and Acoustics*, **131**, 021010.

[30] **Kumar A., Chakrabarti A., Bhargava P.,** (2013). Vibration of laminated composites and sandwich shells based on high order zigzag theory, *Engineering Structures*, **56**, 880-888.

[31] **Zheng H., Pau G.S.H., Wang Y.Y.,** (2006). A comparative study on optimization of constrained layer damping treatment for structural vibration control, *Thin-Walled Structures*, **44**, 886-896.

[32] **Granger D., Ross A.,** (2009). Effects of partial constrained viscoelastic layer damping parameters on the initial transient response of impacted cantilever beams: Experimental and numerical results, *Journal of Sound and Vibration*, **321**, 45-64.

[33] **Ewins, D.J.,** 2000. Modal Testing "Theory, Practice and Application", Research Studies Press Ltd. Hertfordshire.

[34] **Nashif A.D., Jones D.I.G., Henderson J.P.,** 1985. Vibration Damping, John Wiley & Sons, Inc. New York.

[35] **Koruk H., Sanliturk K.Y.** (2013). Modelling electromagnetic effect of the non-contact excitation system in Oberst beam method, *Inter-Noise 2013*, Paper no: 1261, Innsbruck, Austria.

[36] **ICATS:** Imperial College Testing Analysis and Software, Imperial Collage, Dynamic Section, Londra, 2009.

[37] **FINES: Şanlıtürk K.Y., "**Finite element for structures". İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2012.

[38] **PULSE LabShop.** Sound and vibration measurement software, Bruel and Kjaer, Kopenak, Danimarka, 2011.

[39] **ABAQUS 6.9.11**, Finite Element Software.

[40] **Johnson C.D., Kienholtz D.A., (1982)** Finite element prediction of damping in structures with constrained viscoelastic layers., AIAA J, **20** ; 1284-90.

EKLER

EK A: MATLAB kodu

EK A

```
clear all;
clc;

B1=0.55959;
B2=3.5069;
B3=9.8194;

% for n>3 Bn=(pi/2)*(n-0.5)^2
B4=(pi/2)*(4-0.5)^2;
B5=(pi/2)*(5-0.5)^2;
B6=(pi/2)*(6-0.5)^2;
B7=(pi/2)*(7-0.5)^2;
B8=(pi/2)*(8-0.5)^2;
B9=(pi/2)*(9-0.5)^2;
B10=(pi/2)*(10-0.5)^2;

Bn=[B2;B3;B4;B5;B6;B7;B8;B9;B10];


m=23.7*10^-3;
Lt=300*10^-3;
H=1*10^-3;
T=10*10^-3;

ro=m/(T*Lt*H);

mt=51.3*10^-3;
H1=1.0*10^-3;
Ld=204*10^-3;
md=mt-2*m;
ro1=md/(T*Ld*H1);

L=205*10^-3;


% Bare
% Ortalama Linefit değerleri matrislere girilir
fn=[120.64
338.06
664.49
1101.12
1647.13];

etan=[0.33
0.25
0.24
0.21
0.20]*10^(-2);

for n=1:5;
E(n)=12*ro*L^4*(fn(n))^2/(H^2*(Bn(n))^2);
end

E

h=H1/H;
```

```
d=ro1/ro;

% Damped (free)
% Tek taraftan sönümlü numune değerleri matrislere girilir
fc=[108.104
302.596
593.751
985.361
1472.156];

etac=[1.468
1.110
1.094
0.982
0.878]*10^(-2);



for n=1:5;
A(n)=(fc(n)/fn(n))^2*(1+d*h);
B(n)=4+6*h+4*h^2;
end

for n=1:5;
E1(n)=[(A(n)-B(n))+sqrt((A(n)-B(n))^2-4*h^2*(1-A(n)))]*E(n)/(2*h^3
);
e(n)=E1(n)/E(n);
eta1(n)=(1+e(n)*h)*(1+4*e(n)*h+6*e(n)*h^2+4*e(n)*h^3+e(n)^2*h^4)*eta
c(n)/(e(n)*h*(3+6*h+4*h^2+2*e(n)*h^3+e(n)^2*h^4));
end

A
E1
eta1

% Both side damped
% Çift taraftan sönümlü numune değerleri matrislere girilir
fm=[101.33
282.66
552.48
912.07
1361.91];

etam=[1.983
1.841
1.807
2.073
1.527]*10^(-2);

for n=1:5;
Am(n)=(fm(n)/fn(n))^2*(1+2*d*h);
end
Am
for n=1:5;
E1m(n)=E(n)*(Am(n)-1)/(8*h^3+12*h^2+6*h);
eta_m1(n)=etam(n)+(E(n)*etam(n))/(E1m(n)*(8*h^3+12*h^2+6*h));
end
E1m
eta_m1
```

```
% Sandwich
%Sandviç numune değerleri matrislere girilir
fs=[118.405
326.688
639.134
1055.105
1576.133];

eta_s=[4.17
2.246
1.856
1.207
1.08]*10^(-2);

for n=1:5;
BB(n)=1/(6*(1+h)^2);
AA(n)=((fs(n)/fn(n))^2)*(2+d*h)*(BB(n)/2);

alfa(n)=((fs(n)/fn(n))^2)*(2+d*h);
end



for n=1:5;
G1(n)=(AA(n)-BB(n)-2*(AA(n)-BB(n))^2-
2*(AA(n)*eta_s(n))^2)*((2*pi*Bn(n)*E(n)*H*H1)/((1-
2*AA(n)+2*BB(n))^2+4*(AA(n)*eta_s(n))^2));

eta1_comp(n)=(AA(n)*eta_s(n))/(AA(n)-BB(n)-2*(AA(n)-BB(n))^2-
2*(AA(n)*eta_s(n))^2);
end


G1
eta1_comp
```

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mehmet Sait Özer

Doğum Yeri ve Tarihi: Yıldırım- 19/10/1989

Adres: Poligon Mah. Boğaziçi Sitesi C:2 Blok D: 15

E-Posta: mehmetsaitozer@hotmail.com

Lisans: İTÜ Makina Mühendisliği

Yayın ve Patent Listesi:

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪ Özer M.S., Körük H., Şanlıtürk K.Y., 2014: Characterization of Viscoelastic Materials Using Free-layered and Sandwiched Samples: Assesment and Recommendations. *4. The International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress Exhibition,* Nisan 24-27, 2014 Muğla, Tükiye.