

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM VE AKUSTİK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan Kerem AK

Enstitü Anabilim Dalı	:	MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı	:	MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı	:	Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DAL

Kasım 2022

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM VE AKUSTİK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan Kerem AK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 17.11.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

İmza

Furkan Kerem AK

16.11.2022

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DAL'a ve SAÜ Makine Mühendisliği öğretim üyelerinden Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İskender ÖZSOY'a teşekkürlerimi sunarım.

Değerli bilgi, deneyim, tecrübe ve desteklerinden yararlandığım değerli hocalarım İTÜ öğretim üyesi Prof. Dr. Kenan Yüce ŞANLITÜRK'e, İTÜ emekli öğretim üyesi Prof. Dr. Halit Temel BELEK'e ve İTÜ Fuat Pasin Titreşim ve Akustik Laboratuvarı yetkililerine, Mak. Yük. Müh. Onur AKAYDIN'a ve Mak. Yük. Müh. Emre ORHON'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımdaki tüm aşamalarda beni destekleyen annem Nilüfer AK ve babam Dr. Ayhan AK'a ve kardeşim Muhsin Ömer AK'a ayrıca minnettarım.

Bu çalışmanın bilimsel araştırma projesine (Proje No: 2021-7-24-48) dönüştürülmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kompozitler	3
2.1.1. Kompozit üretim metotları	3
2.2. Kompozitlerin Dinamik ve Mekanik Özellikleri.....	4
2.3. Kompozitlerin Dinamik Davranışı ve Sayısal Yöntemlerle İlişkisi	6
2.4. Kompozitlerin Akustik Davranışları.....	7
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
3.1. Materyal.....	8
3.2. Deneysel Yöntem.....	10
3.2.1. Modal test ve düzeneği	10
3.2.1.1. Modal test düzeneği	11
3.2.1.2. Modal verilerin toplanması	12

3.2.1.3. Modal verilerin işlenmesi	14
3.2.2. Sarsıcı test ve düzeneği.....	20
3.2.2.1. Sarsıcı test düzeneği	20
3.2.2.2. Sarsıcı verilerin toplanması	21
3.2.2.3. Sarsıcı verilerinin işlenmesi.....	24
3.2.3. Akustik yutum testleri.....	27
3.2.3.1. Yutum test düzeneği.....	28
3.2.3.2. Akustik yutum verilerinin toplanması	28
3.2.3.3. Akustik yutum verilerinin işlenmesi	31
3.2.4. Akustik ses iletim kaybı testleri.....	31
3.2.4.1. Ses iletim kaybı test düzeneği.....	32
3.2.4.2. Ses iletim kaybı verilerinin toplanması	33
3.2.4.3. Ses iletim kaybı verilerinin işlenmesi	34
3.3. Sayısal Çalışmalar	37
3.3.1. Ankastre girişin serbest titreşim teorisi	37
3.3.2. Ankastre girişin sonlu elemanlar analizi.....	44
 BÖLÜM 4.	
DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR	46
4.1. Modal Test Sonuçları	46
4.1.1. Modal sonuçlar	46
4.1.2. MAC sonuçları	51
4.2. Sarsıcı Testi Sonuçları	53
4.3. Akustik Yutum Testi Sonuçları	53
4.4. Ses İletim Kaybı Testi Sonuçları	59
4.5. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması	66
 BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇLAR	69
 KAYNAKLAR.....	 71
ÖZGEÇMİŞ	75

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: Amerikan test ve malzeme kurumu
CMIF	: Karmaşık mod indikatörü
TF	: Transfer fonksiyonu
FFT	: Hızlı Fourier dönüşümü
FRF	: Frekans cevap fonksiyonu
ODS	: Çalışma sapma şekli (Operational Deflection Shape)
STL	: Ses iletim kaybı (Sound Transmission Loss)
A, B, C, D	: Empedans tüpündeki duran dalga alanı bileşenleri
C_n	: Mod katsayısı
D	: Numune çapı (mm)
E	: Young modülü (GPa)
E_{fx}	: Eğilme modülü (GPa)
F_n	: Doğal frekans
G_{11}	: Giriş oto spektrumu
G_{12}	: Çapraz güç spektrumu
H	: Transfer fonksiyon
H_1	: Anti rezonans tahmin fonksiyonu
H_2	: Rezonans tahmin fonksiyonu
Hz	: Frekans birimi, olayın birim saniyede tekrarlanma sayısı
j	: Sanal sayı $\sqrt{-1}$
L, l	: Numune uzunluk, mm
L_i	: Kiriş sabitleme uzunluğu
R	: Akustik yansımaya katsayısı
t	: Kiriş kalınlığı
TL_n	: Ses iletim kaybı
α	: Ses yutum katsayısı

ρ	: Yoğunluk kg/m ³
ρ_s	: yüzey yoğunluğu
τ	: İletim oranı
φ	: Radyan cinsinden karmaşık değer fazı
[A ₂ G C] _s	: Simetrik dizilimli iki aramid elyaf, cam elyaf, karbon elyaf sekiz katmanlı numune
[A ₂ C G] _s	: Simetrik dizilimli iki aramid elyaf, cam elyaf, karbon elyaf sekiz katmanlı numune
[A ₂ G ₂] _s	: Simetrik dizilimli iki aramid elyaf, iki cam elyaf sekiz katmanlı numune
[A ₂ C ₂] _s	: Simetrik dizilimli iki aramid elyaf, iki karbon elyaf sekiz katmanlı numune
[G ₂ A C] _s	: Simetrik dizilimli iki cam elyaf, aramid elyaf, karbon elyaf, sekiz katmanlı numune
[G ₂ C A] _s	: Simetrik dizilimli iki cam elyaf, karbon, aramid elyaf, sekiz katmanlı numune
[G ₂ A ₂] _s	: Simetrik dizilimli iki cam elyaf, iki aramid elyaf, sekiz katmanlı numune
[C ₂ A G] _s	: Simetrik dizilimli iki karbon elyaf, aramid elyaf, cam elyaf sekiz katmanlı numune
[C ₂ G A] _s	: Simetrik dizilimli iki karbon elyaf, cam elyaf, aramid elyaf sekiz katmanlı numune
[C ₂ A ₂] _s	: Simetrik dizilimli iki karbon elyaf, iki aramid elyaf sekiz katmanlı numune
[A ₃ G] _s	: Simetrik dizilimli üç aramid elyaf, cam elyaf sekiz katmanlı numune
[A ₃ C] _s	: Simetrik dizilimli üç aramid elyaf, cam elyaf sekiz katmanlı numune
[G ₃ A] _s	: Simetrik dizilimli üç cam elyaf, aramid elyaf sekiz katmanlı numune
[C ₃ A] _s	: Simetrik dizilimli üç karbon elyaf, aramid elyaf sekiz katmanlı numune

[C]₈ : Sekiz katmanlı karbon elyaf numune
[A]₈ : Sekiz katmanlı aramid elyaf numune
[G]₈ : Sekiz katmanlı cam elyaf numune



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kiriş numunelerinin ölçüleri	8
Şekil 3.2. Titreşim test numuneleri	9
Şekil 3.3. Akustik test numuneleri	9
Şekil 3.4. Modal analiz test ekipmanının şematik gösterimi	11
Şekil 3.5. Yazılımdaki numune gösteriminin gösterimi	12
Şekil 3.6. Tetikleme parametresinin ayarının gösterimi	13
Şekil 3.7. Ağırlıklandırma işleminin gösterimi	14
Şekil 3.8. FRF cevap fonksiyonlarının örnek gösterimi	14
Şekil 3.9. Tek serbestlik dereceli sistem modellerinin gösterimi	15
Şekil 3.10. Farklı noktalar için Coherence fonksiyonunun örnek gösterimleri	16
Şekil 3.11. FRF verilerinin son hali	17
Şekil 3.12. 8 karbon numunesinin mod tablosunun örnek gösterimi	18
Şekil 3.13. 8 Karbon numune için CrossMAC özelliğinin gösterimi	19
Şekil 3.14. Geometri üzerinde 1. modun örnek gösterimi	20
Şekil 3.15. Sarsıcı test düzeneğinin şematik gösterimi	21
Şekil 3.16. Beyaz gürültü ile toplanan verinin gösterimi	22
Şekil 3.17. Numunenin birinci modunun gösterimi	23
Şekil 3.18. Numunenin ikinci modunun gösterimi	23
Şekil 3.19. Kaydedilen ivme-zaman sinyalinin gösterimi	24
Şekil 3.20. Logaritmik azalma metodunun gösterimi	25
Şekil 3.21. Logaritmik azalmanın 8 karbon ölçüm verisi üzerinde gösterimi	26
Şekil 3.22. 8 Karbon numunesinin birinci modunun kullanılan tepe nokta değerleri	26
Şekil 3.23. Ses yutumunun gösterimi	27
Şekil 3.24. İki mikrofona empedans tüpünün şematik gösterimi [32]	28
Şekil 3.25. Labshop yazılımındaki ölçüm konfigürasyonlarının gösterimi	29
Şekil 3.26. Transfer fonksiyon kalibrasyonunun gösterimi	30

Şekil 3.27. Ölçümlerde kullanılan sünger malzemesinin yutumu.....	30
Şekil 3.28. Dört mikrofonlu TF yöntemi için STL tüpünün şematik diyagramı] ...	32
Şekil 3.29. Ses iletim kaybı için kullanılan geniş tüpün gösterimi	33
Şekil 3.30. Mikrofonların faz kalibrasyonunun gösterimi	34
Şekil 3.31. Ankastre giriş elemanı gösterimi	37
Şekil 3.32. Diferansiyel giriş elemanının gösterimi.....	38
Şekil 3.33. Örnek girişin sonlu elemanlar modeli.....	44
Şekil 3.34. 8 Karbon numunesinin sonlu elemanlardaki 1. eğilme modu gösterimi .	45
Şekil 3.35. 8 Karbon numunesinin sonlu elemanlardaki 2. eğilme modu gösterimi .	45
Şekil 4.1. Saf numunelerin mod-sönüm grafiği	46
Şekil 4.2. Saf numunelerin mod-frekans grafiği	47
Şekil 4.3. Saf aramid elyaf ve hibritlerinin mod-sönüm grafiği	48
Şekil 4.4. Saf aramid elyaf ve hibritlerinin mod-frekans grafiği	48
Şekil 4.5. Saf karbon ve hibritlerinin mod-sönüm grafiği	49
Şekil 4.6. Saf karbon elyaf ve hibritlerinin mod-frekans grafiği	50
Şekil 4.7. Saf cam elyaf ve hibritlerinin mod-sönüm grafiği.....	50
Şekil 4.8. Saf cam elyaf ve hibritlerinin mod-frekans grafiği.....	51
Şekil 4.9. 8 katman aramid,cam,karbon elyafının yutum grafiği.....	54
Şekil 4.10. Aramid elyaf numunelerinin yutum grafiği	55
Şekil 4.11. Aramid elyaf numunelerinin 0-500 Hz arasındaki yutum grafiği	55
Şekil 4.12. Aramid elyaf numunelerinin 1600-6400 Hz yutum grafiği	56
Şekil 4.13. Cam elyaf numunelerinin yutum grafiği.....	56
Şekil 4.14. Cam elyaf numunelerinin 0-500 Hz yutum grafiği.....	57
Şekil 4.15. Cam elyaf numunelerinin 1600-6400 Hz yutum grafiği.....	57
Şekil 4.16. Karbon elyaf numunelerinin yutum grafiği	58
Şekil 4.17. Karbon elyaf numunelerinin 0-1000 Hz yutum grafiği	58
Şekil 4.18. Karbon elyaf numunelerinin 1600-6400 Hz yutum grafiği	59
Şekil 4.19. Saf numunelerin 50-1600 Hz ses iletim kaybı grafiği	60
Şekil 4.20. Saf numunelerin ses iletim kaybı grafiği	60
Şekil 4.21. Aramid elyaf numunelerinin ses iletim kaybı grafiği	61
Şekil 4.22. Aramid elyaf numunelerinin 50-1600 Hz ses iletim kaybı grafiği	61
Şekil 4.23. Aramid elyaf numunelerinin 1600-6400 Hz ses iletim kaybı grafiği ...	62

Şekil 4.24. Cam elyaf numunelerinin ses iletim kaybı grafiği.....	63
Şekil 4.25. Cam elyaf numunelerinin 50-1600 Hz ses iletim kaybı grafiği.....	63
Şekil 4.26. Cam elyaf numunelerinin 1600-6400 Hz ses iletim kaybı grafiği.....	64
Şekil 4.27. Karbon elyaf numunelerinin ses iletim kaybı grafiği	65
Şekil 4.28. Karbon elyaf numunelerinin 50-1600 Hz ses iletim kaybı grafiği	65
Şekil 4.29. Karbon elyaf numunelerinin 1600-6000 Hz ses iletim kaybı grafiği ...	66



TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Kompozit numunelerin fiziksel özellikleri	10
Tablo 4.1.[A ₂ C G] _s numune 1-2 MAC tablosu	52
Tablo 4.2.[A ₂ C G] _s numune 1-3 MAC tablosu	52
Tablo 4.3. [A ₂ C G] _s numune 2-3 MAC tablosu	52
Tablo 4.4. Sarsıcı test sonuçları.....	53
Tablo 4.5. Mod frekanslarının karşılaştırılması	67
Tablo 4.6. Sarsıcı ve modal sönüm değerlerinin karşılaştırılması	68
Tablo 4.7. Modal sönüm tablosu	68

ÖZET

Anahtar kelimeler: Modal analiz, sarsıcı, kompozit lamina, akustik yutum, ses iletim kaybı

Bu çalışmada elyaf takviyeli kompozit malzemelerin titreşim sönümü, ses yutumu ve ses iletim kaybı gibi akustik ve titreşim davranışları deneysel olarak ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan elyaflar aramid, karbon ve cam elyaf dokumalardan oluşmaktadır. Kompozit malzemeler vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir.

Deneylerde kullanılan kirişler 250 mm uzunluğunda ve 2 mm kalınlığında, plakalar ise 100 mm çapında ve 2 mm kalınlığında dairesel geometride kesilmişlerdir. Deneysel modal analiz testleriyle her bir kirişin mod frekansları, sönüm oranları bilgileri transfer fonksiyonlar yardımıyla laboratuvar ortamında elde edilmiştir.

Deneysel akustik empedans tüpü testleriyle her bir dairesel kompozit plaka numunesinin yutum katsayıları, ses iletim kaybı bilgileri transfer fonksiyonlar yardımıyla laboratuvar ortamında elde edilmiştir. Modal analiz testlerinde elde edilen veriler analiz edilerek numuneler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

Modal analiz sonuçlarına göre $[C_3 A]_8$ kompozitlerinin en iyi, $[G]_8$ kompozitlerinin en zayıf mekanik performansa sahip olduğu görülmüştür.

Yutum testlerinde dairesel kompozit plakaların arkasına 25 mm kalınlığında tutucu sünger ilave edilmiştir. Elde edilen veriler analiz edilerek numuneler arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre $[C_3 A]_8$ kompozitlerinin en iyi, $[C]_8$ kompozitlerinin ise en zayıf akustik yutum performansına sahip olduğu görülmüştür.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF VIBRATION AND ACOUSTIC PROPERTIES OF COMPOSITE BEAMS

SUMMARY

Keywords: Modal analysis, shaker, composite laminate, sound absorption, transmission loss

In this study, acoustic and vibration behaviors of fiber reinforced composite materials such as vibration damping, sound absorption and sound transmission loss were investigated experimentally and numerically. The fibers used in the study consist of aramid, carbon and glass fiber fabrics. Composite materials were produced by vacuum infusion method.

The beams used in the experiments were cut in a circular geometry with a length of 250 mm and a thickness of 2 mm, while the plates were cut with a diameter of 100 mm and a thickness of 2 mm.

With experimental acoustic impedance tube tests, absorption coefficients and sound transmission loss information of each circular composite plate sample were obtained in the laboratory with the help of transfer functions. The data obtained in the modal analysis tests were analyzed and comparisons were made between the samples.

According to the modal analysis results, $[C_3A]_S$ composites have the best mechanical performance and $[G]_8$ composites have the weakest mechanical performance.

In the absorption tests, a 25 mm thick retaining sponge was added to the back of the circular composite plates. The obtained data were analyzed and comparisons were made between the samples. According to the analysis results, $[C_3A]_S$ composites have the best acoustic absorption performance, while $[C]_8$ composites have the weakest acoustic absorption performance.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte hafif yapı malzemelerine olan ilgi artmaktadır. Endüstride kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin iyi olması beklenir. Yapının titreşimlere dayanma kabiliyeti de önemsenmesi gereken bir konudur. Bir mühendislik sisteminde yapı, iç ve dış titreşimlere rağmen sağlam ve hasarsız kalmalıdır [1].

Bununla birlikte maliyetleri azaltmak için hafif yapılar tercih edilmesi, kullanılan komponentlerin küçülmesine yol açmaktadır. İlgili komponentlerin küçülmesi ise doğal frekans bölgelerinin daha geniş spektrumlara yayılmasına neden olmaktadır. Frekans bölgelerinin yayılması rezonans bölgelerini artırır ve komponente bağlı arıza sayısını arttırmakta ve daha sık arıza gözlenmesine neden olmaktadır [2].

Endüstrideki titreşim ve gürültü, dinamik kuvvetlerin yapıyı tahrik etmesi sonucunda oluşmaktadır. Çoğu titreşim ve gürültü problemleri rezonans fenomeniyle ilişkilendirilmektedir. Modları incelememizin bir nedeni, yapılara etki eden dinamik yüklerin doğal frekansları veya titreşim modlarını uyarmasıyla rezonans meydana gelmektedir. Modları incelememizin ikinci bir nedeni, bir yapının eksiksiz bir dinamik tanımının temelini oluşturmalarıdır [3].

Birçok çalışmada kompozit malzemelerin sönüm özellikleri incelenmiş ve sayısal veya deneysel olarak çeşitli yöntemlerle örneğin, modal analiz, çekme testleri, sonlu elemanlar yöntemi, sarsıcı testleri, oberst giriş metodu gibi yöntemlerle ilişkilendirilmiştir [4], [5], [6].

Mühendislik tasarımlarında, bir ürün tasarlanırken genellikle titreşim ve akustik özellikleri göz ardı edilmektedir. Günümüzde malzemelerin mekanik özellikleriyle

birlikte akustik özellikleri de araştırılmaktadır. Akustik özelliklerin araştırılması da bu çalışmanın bir parçasıdır.

Bu çalışmada farklı oranlarda imal edilmiş kumaş dolgulu epoksi esaslı sentetik fiberlerin doğal frekansları, sönüm özellikleri ve akustik davranışları incelenmiştir.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozitler

Kompozit malzeme mühendislikte; cam elyafı plastik, ahşap veya çelik katkılı beton gibi farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip en az iki malzemenin bir araya geldiklerinde birbirlerinin özelliklerini karşılıklı geliştiren bileşenlerden oluşan yapay karışımlardır [7].

Kompozitler normal polimer, inorganik metal veya metal olmayan malzemeler bir araya getirilerek üretilmektedir. Kompozit malzemenin yapısı, matriks ve takviye malzemesi olmak üzere iki malzemedен oluşmaktadır. Kompozit, polimer kullanılarak üretilcekse buna elyaf takviyeli polimer denir. Üretimde kullanılacak herhangi bir metale metal matrisli kompozit denir [8].

2.1.1. Kompozit üretim metotları

Çok sayıda kompozit üretim metodu bulunmaktadır. Endüstride sıklıkla kullanılan üretim metotları:

- El yatırma yöntemi (hand lay-up)
- Püskürtme yöntemi (spray-up)
- Filament sarma yöntemi (filament winding)
- Reçine transfer ile kalıplama reçine enjeksiyonu (RTM)
- Enjeksiyon kalıplama (injection molding)
- Vakum infüzyon yöntemi

2.2. Kompozitlerin Dinamik ve Mekanik Özellikleri

Bir malzemenin dinamik özelliklerini belirlemenin birçok yöntemi bulunmaktadır, bunlar sayısal ve deneysel yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Malzemenin dinamik özelliklerini bulmak ve yorumlayabilmek için malzemenin yoğunluk, elastisite modülü, young modülü gibi malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

George Fairlie ve James Njuguna [2] çalışmasında keten/karbon, hibrid epoksi/ fiber elyaf takviyeli kompozit malzemeleri kullanarak fiber oryantasyonunun etkisini. ASTM D3039 ve ASTM E756'ya göre gerilme ve sönümlenme özellikleri açısından araştırmıştır. Çekme testleri ve sönüm testleri aşağıdaki eşitlik (Denklem 2.1) ile ilişkilendirilmiştir.

$$E = \frac{12\rho l^4 f_n^4}{t^2 C_n^2} \quad (2.1)$$

Burada, E young modülü (GPa), ρ yoğunluk (kg/m^3), l uzunluk (m), f_n $n=1,2,3$. için rezonans frekansı (Hz), t kiriş kalınlığı (m), C_n n modu için katsayıdır.

Çalışmalarında laminatın young modülünün artan frekansla azaldığı, young modülündeki düşüşün tüm numunelerde sabit olduğunu ve laminatın istifleme sırasının etki etmediğini ve değişen frekansın aynı etkiye sahip olduğunu bulunmuştur.

Khoulood Cheour ve arkadaşları [9] çalışmalarında cam/keten hibrit kompozitlerin mekanik ve dinamik özelliklerine olan ilişkisini araştırmıştır. Serbest-serbest sınır koşullarında modal analiz yöntemi kullanarak numunelerin sönüm oranlarını bulmuştur. Buldukları sönüm oranlarını sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırarak yapılan analizin doğru sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Buldukları sonuçları eğilme modülü, aşağıdaki eşitlik (Denklem 2.2) ile ilişkilendirilmiştir.

$$\omega_0 = \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{E_{fx} t^3}{12\rho_s}} \quad (2.2)$$

Burada E_{fx} eğilme modülü, ρ_s yüzey yoğunluğu, t kalınlık, L uzunluk, ω_0 doğal frekanstır.

George Fairlie ve James Njuguna [2] ve Zhang ve arkadaşlarının [10] çalışmalarında gösterdiği laminantın istifle sırasının çekme modülüne etki etmemesine karşın Khloud Cheour ve arkadaşları [9] laminat istifleme sırasının bükülme modülüne etki ettiğini göstermiştir.

Marie Joo Le Guen ve arkadaşları [11] ürettikleri karbon/keten kompozit laminatlardaki katmanların fonksiyonu olarak elastiklik modülü ve sönümleme kapasitesi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Malzemelerin mekanik özellikleri Quasi-statik mekanik testler ile eğilme özelliklerini ASTM D790-03 standartlarına göre bulunmuştur.

Titreşim testleri, serbest-serbest sınır koşullarında, numuneleri tahrik ederek ASTM E1876-09 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda numunelerin sönüm özellikleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar çekme modülü ve eğilme modülü aşağıdaki eşitlik (Denklem 2.3), (Denklem 2.4) ile ilişkilendirilmiştir.

$$E_l = 4\rho L^2 f^2 \quad (2.3)$$

$$E_f = \frac{48\pi^2 \rho L^4 f^2}{\beta^4 h^2} \quad (2.4)$$

Burada E_l çekme modülü, E_f eğilme modülü, ρ yoğunluk, t kalınlık, L kirişin uzunluğu, f rezonans frekansı, β birinci eğilme modu için sabittir.

Hibrit karışım kuralına göre bir model geliştirilmiş, elastisite modülüyle malzemenin sönüm özellikleri hesaplanmıştır. Geliştirdikleri analitik model, hem çekme hem de eğilme modları için deneysel verilerle uyum içinde olduğu için Hibrit karışım metodu,

hibrit kompozit laminant sistemindeki rijitlik-sönüm ilişkisini açıklamak için uygun bir yöntem olduğunu ortaya koymuşlardır.

2.3. Kompozitlerin Dinamik Davranışı ve Sayısal Yöntemlerle İlişkisi

Günümüz teknolojilerinin ilerlemesiyle birlikte birçok mühendislik uygulamalarında kompozit yapıların dinamik analizi yani rezonans frekanslarına bağlı olarak modal kayıp faktörlerine (sönümlenme) ve modal şekillerine dayalı parametrelerin incelenmesi, yapısal dinamik özelliklerin bulunması, dinamik tasarım, hasar tespiti ve durum izlemede önemli bir rol oynamaktadır [12], [13], [14], [15], [16], [17].

Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik camiasında sıklıkla kullanılan, yapısal dinamik analizlerini incelemeye etkin bir çözüm sunmaktadır. Bu sebeple lamine kompozitlerin sönüm özelliklerinin verimli bir şekilde hesaplayabilmek için, genel sonlu elemanlar yazılım platformuna dayalı probleme uygun sayısal yöntemin oluşturulması gerekmektedir.

Bu kapsamda Chandra R. ve arkadaşları [18] ve Treviso A. ve arkadaşları [19] karmaşık modül yaklaşımını ve gerinim enerjisi yöntemlerini kullanarak, lamine kompozitlerde mikro mekanik, makro mekanik ve yapısal seviyelerde sönüm özelliklerini tespit etmişlerdir.

İlk çalışmalarda, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin sönümlenme özelliklerini tanımlamak için karşılıklılık ilkesi kullanılmıştır [20], [21].

Takip eden çalışmalarda, sönümlenme özelliklerini tanımlamak için yapının toplam sönümünü, enerji kaybı ve her bir elemanın gerinim enerjisi fraksiyonu ile birleştirilmiştir [22], [23], [24], [25].

Slater ve arkadaşları [26], iki teoriyi karşılaştırarak, gerinim enerjisi metodunun aslında karmaşık modül yaklaşımının ayrıştırılmış bir formu olduğunu teorik olarak kanıtlamışlardır.

Kyriazoglu ve Guild [27], lamine kompozitlerin titreşim özelliklerinin sonlu elemanlar analizini elde etmek için rezonans testine eşdeğer Rayleigh sönümlemesiyle birleştiren bir hibrit yöntem önermişlerdir. Çalışmalarında Rayleigh katsayılarını, rezonans testinden elde edilen birinci modlardan elde edilen sönüm oranı sonuçları yinelenerek elde etmişlerdir.

Başka bir çalışmada Berthelot ve arkadaşları [28], bir gerinim enerjisi yaklaşımının kullanımının sonlu eleman şemalarına kolayca entegre edilebileceğini ve nihayetinde çeşitli kompozit yapılara uygulanabileceğini kanıtlamışlardır.

2.4. Kompozitlerin Akustik Davranışları

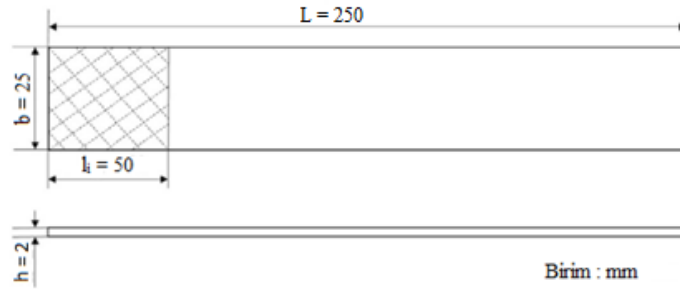
Ses enerjisini sönümleme, yutma özelliği (ses yutum katsayısı, α) ve ses enerjisinin iletimine direngenlik gösteren (ses iletim kaybı [STL], τ) havadan ve yapıdan kaynaklı akustik incelemede kullanılan iki parametredir. Homojen bir malzeme iki özelliğe aynı anda sahip olamamaktadır. Genellikle lifli malzemeler iyi ses emicidir ancak epoksi malzemeyle güçlendirildiklerinde iyi bir ses bariyeri özelliği kazandırılmaktadır [29]. İnorganik lifli malzemeler, geniş spesifik yüzey alanı, yüksek mekanik mukavemet ve mükemmel geçirgenlik gibi özelliklerinden dolayı gürültü azaltma uygulamalarında büyük ilgi görmüştür. Cam yünü, karbon fiber olmak üzere çeşitli inorganik fiberler, on yılda gürültü azaltmada geliştirilmiş ve uygulanmıştır [30].

Kompozitlerin akustik olarak incelenmesinde, literatürde, kullanılan malzemeye, kompozitin üretim şekline, üretilen malzemenin yapısına bağlı olarak çeşitli uygulamalar yapılmıştır. P.A. Thakare ve arkadaşları [29] çalışmalarında, elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin ses iletim kaybını ve çekme özelliklerini araştırmış ve numuneleri arasından mukavemet özellikleri ve akustik özellikleri iyi olanı, yapısal uygulamalar için önermiştir. Y. Yang ve arkadaşları [31], çalışmalarında cam elyafının akustik özelliklerini iyileştirmek için petek sandviç modeli üzerinde araştırma yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda fiberlerin çapında ve fiber içeriğinde değişiklikler yaparak ses yutum kabiliyetini arttırabileceklerini, lif içeriğini arttırarak ses iletim kaybını arttırabileceklerini göstermişlerdir.

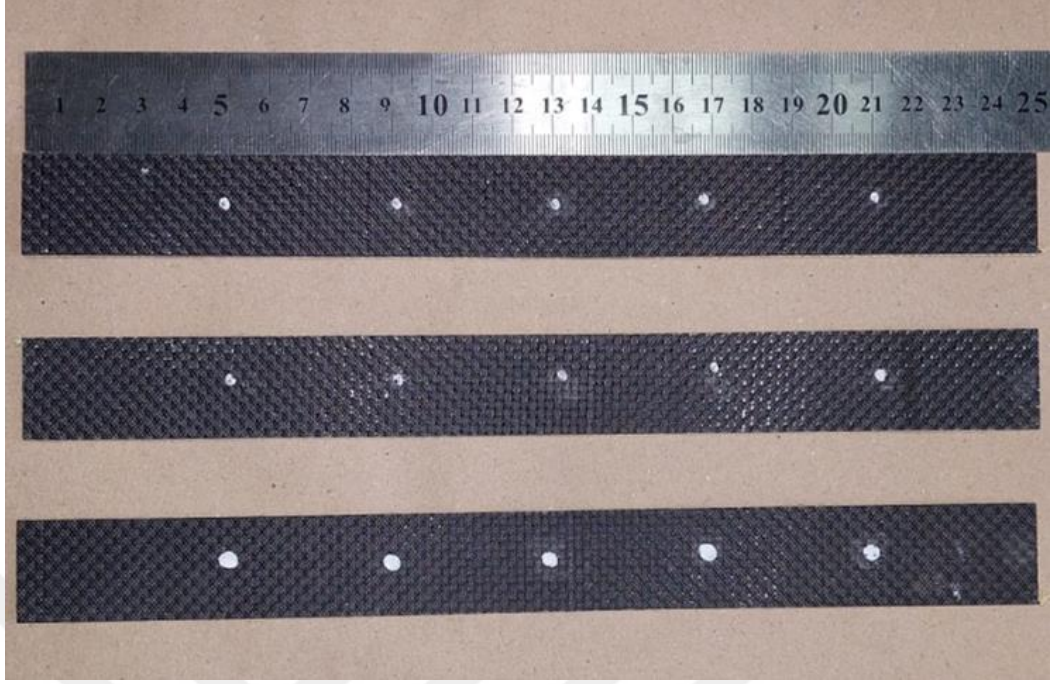
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

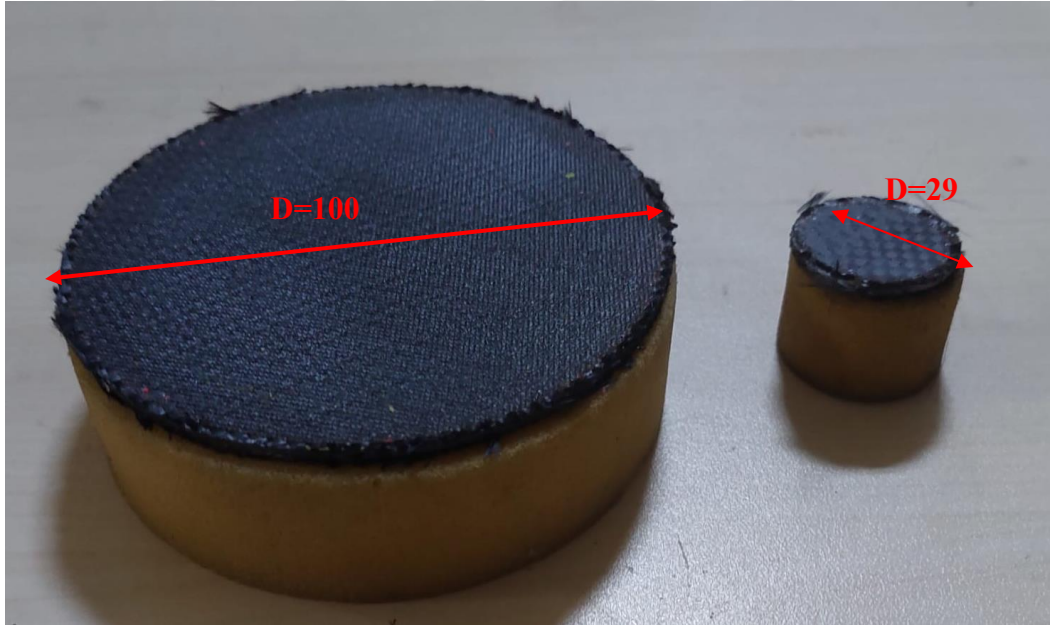
Araştırmada, Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği laboratuvarında üretilen 200 gr/m² alansal yoğunluğa sahip cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf dokuma kumaşların farklı kombinasyonlarında dizilen kompozit malzemeler kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak Biresin Sika CR80 epoksi reçine ve Biresin Sika CH 80-2 sertleştirici kullanılmıştır. Elde edilen malzemeler Şekil 3.1.'de gösterildiği ölçülerde su jeti yardımıyla kesilerek kiriş boyutlarına getirilmiştir. Bununla birlikte Şekil 3.3.'de gösterildiği üzere lazerli kesim ile çapı, 100 mm ve 29 mm olacak şekilde kesilmiştir. Tablo 3.1.'de gösterilen farklı istifleme dizilerine sahip 19 adet kompozit malzemede istifleme sırasının ve yönünün sönüm özellikleri ve akustik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için detaylandırılmıştır. Her bir numunenin yoğunluk, kütle gibi fiziksel bilgileri Tablo 3.1.'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.1. Kiriş numunelerinin ölçüleri



Şekil 3.2. Titreşim test numuneleri



Şekil 3.3. Akustik test numuneleri

Tablo 3.1. Kompozit numunelerin fiziksel özellikleri

	Numune Kodu	Katman Sırası	Kütle (kg)	Yoğunluk (kg/m ³)
1	[C] ₈	CCCCCCCC	0,0165	1320
2	[A] ₈	AAAAAAAA	0,0167	1336
3	[G] ₈	GGGGGGGG	0,0163	1304
4	[A ₂ G C] _s	AAGCCGAA	0,0158	1264
5	[A ₂ C G] _s	AACGGCAA	0,0154	1272
6	[A ₂ G ₂] _s	AAGGGGAA	0,0156	1312
7	[A ₂ C ₂] _s	AACCCCAA	0,0169	1352
8	[G ₂ A C] _s	GGACCAGG	0,0164	1640
9	[G ₂ C A] _s	GGCAACGG	0,0162	1296
10	[G ₂ A ₂] _s	GGAAAAGG	0,0176	1408
11	[C ₂ A G] _s	CCAGGACC	0,0158	1264
12	[C ₂ G A] _s	CCGAAGCC	0,0164	1312
13	[C ₂ A ₂] _s	CCAAAACC	0,0168	1344
14	[A ₃ G] _s	AAAGGAAA	0,0188	1504
15	[A ₃ C] _s	AAACCAAA	0,0166	1280
16	[G ₃ A] _s	GGGAAGGG	0,0156	1248
17	[C ₃ A] _s	CCCAACCC	0,0175	1400

3.2. Deneysel Yöntem

Çalışmada uygulanan deneysel yöntemler kiriş numunelerde modal testler, sarsıcı testleri, plaka numunelerde ise malzemelerin yutum testleri ve ses iletim kaybı testleri yapılmıştır. Her bir kiriş numune 3 adetten oluşmaktadır ve her adet için modal, sarsıcı testleri uygulanmıştır.

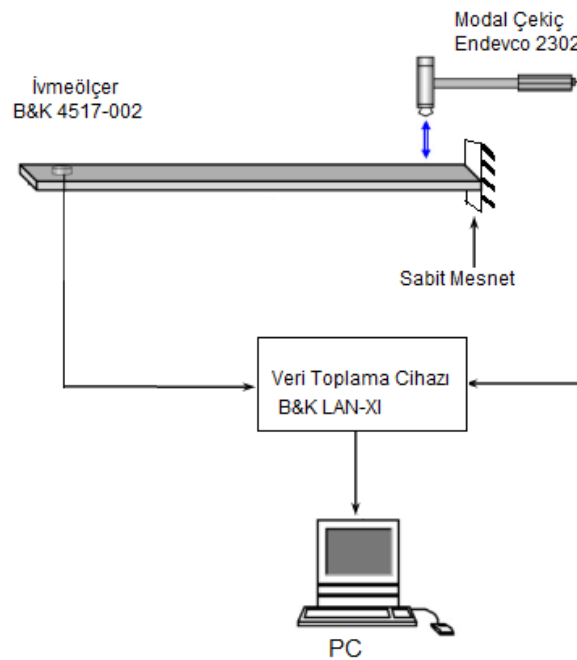
3.2.1. Modal test ve düzeneği

Modal analiz, matematiksel bir dinamik model formüle etmek için yeterli olan tüm modal parametreleri belirleme sürecidir. Çalışmada kullanılan ekipmanlar Brüel & Kjær Pulse Lan XI veri toplama cihazı, Endevco 2302-10 model modal çekici, Brüel & Kjær 4517-002 minyatür ivme sensörüdür. Çalışmanın bu aşamasında 3 adet modal parametre hesaplanmıştır:

- Modal Frekans
- Modal Sönüm
- Mod Şekli

3.2.1.1. Modal test düzeneği

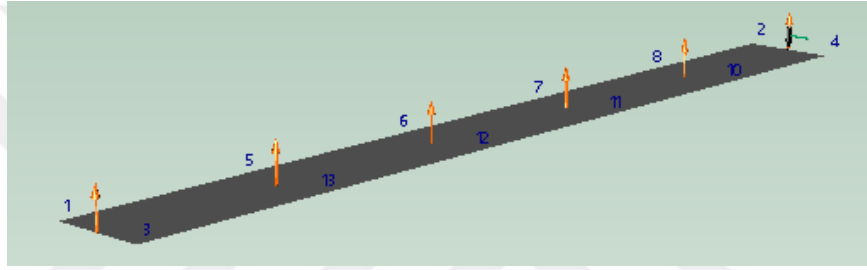
İncelenen kompozit malzemelerin dinamik özellikleri test numunelerinin ankastre haldeki titreşimlerinin analizinden elde edilmiştir. Test ekipmanının şematik gösterimi Şekil 3.4.'de gösterilmiştir. Test numuneleri, kirişin ankastre-serbest sınır koşullarına sahip olacak şekilde, bir ucundan işkence ile sabitlenmiştir. Testte numunelerin bağlandığı yapı, yapı kaynaklı sönümlerden kaçınmak için kütülphe rafi olarak seçilmiştir, Şekil 3.4.'de gösterilmiştir. Numuneleri eğilme titreşimlerini tahrik etmek için bir darbe çekici (Endevco 2302-10 modeli) kullanılmıştır. Tahrik edilen numunelerin titreşim yanıtı bilgisini almak için (B&K 4517-002 model) bir ivmeölçer kullanılmıştır. Kullanılan sensörler, tahrik ve yanıt sinyallerini toplamak, gelen analog verileri dijitalleştirmek için dinamik bir analizör Brüel & Kjør Pulse Lan XI kullanılmıştır. Bilgisayar ile bağlantı kurulan bu cihaz, sinyallerin alınmasını gerçekleştirir. Bilgisayarda ise B&K Connect yazılımı ile toplanan verilerin görüntülenmesi ve işlenmesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Modal analiz test ekipmanının şematik gösterimi

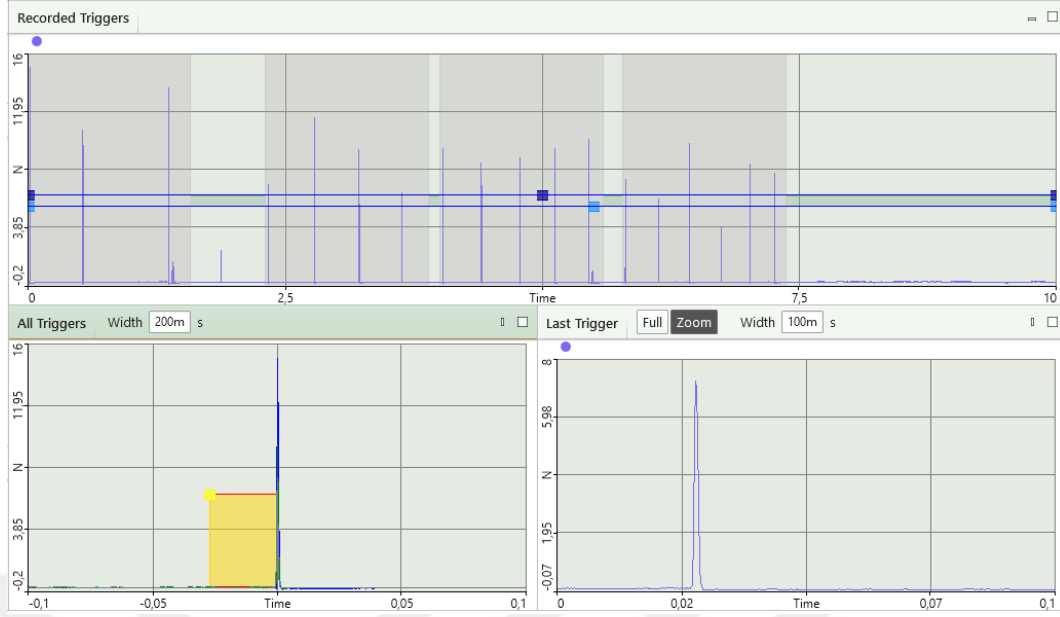
3.2.1.2. Modal verilerin toplanması

Numuneler ankastre-serbest sınır koşullarındayken, serbest uca doğru numunelerin darbe çekiciyle tahrik edilmesi zorlaştığından dolayı tahrik noktası sabit, ankastre uca yakın, ivmeölçerler belirlenen noktalarda gezdirilerek verilerin toplanması gerçekleştirilmiştir. Zaman sinyalleri toplamadan önce BK Connect yazılımında test edilecek numunenin geometrik şekli ve ölçüm alınacak noktalar (node) tanıtılmıştır. Bunun amacı veri çiftlerini, girdi-çıkı olarak ilişkilendirmek, hareket yönünü tanımlamak ve elde edilen bilgilerin görselleşmesini, deplasmanların görülmesini sağlamaktır.



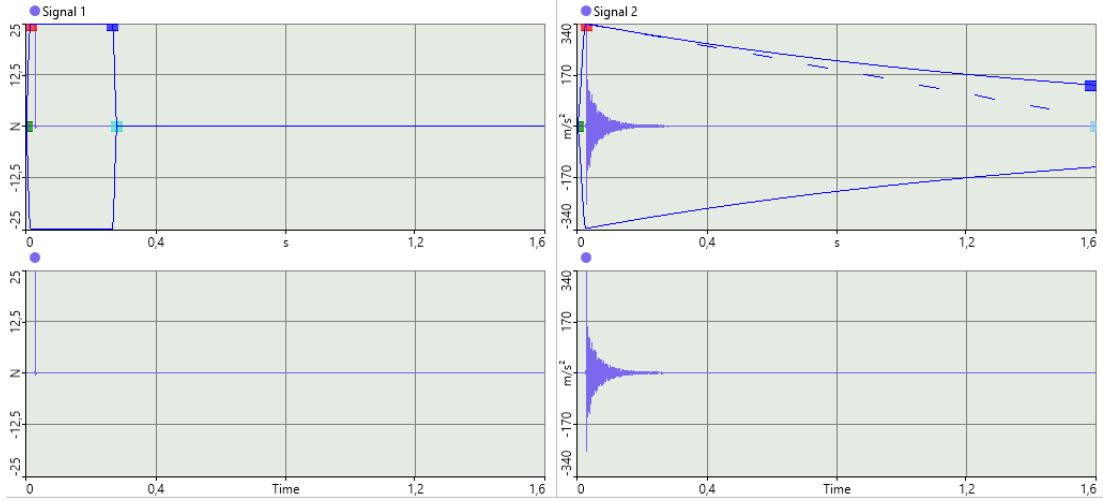
Şekil 3.5. Yazılımdaki numune gösteriminin gösterimi

Ölçüm noktaları Şekil 3.5. Ölçüm yönleriyle birlikte renkli oklarla gösterilmiştir. Ölçüm alınmadan önce ilgilenilen frekans aralığı 2000 Hz olarak belirlenmiştir. Frekans aralığının ve frekans çözünürlüğünün belirlenmesi önem arz etmektedir çünkü numuneden elde edilecek bilgiler bu iki parametrenin sağlıklı bir şekilde işlenmesiyle ortaya çıkmaktadır. Frekans aralığının 2000 Hz’de bırakılmasının nedeni alınan cevapların giderek bozulması ve dinamik bilgilerin okunmasında yaşanan güçlükten kaynaklanmaktadır. Dinamik verilerin okunmasında yaşanan güçlüğü sebebi ise yüksek frekanslarda tahrik enerjisi azaldığından dolayı yüksek mod şekillerinin yakalanamamasından kaynaklanmaktadır. Çözünürlüğün fazla artırılması veri toplama süresi ve veri işleme süresini arttıracığından dolayı çözünürlük 0,625 Hz olacak şekilde 3200 FFT çizgisiyle çizdirilmiştir. Tetikleyici görevi gören modal çekicinin parametre ayarlaması yazılımda otomatik ayarlama seçeneğiyle düzenlenmiştir. Tetiklemeye 27,27 milisaniye pre-delay verilmiştir. Bunun amacı tetiklemeden 27,27 milisaniye önce gerçekleşen olayları da yakalayabilmektir.



Şekil 3.6. Tetikleme parametresinin ayarının gösterimi

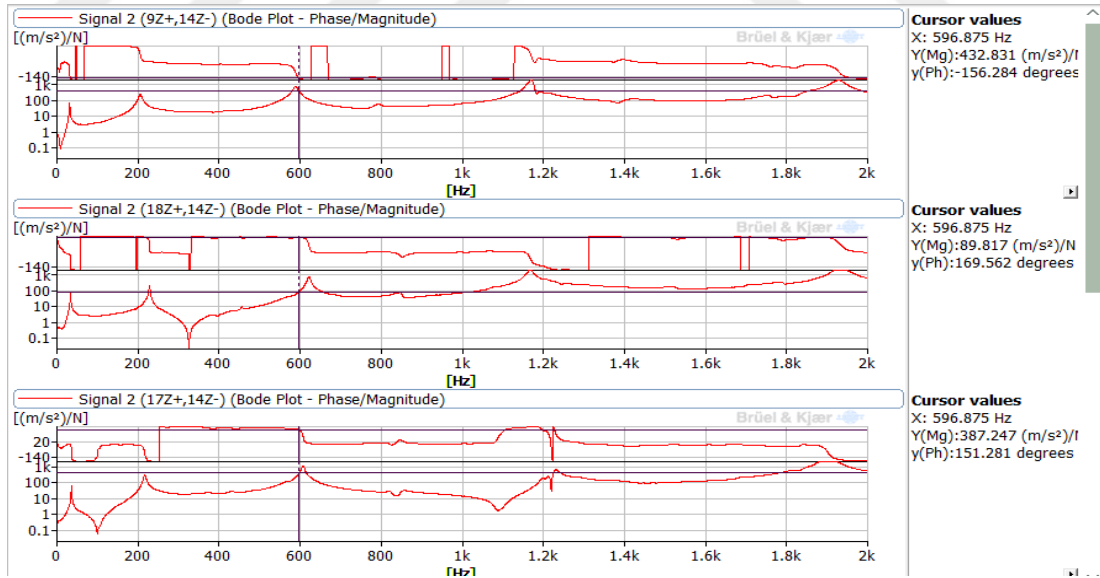
Tetikleme ayarından sonra ivmeölçerden gelen verinin ağırlıklandırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem toplanan zaman sinyallerini frekans alanına dönüştürülürken kullanılmaktadır. Bilindiği üzere bir sinyal frekans alanına Fast Fourier Transform yöntemi ile dönüştürülürken yazılım programları ölçülen sinyali uç uca ekleyerek sonsuz kez devam ettiğini varsaymaktadır. Kullanılan malzemenin rijitliğine göre ölçüm süresi içerisinde ivmeölçerden toplanan zaman sinyalinin bir filtreden geçirilip Fast Fourier Transform işlemine uygun olacak şekilde sonlandırılması gerekmektedir. Eğer bu işlem doğru bir şekilde yapılmazsa sinyalin bitimindeki sayısal veriler ile sinyalin başlangıcındaki sayısal veriler sayısal olarak eklenir ve frekans alanındaki okumalarda yanılmalara neden olmaktadır. Çalışmada malzemelerin sönümü yüksek olduğundan dolayı ekstra bir filtreleme yapılmamıştır. Şekil 3.7.'da görüldüğü üzere ivmeölçerden toplanan zaman sinyalleri 0,4 saniyede sona ermektedir.



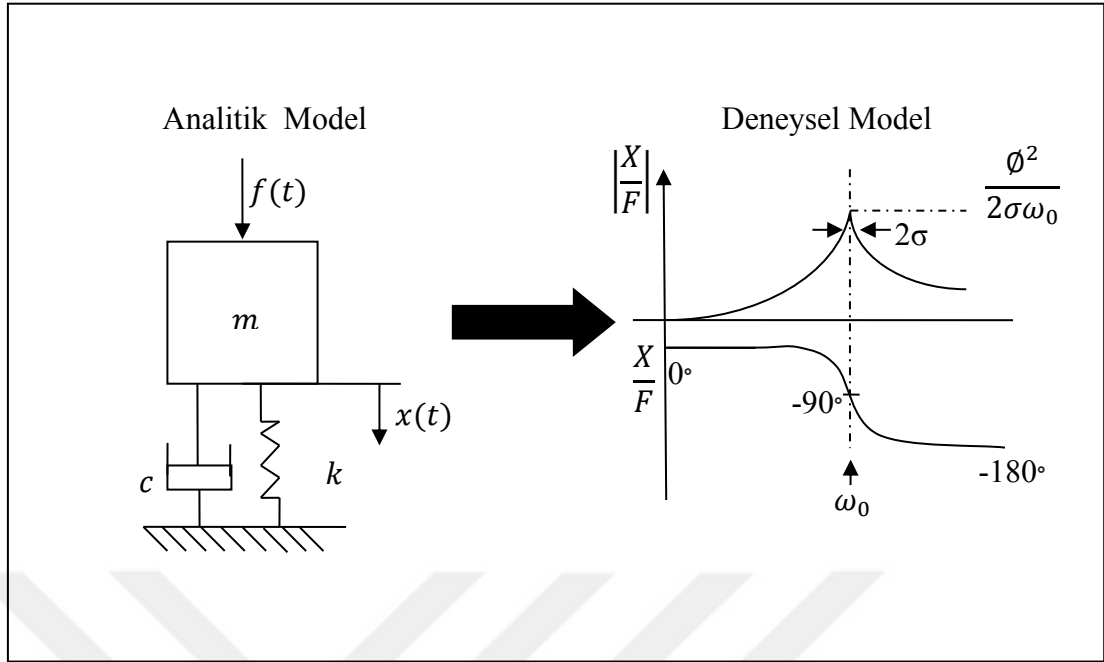
Şekil 3.7. Ağırlıklandırma işleminin gösterimi

3.2.1.3. Modal verilerin işlenmesi

Toplanan zaman sinyalleri yazılım içerisinde FFT dönüşümüyle frekans etki alanında, zaman sinyalleriyle birlikte depolanır, çıkış sinyalinin giriş sinyaline oranından her bir nokta için frekans cevap fonksiyonu (FRF) yazılım tarafından çizilir.



Şekil 3.8. FRF cevap fonksiyonlarının örnek gösterimi



Şekil 3.9. Tek serbestlik dereceli sistem modellerinin gösterimi

Tek serbestlik dereceli deney modelindeki modal parametrelerin ilişkisi aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.1) ile açıklanır.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f \rightarrow \ddot{q} + 2\sigma\dot{q} + \omega_0^2 q = \{\phi\}^T \{f\} \quad (3.1)$$

Burada $m\ddot{x}$ ve $\ddot{q}$ eylemsizlik kuvvetini, $c\dot{x}$ ve $2\sigma\dot{q}$ sönüm bileşenini, kx ve $\omega_0^2 q$ geri çağırıcı kuvvet bileşenini göstermektedir ve x zamana bağlı bir değişkendir.

Sisteme giren ve çıkan kuvvetlerin fonksiyonu bilindiği takdirde, sistemin cevabı hesaplanabilmektedir. Frekans ω alanında lineer sistemin verimli modeli, çıkış spektrumunun bir sistem tanımlayıcısı tarafından ağırlıklandırılmış giriş spektrumu olarak ifade edildiği bir frekans alanı modelidir. Burada $F(\omega)$ giriş spektrumu, $X(\omega)$ çıkış spektrumudur.

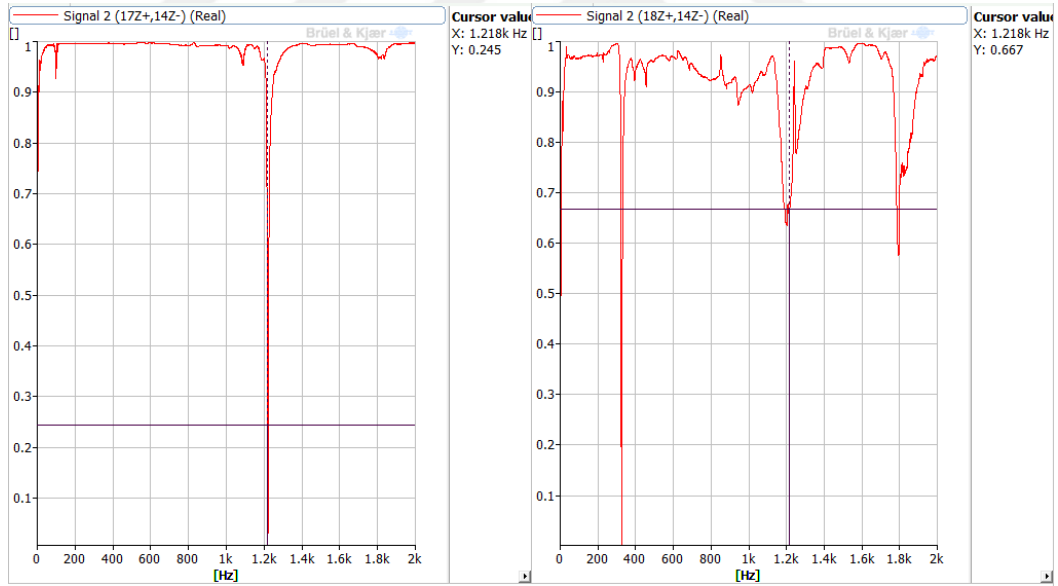
$$X(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (3.2)$$

Bu sistem transfer fonksiyonu $H(\omega)$, Frekans Tepki Fonksiyonu (FRF) olarak adlandırılır ve aşağıdaki eşitlik (3.2) ile tanımlanır: Burada $F(\omega)$ giriş spektrumu, $X(\omega)$ çıkış spektrumudur.

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (3.3)$$

Numunelerden toplanan FRF ve faz bilgileriyle birlikte Coherence fonksiyonu da incelenmiştir. Bunun nedeni coherence fonksiyonu, giriş ve çıkış sinyallerinin lineerliği hakkında bilgi vermektedir. Coherence (tutarlılık) fonksiyonu 0 ile 1 arasında bir değer alır ve bu değerler alınan ölçümlerdeki gürültüyü belirtir. Ölçümdeki gürültü ne kadar yüksek ise coherence değeri 0' a yaklaşmaktadır.

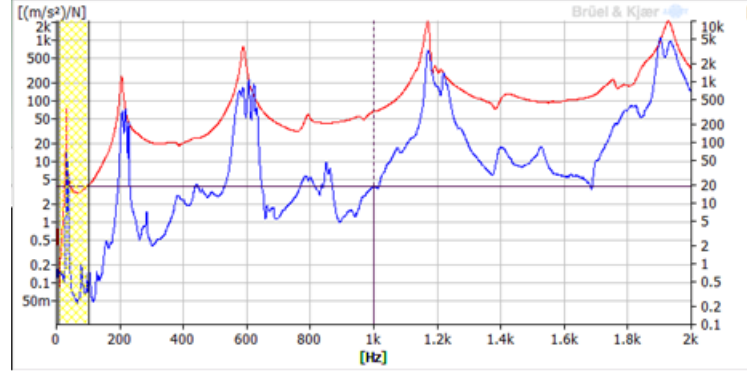
Rezonans bölgelerinde gürültü düzeyinin yüksek olması beklenir. Bu da çalışmada modal frekansların belirlenmesinde yardımcı olmuştur.



Şekil 3.10. Farklı noktalar için Coherence fonksiyonunun örnek gösterimleri

Ardından toplanan FRF verileri referans ölçüm noktasına göre optimize edilir. Veriler işlenirken rezonans bölgeleri belirlendikten sonra tüm FRF eğrileri bir FRF tahmin edici (FRF Estimation) tarafından bir araya getirilerek çizdirilir. İncelenen verilerde giriş gürültüsünü en iyi önlediği ve verideki sızıntıya (leakage) karşı daha az duyarlı

olduğu için H_2 tahmin edicisi kullanılmıştır. Modal parametreler burada çizdirilen, Şekil 3.11.'deki eğri üzerinden hesaplanır.



Şekil 3.11. FRF verilerinin son hali

Modal parametreler, belirlenen rezonans bölgelerinde en küçük kareler yöntemiyle elde edilmiştir. Bununla birlikte mod indikatörler kullanılarak modlar tepe noktası olarak görselleştirilmiştir. Bu da analiz noktasında modun belirlenmesinde kullanılmıştır. Metot olarak kompleks mod indikatörü (CMIF) kullanılmıştır. Bunun sebebi FRF olarak her ne kadar düzgün çizdirilse de birbirine yakın iki mod olabilir, bir tepe gözükmese de orada bir mod olabilmektedir.

En küçük kareler yöntemiyle çözdürülen her bir tepe noktasından çeşitli mod olma ihtimali olan frekanslar seçilerek modal mod tablosu elde edilmiştir. Bu tablonun içerisinde modal sönüm, modal frekans ve komplekslik (complexity) bilgileri bulunmaktadır. Örnek tablo Şekil 3.12.'de verilmiştir. Elde edilen bilgiler tablodaki kriterlerce karşılaştırılarak, komplekslik bilgisinden yardım alınarak seçilmiştir. Komplekslik bilgisi genellikle 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Bazı uygulamalarda, lineer cevabı olmayan malzemelerde, bu değer 1'i aşabilmektedir. Bu bilgi titreşimin hareket halinde ya da durağan bir nokta olduğunun bilgisini vermektedir. Aynı zamanda operasyonel şekil değişimi (ODS), Şekil 3.14.'de gösterilmiştir, simülasyonunun görselleşmesinde yardımcı olmaktadır.

Mode	Damped Frequency (Hz)	Dampi...	Description	Complexity	Parameter Estimation Method
☒ 1	31,42163	1,09033		0,15439	Least Squares Global Partial Fractio...
☒ 2	205,69442	1,56711		0,078	Least Squares Global Partial Fractio...
☒ 3	577,01746	1,87623		0,23296	Least Squares Global Partial Fractio...
☒ 4	1168,28362	0,60607		0,17877	Least Squares Global Partial Fractio...

Şekil 3.12. 8 karbon numunesinin mod tablosunun örnek gösterimi

Ölçülen ve hesaplanan mod şekilleri arasındaki karşılaştırmayı ölçülendirmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerle, ölçülen ya da hesaplanan mod şekilleriyle birlikte deneysel ya da teorik olma zorunluluğu aramaksızın herhangi çift mod şekli karşılaştırılabilmektedir. Aşağıda verilen denklemler mod şekillerinin kompleks olabileceği, deneysel ölçülmüş mod şekli $\{\Psi_X\}$ ve teorik, analitik mod şekli $\{\Psi_A\}$ kabulüyle oluşturulmuştur.

Modal Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion, MAC) deneysel ya da hesaplanmış mod şekil vektörlerinin dağılımını hesaplamakta kullanılmaktadır. Bu parametre aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.5 ya da Denklem 3.6) ile ifade edilir [32].

$$MAC(A, X) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n (\Psi_X)_j (\Psi_A)_j^* \right|^2}{\left(\sum_{j=1}^n (\Psi_X)_j (\Psi_X)_j^* \right) \left(\sum_{j=1}^n (\Psi_A)_j (\Psi_A)_j^* \right)} \quad (3.4)$$

Burada n , A ve X mod şekillerinin serbestlik derecesini, j kompleks mod şekillerini, * referans alınan mod şeklini, Ψ_X deneysel mod şeklini, Ψ_A teorik mod şeklinin matrisini temsil etmektedir.

$$MAC(A, X) = \frac{|\{\Psi_X\}^T \{\Psi_A\}|^2}{(\{\Psi_X\}^T \{\Psi_X\})(\{\Psi_A\}^T \{\Psi_A\})} \quad (3.5)$$

Burada $\{\Psi_X\}^T$ deneysel mod şekli matrisinin transpozisini, $\{\Psi_A\}^T$ teorik mod şekil matrisinin transpozisini, Ψ_X deneysel mod şeklini, Ψ_A teorik mod şeklinin matrisini temsil etmektedir.

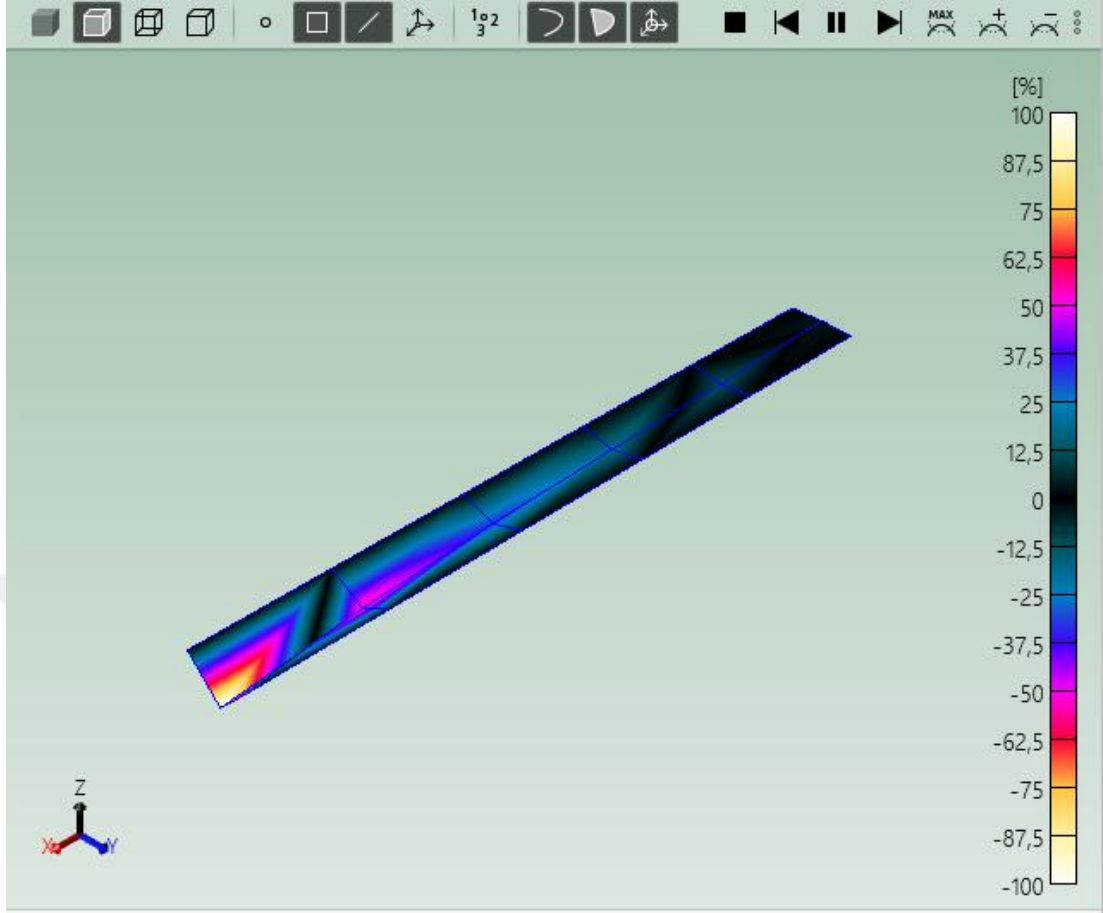
Bu denklemlerden mod şekli verisi kompleks olsa dahi sonuç skaler bir değer alacağı aşikardır. Modal güvence kriteri sapmalardan ya da sistematik sapmalardan kaynaklı dağılımları, mod vektörlerinin dağılımlarıyla ilgilenmediği için, ayırt edememektedir. Buna rağmen iki mod şekli verisi arasındaki korelasyon derecesini ölçmek için faydalı bir araçtır. Modal güvence kriterinde bir mod şekli ile başka bir mod şekli dağılımının hesaplanması işlemine tabi tutulursa CrossMAC denilmektedir. Bu işlem bize elde edilen mod şekillerinin tutarlılığı hakkında bilgi vermektedir [32].

Aynı elyaf kumaş dizilimine sahip numunelerden modal test ile elde edilen modların doğruluğu CrossMAC kullanılarak tutarlılığı görülmüştür. Bu işlem mod frekanslarının seçilmesinde önem arz etmektedir. Burada iki mod arasındaki benzerlik 0 ile 1 arasında değer almaktadır. İki farklı modun mümkün olduğunca 0'a yakın değer alması gerekmektedir.

		8 Karbon Numune 3		
8 Karbon Numune 1	Frekans [Hz]	32,084	205,435	587,836
	32,265	0,945729	0,344599	0,082716
	205,694	0,384212	0,988249	0,041442
	577,017	0,067697	0,062968	0,90956

Şekil 3.13. 8 Karbon numune için CrossMAC özelliğinin gösterimi

Elde edilen verilerle birlikte yazılıma tanıtılmış geometri üzerinde sonuçlar görselleştirilmiştir. Bu da toplanan verilerin doğruluğu kadar hareketin nasıl gerçekleştiği, bir rezonans bölgesi veya hareket eden bir titreşim halinde olması hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 3.14. Geometri üzerinde 1. modun örnek gösterimi

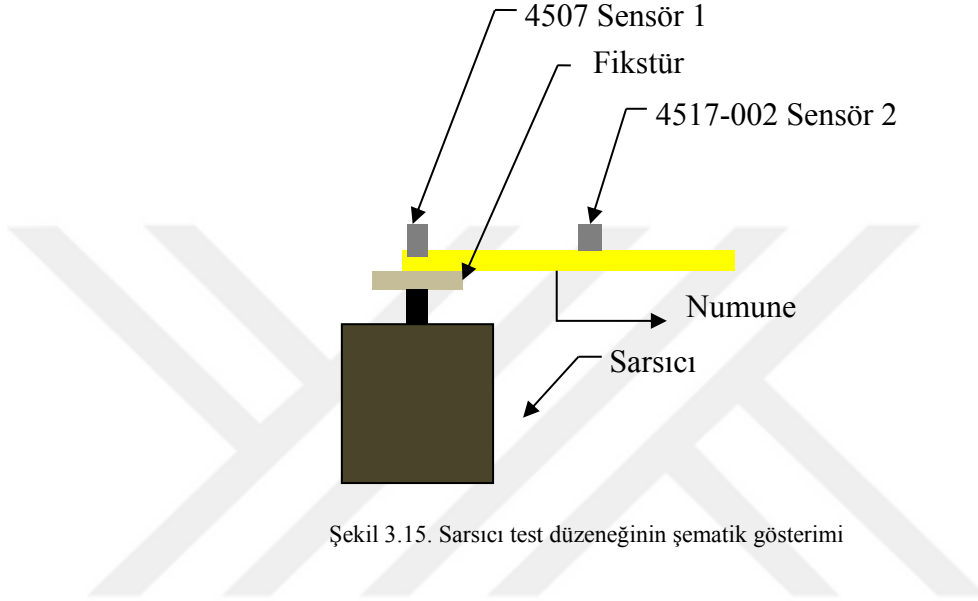
3.2.2. Sarsıcı test ve düzeneği

İncelenen kompozit malzemelerin dinamik özellikleri test numunelerinin ankastre haldeki titreşimlerinin analizinden elde edilmiştir. Brüel & Kjær Photon+ veri toplama cihazı, Brüel & Kjær 4517-002 minyatür ivme sensörü Brüel & Kjær 4533 ivme sensörü, LDS sarsıcı kullanılmıştır. Çalışmanın bu aşamasında rezonans frekansları ve sönüm bilgileri elde edilmiştir.

3.2.2.1. Sarsıcı test düzeneği

Test ekipmanının şematik gösterimi Şekil 3.15.'te gösterilmiştir. Test numuneleri, kirişin ankastre-serbest sınır koşullarına sahip olacak şekilde, bir ucundan fiktür ile sarsıcıya sabitlenmiştir. Numunelerde 6 adet nokta, node bulunmaktadır. Bu testte sensör olarak 2 adet ivmeölçer sensörü kullanılmıştır. Tahrik edilen numunelerin titreşim yanıtı bilgisini almak için (B&K 4517-002 model) bir ivmeölçer

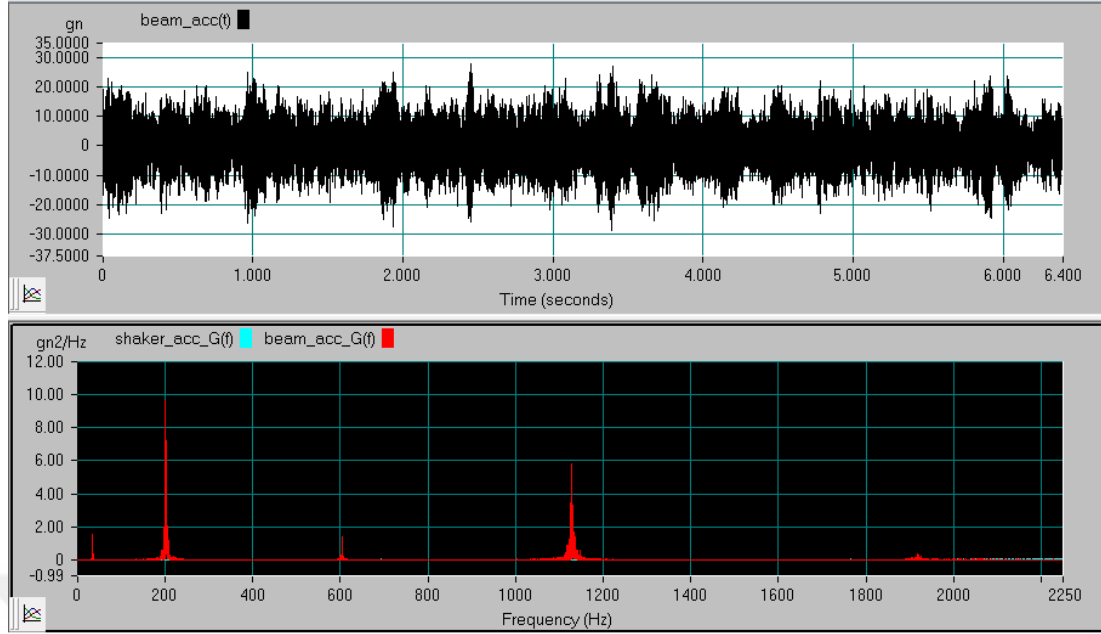
kullanılmıştır. Kullanılan sensörler, tahrik ve yanıt sinyallerini toplamak, gelen analog verileri dijitalleştirmek için dinamik bir analizör Brüel & Kjær Photon + kullanılmıştır. Bilgisayar ile bağlantı kurulan bu cihaz, sinyallerin alınmasını gerçekleştirir. Bilgisayarda ise B&K RT Pro Photon yazılımı ile toplanan verilerin görüntülenmesi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15. Sarsıcı test düzeneğinin şematik gösterimi

3.2.2.2. Sarsıcı verilerin toplanması

Photon yazılımında ivme ölçerler teknik bilgileri, hassasiyetleri işlenerek girdi bilgisi olarak kullanılmıştır. Çıkış sinyali sarsıcının amplifikatörüne BNC-BNC kabloyla aktarılmıştır ve sarsıcıda tahrik oluşturulmuştur. Sarsıcı tahrikli titreşim verileri, 2000 Hz frekans aralığında 12800 FFT çizgisiyle toplanmıştır. Sarsıcı verileri 3 aşamada toplanmıştır.



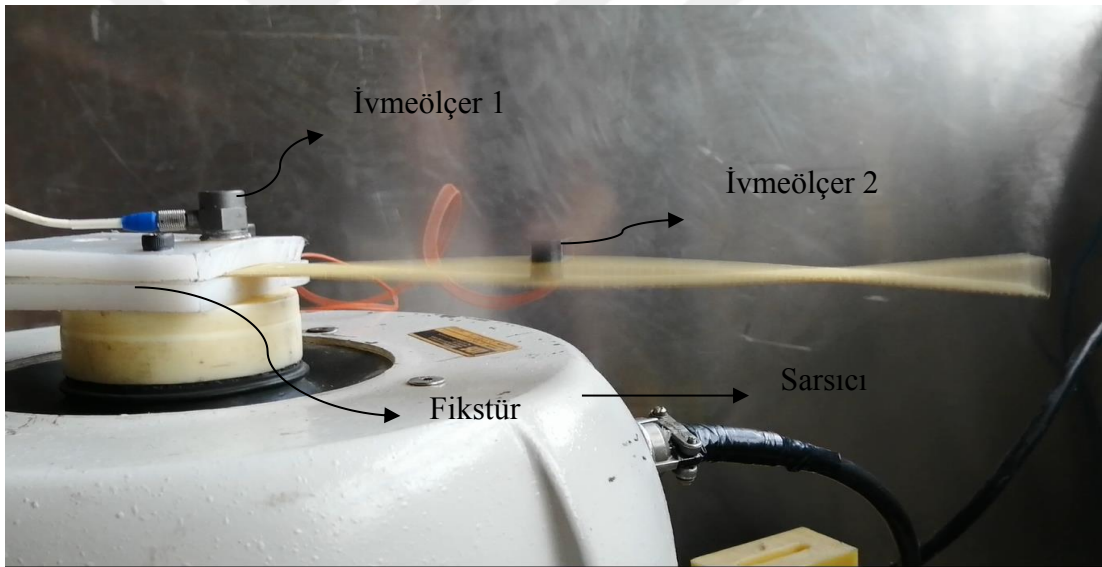
Şekil 3.16. Beyaz gürültü ile toplanan verinin gösterimi

Sarsıcı testlerinde veri toplamanın birinci aşamasında, numune üzerine yerleştirilen ivmeölçer numunenin orta noktasına ve uç kısmına konulmuştur. Numunelere beyaz gürültü verilerek rezonans frekansları gözlemlenmiştir. Beyaz gürültü tüm frekanslarda malzemeyi tahrik etmektedir. Bu durum rezonans frekanslarını gözlemlenebilir hale getirmektedir. FFT çizgi sayısının yeterli olmadığı durumlarda çözünürlük düşük olmaktadır ve rezonans frekansı tam tespit edilememektedir.

Sarsıcı testlerinde veri toplamanın ikinci aşamasında tespit edilen rezonans bölgelerinde, sarsıcıya sweep-sine, artıp azalan sinüs sinyali göndererek beyaz gürültü ölçümünden belirlenen frekans aralıklarındaki maksimum ivme genliğinin elde edildiği frekanslar tespit edilmiştir. Bu, Şekil 3.17. ve Şekil 3.18.'de gösterilmiştir, numunelerin modların bulunmasını ve görsel olarak görünmesini sağlamaktadır.

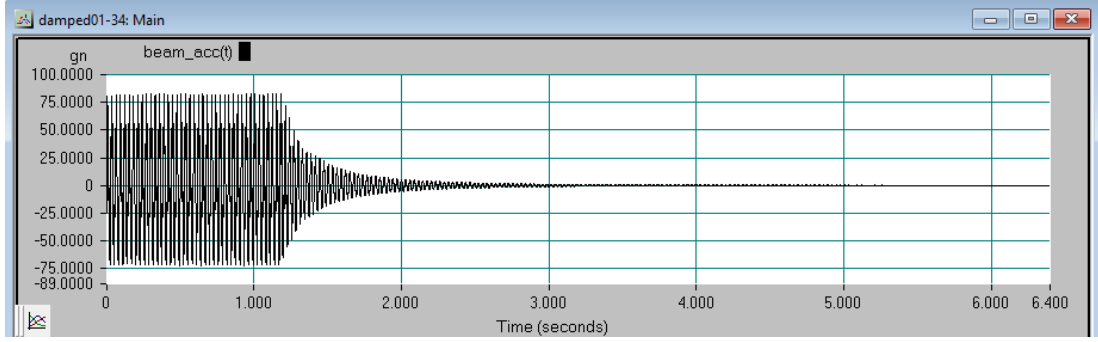


Şekil 3.17. Numunenin birinci modunun gösterimi



Şekil 3.18. Numunenin ikinci modunun gösterimi

Sarsıcı testlerinde veri toplamanın üçüncü aşamasında, sarsıcı her bir rezonans frekansında saf sinüs sinyali ile tahrik edilmiştir. Numunenin 3. noktasından ve 6. noktasından sırasıyla titreşim verileri alınmıştır. Numune tahrik edilirken kayıt alınmaya başlanmıştır ve sarsıcı durdurularak numunenin sönüm hareketi kaydedilmiştir.



Şekil 3.19. Kaydedilen ivme-zaman sinyalinin gösterimi

3.2.2.3. Sarsıcı verilerinin işlenmesi

Elde edilen zaman sinyalleri Excel'e aktarılarak işlenmek üzere MATLAB yazılımına aktarılmış, sönüm katsayısı hesaplanmıştır. Sönüm katsayısının hesaplanmasında logaritmik azalma yöntemi kullanılmıştır. Başlangıç yer değiştirmesi ve hızı bilinen tek serbestlik dereceli bir sistemin azalan yer değiştirmesi aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.4) ile hesaplanmaktadır.

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left(x_0 \cos\omega_D t + \frac{\dot{x}_0 + \xi\omega_n x_0}{\omega_D} \sin\omega_D t \right) \quad (3.6)$$

Burada $\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ sönümlenen sistemin salınım frekansıdır. ξ sönümleme, ω_n doğal frekans, t zaman, x_0 başlangıç yer değiştirmesi, $\dot{x}_0$ başlangıç hızıdır.

Logaritmik azalma yönteminde birbiri ardına gelen tepe noktaların arasında sönümlenen sistemin periyodu kadar geçen süre bilgisi kullanılarak cevapların oranı aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.5) bulunur.

$$\frac{x_i}{x_{i+1}} = e^{\left(\frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \right)} \quad (3.7)$$

Burada x_i ilk tepe genliği, x_{i+1} sonraki tepe genliği, ξ sönümlemedir.

Elde edilen denklemi logaritmik fonksiyon olarak yazılarak aşağıdaki ifade (Denklem 3.6) ile yeni bir katsayı δ tanımlanmaktadır.

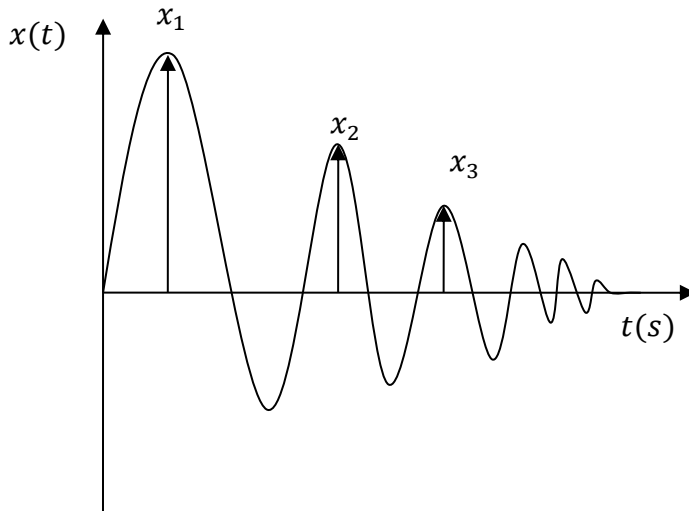
$$\delta = \ln \frac{x_i}{x_{i+1}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (3.8)$$

Burada δ , logaritmik azalma, x_i ilk genlik, x_{i+1} bir sonraki genlik olarak adlandırılmaktadır.

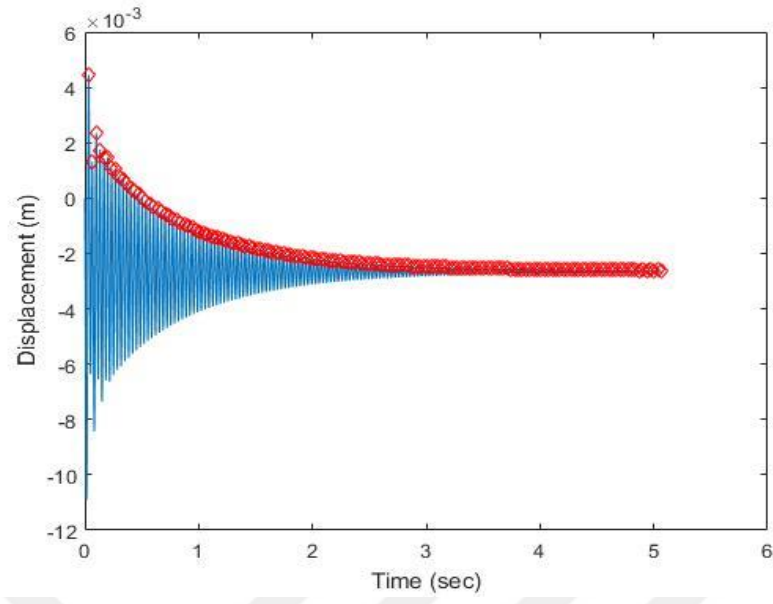
Sönümleme ifadesi ξ yalnız bırakılarak aşağıdaki ifade (Denklem 3.7) ile sönüm elde edilir.

$$\xi = \frac{\delta^2}{\delta^2 + (2\pi)^2} \quad (3.9)$$

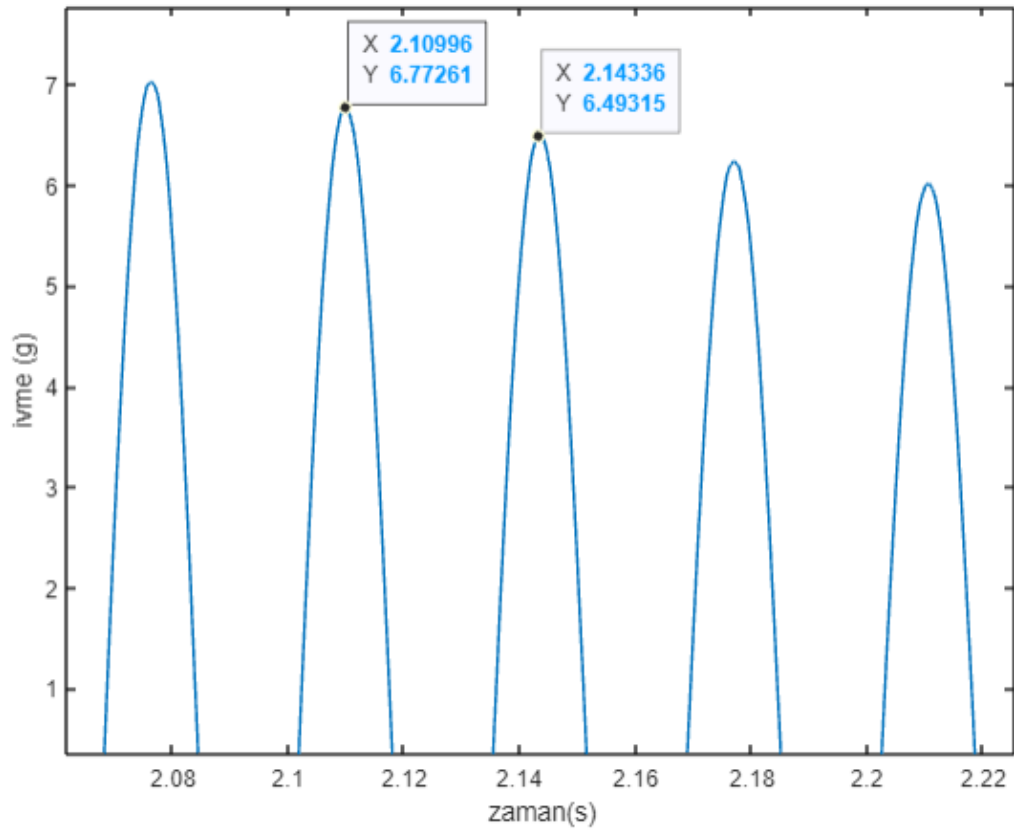
Burada ξ ile sönümleme ifade edilir.



Şekil 3.20. Logaritmik azalma metodunun gösterimi



Şekil 3.21. Logaritmik azalmanın 8 karbon ölçüm verisi üzerinde gösterimi



Şekil 3.22. 8 Karbon numunesinin birinci modunun kullanılan tepe nokta değerleri

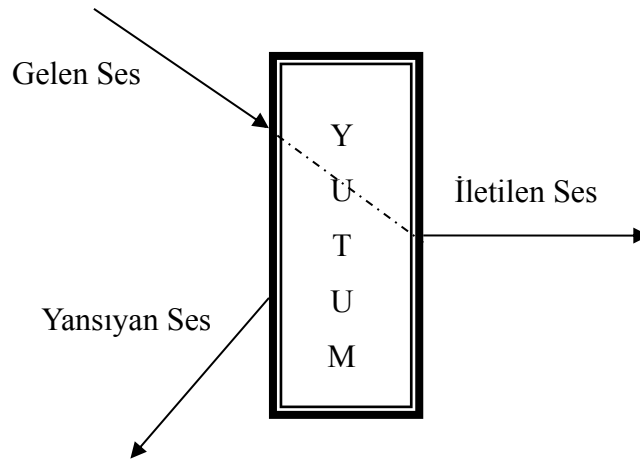
Burada 8 karbon numunesinin birinci modu için hesaplanan logaritmik azalma değeri $\delta = 0,037195$, sönümleme değeri ise $\xi = 0,00591$ 'dir.

3.2.3. Akustik yutum testleri

İncelenen kompozit malzemelerin akustik yutum karakteristiği, B&K 4206 akustik empedans tüpü deneyiyle elde edilmiştir. Testlerde kullanılan ekipmanlar B&K 4206 empedans tüpü, B&K 3560C-S29 veri toplama cihazı, Type 4187 mikrofon, Type 2716-C amplifikatör, kullanılmıştır. ASTM E1050-12 standardına göre ölçümler gerçekleştirilmiştir. 100 ve 29 mm çapında elde edilen dairesel numunelerden, Normal Incidence yöntemiyle yutum katsayısı α aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.11) ile elde edilmiştir.

$$\alpha = \frac{\text{yüzey tarafından yutulan enerji}}{\text{yüzeye gelen akustik enerji}} \quad (3.10)$$

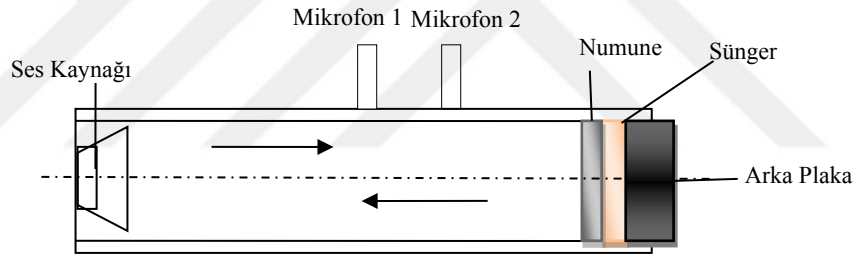
Ses yutum katsayısı, yüzey tarafından yutulan enerjinin yüzeye gelen akustik enerjinin oranıdır.



Şekil 3.23. Ses yutumunun gösterimi

3.2.3.1. Yutum test düzeneği

Empedans tüpünün bir ucunda bir ses kaynağı bulunmaktadır ve diğer ucuna numune yerleştirilmiştir. Hoparlör, tüpteki düzlem dalgalar numuneye çarptığında ve yansıdığında yayılan geniş bantlı, sabit rastgele ses dalgaları üretir. Yayılma, temas ve yansıma, tüp içinde ileri ve geri hareket eden dalgaların üst üste binmesi nedeniyle duran dalga girişim deseniyle sonuçlanır. İki sabit konumdaki Type 4187 mikrofonlar ses basıncını ölçerek ve iki kanallı bir dijital frekans analizörü kullanarak karmaşık transfer fonksiyonunu hesaplayarak, ses absorpsiyonunu ve karmaşık yansıma katsayılarını ve malzemenin normal akustik empedansını belirlemek mümkündür. Ses kaynağına gönderilecek olan beyaz gürültü sinyali Pulse Labshop yazılımı üzerinden Type 2716-C amplifikatöre gönderilir burada yükseltilecek sinyal, ses kaynağına iletilir ve bu sayede istenilen şiddette ses üretilebilmektedir.

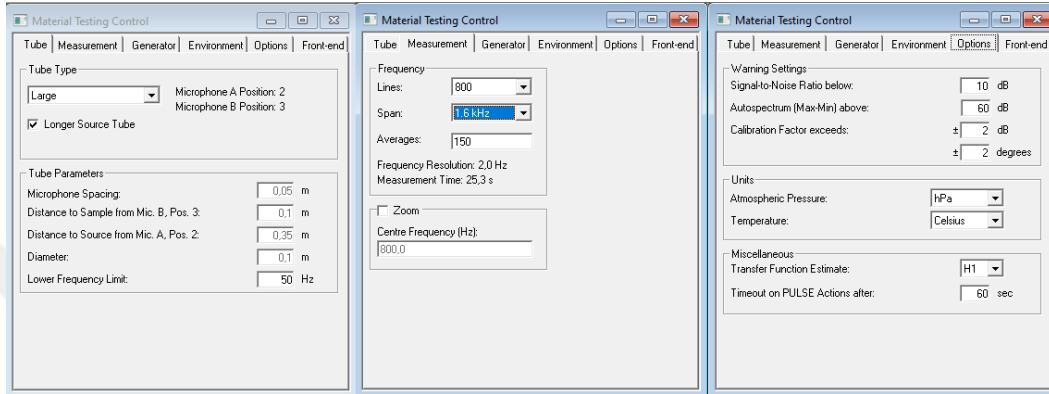


Şekil 3.24. İki mikrofonlu empedans tüpünün şematik gösterimi [32]

3.2.3.2. Akustik yutum verilerinin toplanması

Ölçüm konfigürasyonları düşük frekanslar için geniş tüp konfigürasyonuna göre seçilmiştir, mikrofonlar arası uzaklık 50 mm, numune ile numuneye yakın olan mikrofon B arası uzaklık 100 mm, ses kaynağı ve ses kaynağına yakın olan mikrofon A arası uzaklık 350 mm ve tüp çapı 100 mm'dir. Yüksek frekanslar için ise küçük tüp konfigürasyonuna göre seçilmiştir. Küçük tüp konfigürasyonunda mikrofonlar arası uzaklık 20 mm, numune ile numuneye yakın olan mikrofon B arası uzaklık 35 mm, ses kaynağı ve ses kaynağına yakın olan mikrofon A arası uzaklık 370 mm ve tüp çapı 29 mm'dir.

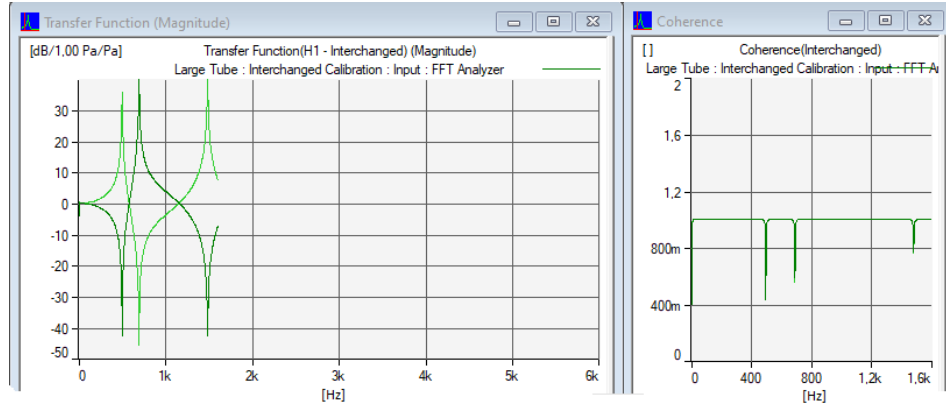
Geniş tüp için ölçüm frekans aralığı 50-1600 Hz, 800 FFT çizgisi, 2.0 Hz frekans çözünürlüğünde, küçük tüp konfigürasyonu için frekans aralığı 500-6400 Hz, 800 FFT çizgisi, 8.0 Hz frekans çözünürlüğünde veriler toplanmıştır. Transfer fonksiyon tahmini için H_1 parametresi kullanılmıştır. Ölçüm konfigürasyonlarının Labshop yazılımındaki gösterimi Şekil 3.25.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Labshop yazılımındaki ölçüm konfigürasyonlarının gösterimi

Ölçüm konfigürasyonları belirlendikten sonra, ölçümü yapacak olan mikrofonlar B&K Type 4231 akustik kalibratör ile kalibrasyonu yapılmıştır. Mikrofon kalibrasyonunun ardından empedans tüpündeki ölçümleri yapabilmek için arka plan gürültüsü ölçülmüştür.

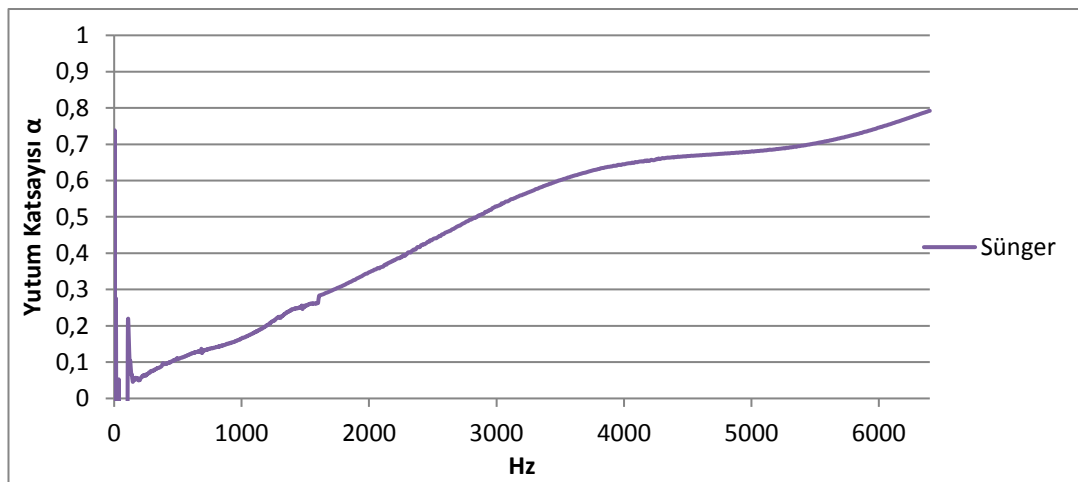
Bu ölçüm yazılımında kaydedildikten sonra transfer fonksiyon kalibrasyonu işlemi yapılmıştır. Transfer fonksiyon kalibrasyonu, iki mikrofonlu konfigürasyonda ölçüm yapılırken mikrofonlar arasındaki faz ve genlik farklarını ayıklamak için kullanılmaktadır. Transfer fonksiyon kalibrasyon işlemi, mikrofonların yerleri değiştirilerek, içi boş olan empedans tüpünde ölçüm alınır ardından mikrofonların yeri eski haline getirilerek tekrar ölçüm alınır. Bu işlem sonucunda transfer fonksiyon elde edilir. Şekil 3.26.'de transfer fonksiyon kalibrasyonunun değiştirilmiş mikrofonlar için elde edilmiş sonucu gösterilmektedir.



Şekil 3.26. Transfer fonksiyon kalibrasyonunun gösterimi

Kalibrasyon işlemlerinin ardından empedans tüpü yutum testleri için hazırlanmıştır. Numunelerin arkasına 25 mm kalınlığında sünger yerleştirilip ölçüm işlemi başlatılmıştır. Genellikle lifli malzemeler iyi ses emicidir ancak epoksi malzemeyle güçlendirildiklerinde iyi bir ses bariyeri özelliği kazandırılmaktadır [29]. Kullanılan numuneler de epoksi malzemeyle güçlendirildiği ve numune kalınlıkları 2 mm olduğundan dolayı sadece numunelerin kullanıldığı durumda yutum özellikleri anlaşılamamaktadır. Sünger kullanımıyla numune kalınlığının artırılması hedeflenmiştir. Kullanılan süngerin yutuculuğu Şekil 3.27.'de gösterilmiştir.

Her bir numune için ölçüm prosedürü, numune çıkartılıp tekrar takılacak şekilde 3 kez tekrarlanmıştır. Ölçülen yutum karakteristiği sonuçlarının ortalaması alınarak nihai sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.27. Ölçümlerde kullanılan sünger malzemesinin yutumu

3.2.3.3. Akustik yutum verilerinin işlenmesi

Empedans tüpüne yerleştirilen numunelerin kompleks akustik transfer fonksiyonu aşağıdaki eşitlik (Denklemler 3.12) ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{H} = \frac{G_{12}}{G_{11}} = |\bar{H}|e^{j\bar{\varphi}} = \bar{H}_r + j\bar{H}_i \quad (3.11)$$

Bu denklemlerde G_{12} çapraz güç spektrumunun, G_{11} giriş oto güç spektrumuna oranını alarak H transfer fonksiyonunu belirler. Transfer fonksiyonu ayrıca, test örneğine en yakın mikrofondaki akustik basıncın Fourier dönüşümünün, ses kaynağına en yakın mikrofondaki akustik basıncın Fourier dönüşümüne karmaşık oranından doğrudan hesaplanabilir. Tek bir ölçüm için her iki yöntem de aynı sonuçları verir [33].

$$\alpha = 1 - |R|^2 = 1 - R_r^2 - R_i^2 \quad (3.12)$$

Burada α yutum katsayısı, R kompleks akustik yansımaya katsayısını, R_r reel yansımaya katsayısını, R_i imajiner yansımaya katsayısını temsil etmektedir.

3.2.4. Akustik ses iletim kaybı testleri

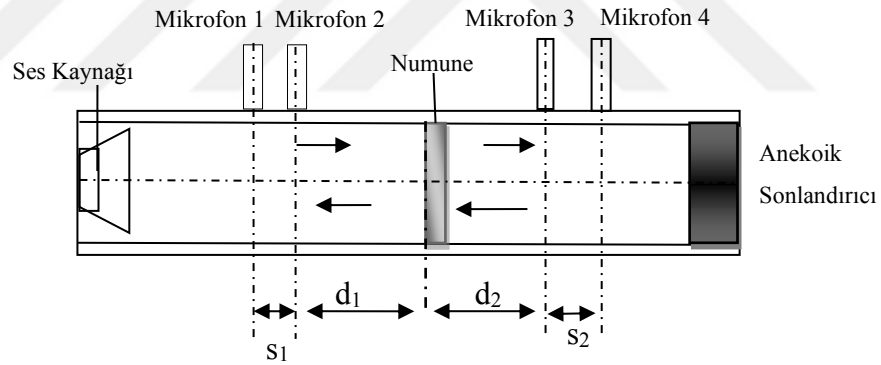
İncelenen kompozit malzemelerin ses iletim kaybı karakteristiği, B&K 4206 akustik empedans tüpü deneyiyle elde edilmiştir. Testlerde kullanılan ekipmanlar B&K 4206 empedans tüpü, B&K 3560C-S29 veri toplama cihazı, Type 4187 mikrofön, Type 2716-C amplifikatör, kullanılmıştır. ASTM E2611-17 standartına göre ölçümler gerçekleştirilmiştir. 100 mm ve 29 mm çapında elde edilen dairesel numunelerden, ses iletim kaybı (STL) elde edilmiştir. STL malzemenin ses bariyeri özelliğinin etkinliğini belirten bir parametredir. İletim oranı τ , bir malzemenin diğer tarafına iletilen ses enerjisinin, malzemeye gelen ses enerjisine oranı olarak tarif edilir. İletim oranı ve ses iletim kaybı ilişkisi aşağıdaki eşitlik (Denklemler 3.11) ile ifade edilir.

$$STL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (3.13)$$

Burada τ ses iletim katsayısıdır.

3.2.4.1. Ses iletim kaybı test düzeneği

Empedans tüpünün bir ucuna bir ses kaynağı bulunmaktadır ve numuneler sırayla bir tutucuya yerleştirilmiştir. Ses kaynağı, düzlem dalgalar olarak yayılan geniş bant, sabit rastgele ses dalgaları üretir. Düzlem dalgalar, bir kısmı kaynak tüpe geri yansıyan, bir kısmı malzeme tarafından emilen ve bir kısmı malzemeden geçerek alıcı tüpe geçen dalgaların bir kısmı ile tutucudaki numuneye çarpar. Düzlem dalgaların malzemeden geçen kısmı, dalgaların bir kısmının yansıtıldığı ve bir kısmının tüpten çıktığı alıcı tüpün ucuyla karşılaşır. Dört sabit konumdaki Type 4187 mikrofonlar (ikisi kaynak tüpte ve ikisi alıcı tüpte) ses basıncını ölçerek ve dört kanallı bir dijital frekans analizörü kullanarak karmaşık transfer fonksiyonunu hesaplanarak, malzemenin iletim kaybı belirlenmiştir. Ses kaynağına gönderilecek olan beyaz gürültü sinyali Pulse Labshop yazılımı üzerinden Type 2716-C amplifikatöre gönderilir, amplifikatörde yükseltilecek sinyal, ses kaynağına iletilir ve bu sayede istenilen şiddette ses üretilebilmektedir.



Şekil 3.28. Dört mikrofona sahip TF yöntemi için STL tüpünün şematik diyagramı [32]



Şekil 3.29. Ses iletim kaybı için kullanılan geniş tüpün gösterimi

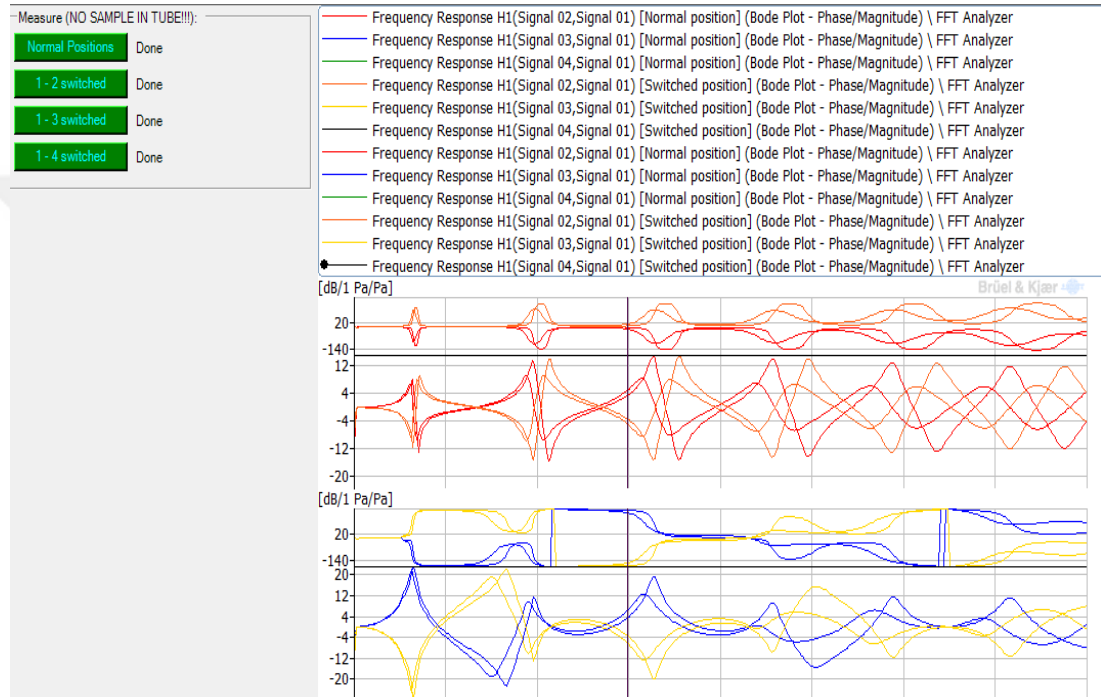
3.2.4.2. Ses iletim kaybı verilerinin toplanması

Ölçüm konfigürasyonları, geniş tüp konfigürasyonuna göre, mikrofonlar arası uzaklık (s_1, s_2) 50 mm, numune ile numuneye yakın olan mikrofon 2 arası uzaklık (d_1) 98 mm, ses kaynağı ve ses kaynağına yakın olan mikrofon 1 arası uzaklık 350 mm ve numuneden sonraki mikrofon 3 ile numune arası uzaklık (d_2) 250 mm ve tüp çapı 100 mm'dir. Küçük tüp konfigürasyonuna göre ise mikrofonlar arası uzaklık (s_1, s_2) 20 mm, numune ile numuneye yakın olan mikrofon 2 arası uzaklık (d_1) 98 mm, numuneden sonraki mikrofon 3 ile numune arası uzaklık (d_2) 100 mm ve tüp çapı 29 mm'dir.

Ölçüm frekans aralığı geniş tüpte 50-1600 Hz, 400 FFT çizgisi, 4.0 Hz frekans çözünürlüğünde küçük tüpte ise 500-6400 Hz, 1600 FFT çizgisi, 4.0 Hz frekans çözünürlüğünde olacak şekilde veriler toplanmıştır. Transfer fonksiyon tahmini için H1 parametresi kullanılmıştır.

Ölçüm konfigürasyonları belirlendikten sonra, ölçümü yapacak olan mikrofonların B&K Type 4231 akustik kalibratör ile kalibrasyonu yapılmıştır. Mikrofon kalibrasyonunun ardından empedans tüpündeki ölçümleri yapabilmek için arka plan gürültüsü ölçülmüştür. Bu ölçüm yazılımda kaydedildikten sonra transfer fonksiyon kalibrasyonu işlemi yapılmıştır. Transfer fonksiyon kalibrasyonu, dört mikrofonlu

konfigürasyonda ölçüm yapılırken mikrofonlar arasındaki faz ve genlik farklarını ayıklamak için kullanılmaktadır. Transfer kalibrasyon, sırasıyla normal pozisyonda birinci-ikinci mikrofonlar, birinci-üçüncü mikrofonlar, birinci-dördüncü mikrofonların yerleri değiştirilerek içi boş olan empedans tüpünde ölçüm alınır. Bu işlem sonucunda transfer fonksiyon elde edilir. Şekil 3.30.'de transfer fonksiyon kalibrasyonunun değiştirilmiş mikrofonlar için elde edilmiş sonucu gösterilmektedir.



Şekil 3.30. Mikrofonların faz kalibrasyonunun gösterimi

Transfer fonksiyon kalibrasyonunun ardından numuneler tutucuya yerleştirilip iki yük metodu ile ölçümler alınmıştır. Nihai sonuçlar tartışma ve sonuçlar kısmında incelenmiştir.

3.2.4.3. Ses iletim kaybı verilerinin işlenmesi

İki yük metodunda, tek bir transfer matrisi ölçümü, iki farklı sonlandırmaya sahip iki temel ölçümü içerir. Transfer matris, numunenin ön ve arka yüzeyindeki akustik basınç ve parçacık hızı ile ilgilidir. Tüp, dört bilinmeyen matris elemanını çözmek için kullanılabilecek dört doğrusal denklem elde etmek için a ve b endeksleri ile temsil edilen iki farklı sonlandırma ile yapılandırılmalıdır [34].

Transfer matris, a endeksi aşağıdaki eşitlik kullanarak (Denklem 3.12) ile ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=d} \quad (3.14)$$

Burada p_a basıncı, u_a parçacık hızını, T transfer fonksiyonu temsil etmektedir.

Transfer matris, b endeksi aşağıdaki eşitlik kullanarak (Denklem 3.13) ile ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} p_b \\ u_b \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_b \\ u_b \end{bmatrix}_{x=d} \quad (3.15)$$

Burada a endeksi sonlandırıcının anekoik veya minimum yansıtma durumunu, b endeksi ise sonlandırıcının bloke edilmiş ya da açık uç olduğu durumu temsil eder.

Her bir yük durumu için, tüpün içindeki akustik dalga alanını, aşağıda belirtilen şekilde numunenin her iki tarafında ileri ve geri hareket eden dalgalara aşağıdaki denklemler (Denklem 3.14-3.17) ile ayrıştırılır. A ve B test numunesinin önünde kalan durağan dalga alanı, C ve D test numunesinin arkasında kalan durağan dalga alanıdır.

$$A = j \frac{H_{1,ref} e^{-jkl_1} - H_{2,ref} e^{-jk(l_1+s_1)}}{2 \sin ks_1} \quad (3.16)$$

$$B = j \frac{H_{2,ref} e^{+jk(l_1+s_1)} - H_{1,ref} e^{+jkl_1}}{2 \sin ks_1} \quad (3.17)$$

$$C = j \frac{H_{3,ref} e^{+jk(l_2+s_2)} - H_{4,ref} e^{+jkl_2}}{2 \sin ks_2} \quad (3.18)$$

$$D = j \frac{H_{4,ref} e^{-jkl_2} - H_{3,ref} e^{-jk(l_2+s_2)}}{2 \sin ks_2} \quad (3.19)$$

Burada $H_{1,2,3,4}$ mikrofonların transfer fonksiyonu, l_1 ikinci mikrofon ile numune arasındaki mesafe, l_2 üçüncü mikron ile numune arasındaki mesafe, s_1 birinci ve ikinci mikrofon arasındaki uzaklık, s_2 üçüncü ve dördüncü mikrofon arasındaki uzaklık, j kompleks sayıyı, k havadaki kompleks dalga numarasını temsil etmektedir.

Her bir yük durumunda numunenin iki yüzündeki akustik basınç ve parçacık hızının hesaplanması üzere sınır şartları yazılarak $x = 0$, $x = d$ için aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.18) ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} p_0 &= A + B & p_d &= C e^{-jkd} + D e^{+jkd} \\ u_0 &= \frac{A-B}{\rho c} & u_d &= \frac{C e^{-jkd} - D e^{+jkd}}{\rho c} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Burada $x = 0$ numunenin ön yüzündeki sınır şartını, d numune kalınlığını, $x = d$ numune kalınlığındaki sınır şartını, p_0 numune ön yüzündeki basıncı, p_d numune arka yüzündeki basıncı, u_0 numune ön yüzündeki parçacık hızını, u_d numune arka yüzündeki parçacık hızını temsil eder, ρ havanın yoğunluğudur.

İki yükteki basınç ve parçacık hız değerlerinden numunenin transfer fonksiyonu hesaplanır ve aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.19) ile ifade edilir.

$$T = \begin{bmatrix} \frac{p_{0a}u_{db} - p_{0b}u_{da}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} & \frac{p_{0b}u_{da} - p_{0a}u_{db}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} \\ \frac{u_{0a}u_{db} - u_{0b}u_{da}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} & \frac{p_{da}u_{0b} - p_{db}u_{0a}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Burada a alt indisi anekoik yansıtma durumundaki ölçüm parametrelerini, b alt indisi tüpün ucunun açık olduğu durumdaki ölçüm parametrelerini, 0 alt indisi numunenin ön yüzeyini, d alt indisi numunenin arka yüzeyini, p hava basıncını, u parçacık hızını temsil eder.

Ses iletim kaybı aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.20) ile ifade edilir.

$$TL_n = 20 \log_{10} \left| \frac{1}{t} \right| \quad (3.22)$$

Burada t anekoik t p için iletim katsayısıdır.

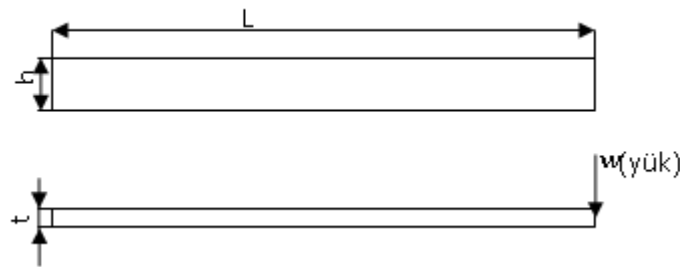
3.3. Sayısal  alışmalar

Çalışmanın bu aşamasında, deneysel yöntemlerle elde edilen doğal frekans bilgileri, kütle, yoğunluk, uzunluk bilgilerinden yararlanılarak, Ansys programında kullanmak üzere ankastre kirişin elastiklik modülü hesaplanmıştır. Elde edilen elastiklik modülü kullanarak mod şekilleri elde edilmiştir.

3.3.1. Ankastre kirişin serbest titreşim teorisi

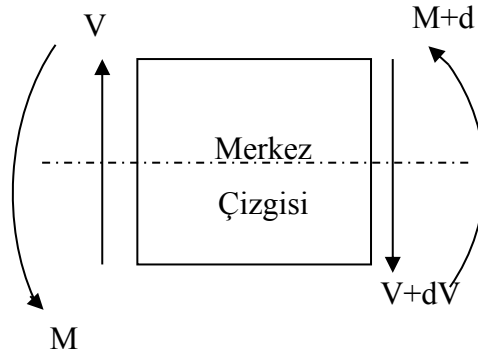
Bir ankastre kirişte n adet doğal frekans titreşim modu bulunmaktadır. En düşük frekansta yakaladığımız doğal frekans birinci mod ile ilişkilidir ve ikinci üçüncü şeklinde devam etmektedir.    nc  ve üzeri titreşim modları ilk iki moda kıyasla daha az önemlidir. Bunun sebebi kirişin doğal frekansını yakalamak için gereken enerji artmaktadır ve mod sayısı arttıķ a durağan nokta sayısı artmaktadır.

Sistemde burulma titreşimleri olmadan matematiksel olarak tek boyuta indirilmiştir ve dinamik yük z ekseninde şekil 3.31.'de olduğu gibi w yükü uygulanmıştır. Burada kirişin, boyuna uzunluğu L , enine uzunluğu b , kalınlığı t ile gösterilmiştir.



şekil 3.31. Ankastre kiriş elemanı gösterimi

şekil 3.32.'de dL uzunluğunda diferansiyel kiriş üzerine gelen kuvvet ve momentler gösterilmiştir. Burada V kesme kuvveti, M eğilme momentini temsil etmektedir.



Şekil 3.32. Diferansiyel kiriş elemanının gösterimi

Diferansiyel kiriş elemanına gelen kuvvetlerin toplamı aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.24) ile gösterilmiştir.

$$\sum F = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (3.23)$$

Burada F kuvvet, m kütle, w yük, t zamanı temsil etmektedir.

Şekil 3.32.'de gösterilen kiriş elemana gelen toplam kesme kuvvetleri kesit alanı ve malzeme yoğunluğu cinsinden aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.25) ile gösterilmiştir.

$$V - \left(V + \frac{\partial V}{\partial l} dx \right) = \rho A dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (3.24)$$

Burada V kesme kuvvetleri, ρ yoğunluk, A kesit alanı, w kirişe uygulanan yük, l ise kirişin uzunluğudur.

Merkez çizgisindeki titreşim genliği $\frac{dw}{dx}$ her noktada eşit ve $\frac{d}{dl} = \frac{d}{dx}$ olarak kabul edilmiştir. Yukarıdaki ifadedeki (Denklem (3.24)) dx 'ler sadeleştirilerek (Denklem (3.25)) elde edilir.

$$-\frac{\partial V}{\partial l} = \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (3.25)$$

Burada V kesme kuvvetleri, ρ yoğunluk, A kesit alanı, w kirişe uygulanan yük, l ise kirişin uzunluğudur.

Diferansiyel kiriş elemanının merkezindeki toplam moment sıfıra eşittir aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.27) ile ifade edilmiştir.

$$-M + \left(M + \frac{\partial M}{\partial x} dx \right) - V dx = 0 \quad (3.26)$$

Burada M momenttir.

Moment ifadesindeki terimler dx ile sadeleştirilerek kesme kuvvetinin birim uzuluktaki moment ifadesi (Denklem 3.28) elde edilir.

$$V = \frac{\partial M}{\partial l} \quad (3.27)$$

Lineer elastik malzemeler için Euler-Bernolli denklemine göre moment denklemi (Denklem 3.29) ile ifade edilir.

$$M = EI \frac{\partial^2 w}{\partial l^2} \quad (3.28)$$

Burada M moment, E elastisite modülü, I atalet momenti, w kirişe uygulanan yük, l kirişin uzunluğunu temsil etmektedir.

Elde edilen moment denklemi kuvvet olarak yazıldığında kuvvet ifadesi aşağıda (Denklem 3.30) elde edilir.

$$V = \frac{\partial}{\partial l} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial l^2} \right) \quad (3.29)$$

Kuvvet ifadesi V , hareket denkleminde yerine yazılarak yeni hareket denklemi (Denklem 3.31) ile ifade edilir.

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial t^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (3.30)$$

Burada E elastisite modülü, w yük, t zaman, ρ yoğunluk, A kesit alanıdır.

Hareket denkleminin çözümü için değişkenlerin ayrılması yöntemi kullanılarak, $X(l)$ zamandan bağımsız, $Q(t)$ konumdan bağımsız (Denklem 3.32) iki değişken kullanılır.

$$w(l, t) = X(l) \cdot Q(t) \quad (3.31)$$

Kullanılan iki değişken hareket denkleminde yerine yazıldığında iki parça halinde eşitliğin bir tarafı zamana bağlı diğer tarafı konuma bağlı olacak şekilde (3.32.) elde edilir.

$$EI \frac{\partial^4 (X(l)Q(t))}{\partial l^4} = -m \frac{\partial^2 (X(l)Q(t))}{\partial t^2} \quad (3.32)$$

Yukarıdaki eşitliğin (Denklem 3.33) iki tarafı da $mX(l)Q(t)$ ifadesine bölündüğünde sabit ve ω^2 yani ankastre kirişin doğal frekansına eşit olur ve aşağıdaki eşitlikler (Denklem 3.34-3.36) ile ifade edilmiştir.

$$\frac{EI}{mX(l)} \cdot \frac{\partial^4 X(l)}{\partial l^4} = -\frac{1}{Q(t)} \cdot \frac{\partial^2 Q(t)}{\partial t^2} \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial^4 X(l)}{\partial l^4} - \frac{m\omega^2}{EI} X(l) = 0 \quad (3.34)$$

$$\beta^4 = \frac{m\omega^2}{EI} \quad (3.35)$$

Burada β sonsuz sayıda değer için boyutsuz frekans değeri, m kütle, E elastisite modülünü, I atalet momentini temsil etmektedir.

X ve Q değişkenlerinin genel çözüm denklemleri aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.37-3.38) ile gösterilmiştir.

$$X(l) = C_1 \sin(\beta l) + C_2 \cos(\beta l) + C_3 \sinh(\beta l) + C_4 \cosh(\beta l) \quad (3.36)$$

$$Q(t) = A_1 \sin(\omega t) + A_2 \cos(\omega t) \quad (3.37)$$

Burada βl katsayısı doğal frekansın hesaplanmasında kullanılmaktadır, C ve A katsayıyı temsil etmektedir.

βl katsayısını hesaplamak için X değişkeninin C katsayılarının bulunması gerekmektedir. C katsayıları ise sınır koşulları kullanılarak hesaplanabilmektedir. Ankastre uçta yerdeğiştirme ve hız sıfıra eşittir, aşağıdaki eşitlikle (Denklem 3.39) ifade edilir.

$$w(0, t) = 0 \rightarrow \frac{\partial w}{\partial l}(0, t) = 0 \quad (3.38)$$

Serbest uçta eğilme momenti ve kesme kuvvetleri sıfıra eşittir, aşağıdaki eşitlik ile (Denklem 3.40) ifade edilir.

$$\frac{\partial^2 w}{\partial l^2}(L, t) = 0 \rightarrow \frac{\partial^3 w}{\partial l^3}(L, t) = 0 \quad (3.39)$$

Denklem (3.38 ve (3.39, Denklem (3.36'te yerine yazılarak $X(l)$ elde edilir.

$$X(0, t) = 0 \rightarrow \frac{dX}{dl}(0, t) = 0 \quad (3.40)$$

$$\frac{d^2X}{dl^2}(L, t) = 0 \rightarrow \frac{d^3X}{dl^3}(L, t) = 0 \quad (3.41)$$

$X(l)$ üç kez türevi alınıp, (Denklem 3.41-3.42) yerine yazılarak aşağıdaki eşitlikler (Denklem 3.43-3.22) elde edilir.

$$\frac{dX}{dl} = \beta(C_1 \cos(\beta l) - C_2 \sin(\beta l) + C_3 \cosh(\beta l) + C_4 \sinh(\beta l)) \quad (3.42)$$

$$\frac{d^2X}{dl^2} = \beta^2(-C_1 \sin(\beta l) - C_2 \cos(\beta l) + C_3 \sinh(\beta l) + C_4 \cosh(\beta l)) \quad (3.43)$$

$$\frac{d^3X}{dl^3} = \beta^3(-C_1 \cos(\beta l) + C_2 \sin(\beta l) + C_3 \cosh(\beta l) + C_4 \sinh(\beta l)) \quad (3.44)$$

X değişkeninin genel çözüm denklemi ifadesine (Denklem 3.37) sınır koşulları $l = 0$, girildiğinde C_2 ve C_4 sabiti (Denklem 3.47) bulunur.

$$X(0, t) = 0 = C_1 \sin(0) + C_2 \cos(0) + C_3 \sinh(0) + C_4 \cosh(0) \quad (3.45)$$

$$C_2 = -C_4 \quad (3.46)$$

X değişkeninin birinci türevinde sınır koşulu $l = 0$ girildiğinde C_1 ve C_3 sabitleri (Denklem 3.49) bulunur.

$$\left. \frac{dX}{dl} \right|_{l=0} = 0 = \beta(C_1 \cos(0) - C_2 \sin(0) + C_3 \cosh(0) + C_4 \sinh(0)) \quad (3.47)$$

$$C_1 = -C_3 \quad (3.48)$$

İkinci ve üçüncü türevi alınan denklemler C_1 ve C_2 cinsinden yazılarak aşağıdaki eşitlikler (Denklem 3.50),(Denklem 3.51) elde edilir.

$$\left. \frac{d^2 X}{dl^2} \right|_{l=L} = 0 = (-C_1 \sin(\beta l) - C_2 \cos(\beta l) + C_1 \sinh(\beta l) + C_2 \cosh(\beta l)) \quad (3.49)$$

$$\left. \frac{d^3 X}{dl^3} \right|_{l=L} = 0 = -C_1 \cos(\beta l) + C_2 \sin(\beta l) + C_1 \cosh(\beta l) + C_2 \sinh(\beta l) \quad (3.50)$$

Elde edilen denklemler matris formatında yazılarak genel çözüm denklemleri (3.51, 3.53-3.54) elde edilir.

$$\begin{pmatrix} \sin(\beta l) + \sinh(\beta l) & \cos(\beta l) + \cosh(\beta l) \\ \cos(\beta l) + \cosh(\beta l) & -\sin(\beta l) + \sinh(\beta l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

$$\sinh^2(\beta L) - (\sin^2(\beta L) + \cos^2(\beta L)) - 2\cos(\beta L)\cosh(\beta L) - \cosh^2(\beta L) = 0 \quad (3.52)$$

$$1 + \cos(\beta L)\cosh(\beta L) = 0 \quad (3.53)$$

βL doğal frekansın hesaplanmasında kullanılan, her mod için değeri olan bir sabittir.

Yukarıdaki ifadenin (Denklem 3.54) çözümünden $\beta L = 1.875, 4.6904, 7.548...$ olarak bulunur. Doğal frekans denkleminde (Denklem 3.34) yerine yazılarak doğal frekans denklemini (3.54) elde edilir.

$$\omega = \frac{(\beta L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3.54)$$

Elde edilen doğal frekans denkleminde E ifadesi yalnız bırakılarak elastisite modülü (Denklem 3.56) elde edilir.

$$E = \frac{\left(\frac{\omega L^2}{(\beta L)^2} \right)^2 \rho A}{I} \quad (3.55)$$

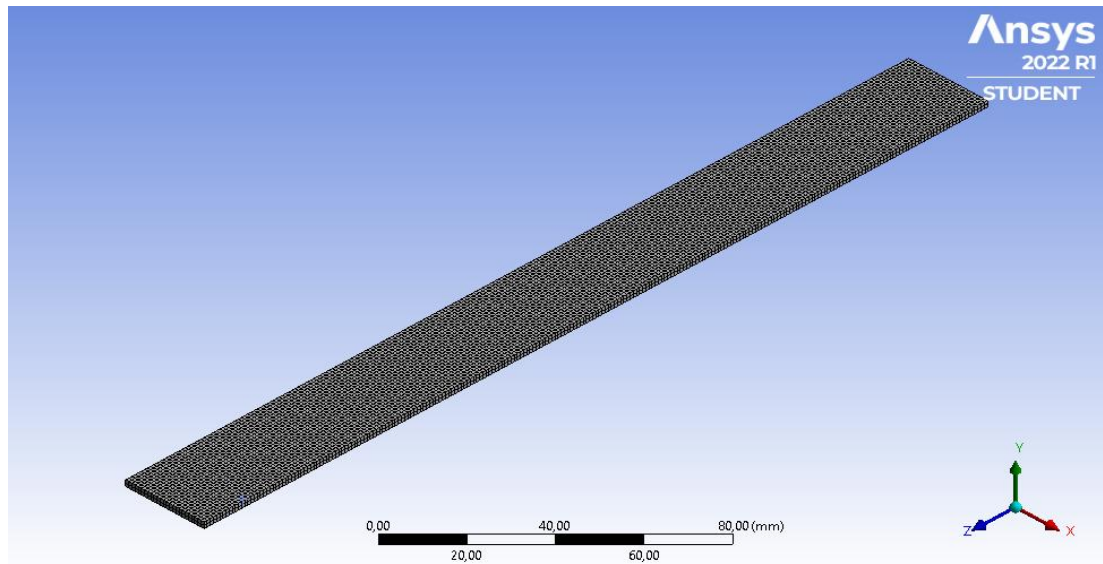
Burada E elastisite modülü, ω kirişin doğal frekansı, L kirişin uzunluğu, ρ yoğunluk, A kesit alanı, I atalet momenti, βL kirişin modu için kullanılan bir sabiti ifade eder.

3.3.2. Ankastre kirişin sonlu elemanlar analizi

Sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmek üzere ANSYS Student 2022 kullanılmıştır. Programda mod frekanslarını ve mod şekillerini bulmak üzere analiz sistemlerinden Modal kullanılmıştır.

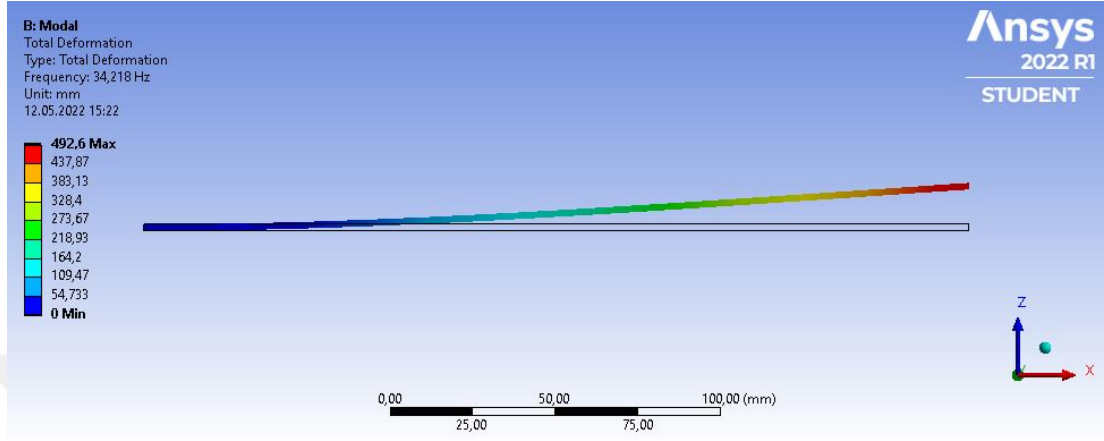
Ankastre kiriş serbest titreşim teorisinde elde edilen denklemler kullanılarak, deneysel yöntemlerle bulunan doğal frekanslar kullanılarak elastisite modülü hesaplanmıştır. Hesaplanan elastisite modülü, yoğunluk ve uzama oranı girilerek programdaki malzeme tanımı yapılmıştır.

Malzeme bilgileri tanıtıldıktan sonra program üzerinde, deneysel ölçümlerde kullanılan uzunluk bilgilerine göre kiriş modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan kiriş modeli mesh elemanı 1 mm olacak şekilde 12500 elemanlı mesh atılmıştır.

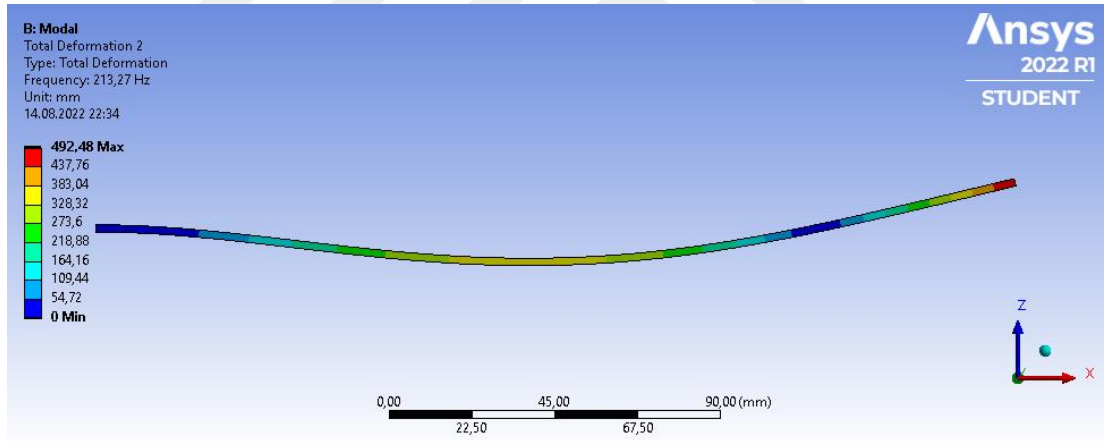


Şekil 3.33. Örnek kirişin sonlu elemanlar modeli

Analiz ayarlarında bir ucu serbest diğer ucu ankastre olacak şekilde sınır koşulları tanıtılmış, deneysel yöntemlerde kullanılan frekans aralığı 0-2000 Hz arasında doğal frekanslar bulunmuştur. Bulunan doğal frekanslar arasından eğme modları seçilmiştir.



Şekil 3.34. 8 Karbon numunesinin sonlu elemanlardaki 1. eğilme modu gösterimi



Şekil 3.35. 8 Karbon numunesinin sonlu elemanlardaki 2. eğilme modu gösterimi

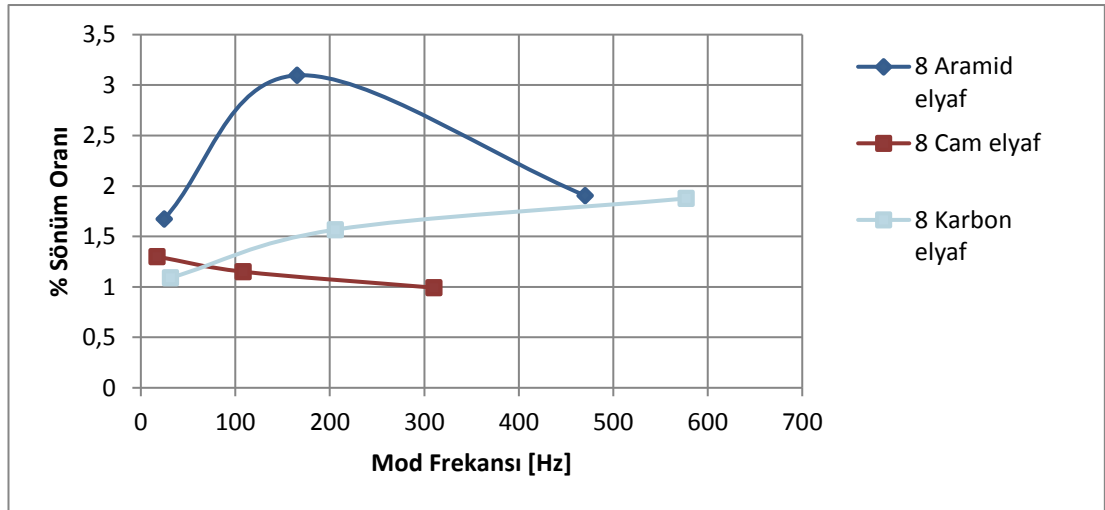
BÖLÜM 4. DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde karbon, aramid, cam elyafından üretilmiş numunelere yapılan modal test, sarsıcı testleri, akustik yutum ve ses iletim kaybı testleri verileri analiz edilerek titreşim sönüm değerleri, akustik yutum değerleri ve ses iletim kaybı değerleri elde edilerek kıyaslamalar yapılmıştır. Modal ve sarsıcı testleri deneysel titreşim ölçümleri, akustik yutum ve ses iletim kaybı testleri deneysel akustik ölçümleri başlıkları altında değerlendirilmiştir.

4.1. Modal Test Sonuçları

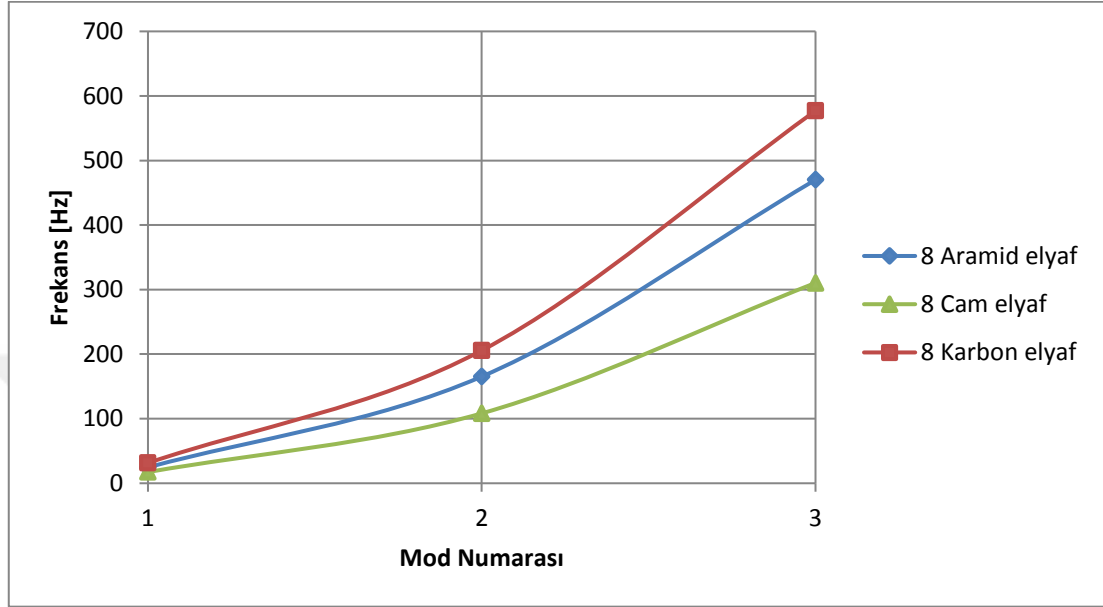
4.1.1. Modal sonuçlar

Saf numunelerin mod frekansı-sönüm oranı Şekil 4.1.'de verilmiştir. Buna göre karbon elyafı mod frekans sıklığı aramid ve cam elyafına göre daha azdır. Aramid elyafı yüksek sönüm göstermektedir.



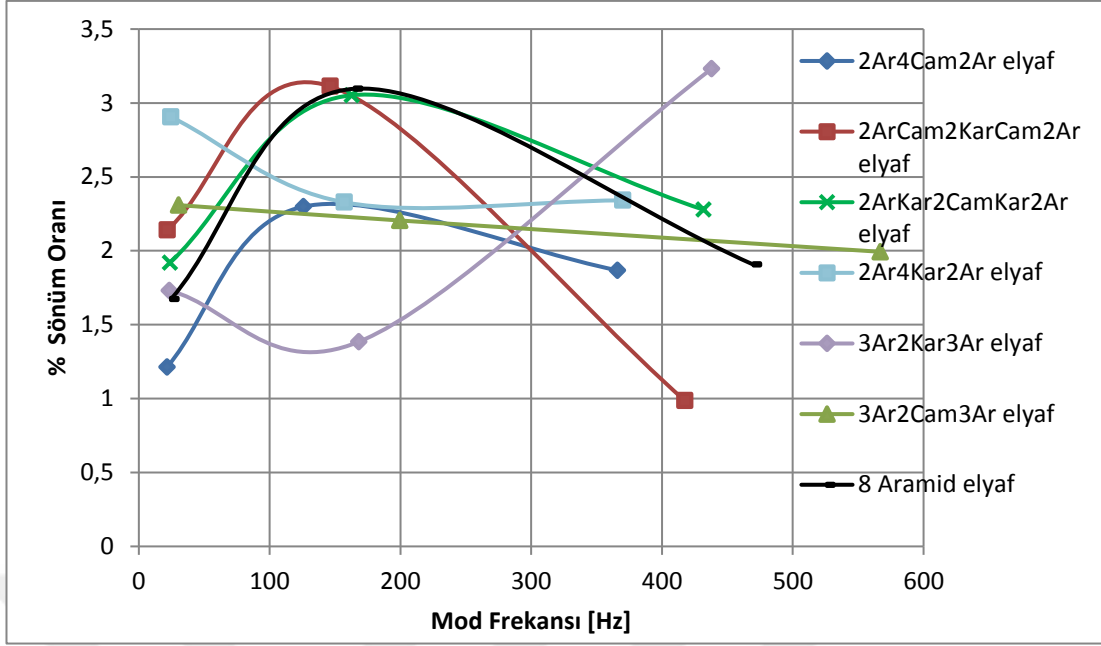
Şekil 4.1. Saf numunelerin mod-sönüm grafiği

Saf numunelerin mod frekansı-mod numarası grafiği Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Grafiğe göre cam elyafı, aramid ve karbona kıyasla daha düşük frekanslarda rezonans fenomeni görülmektedir.



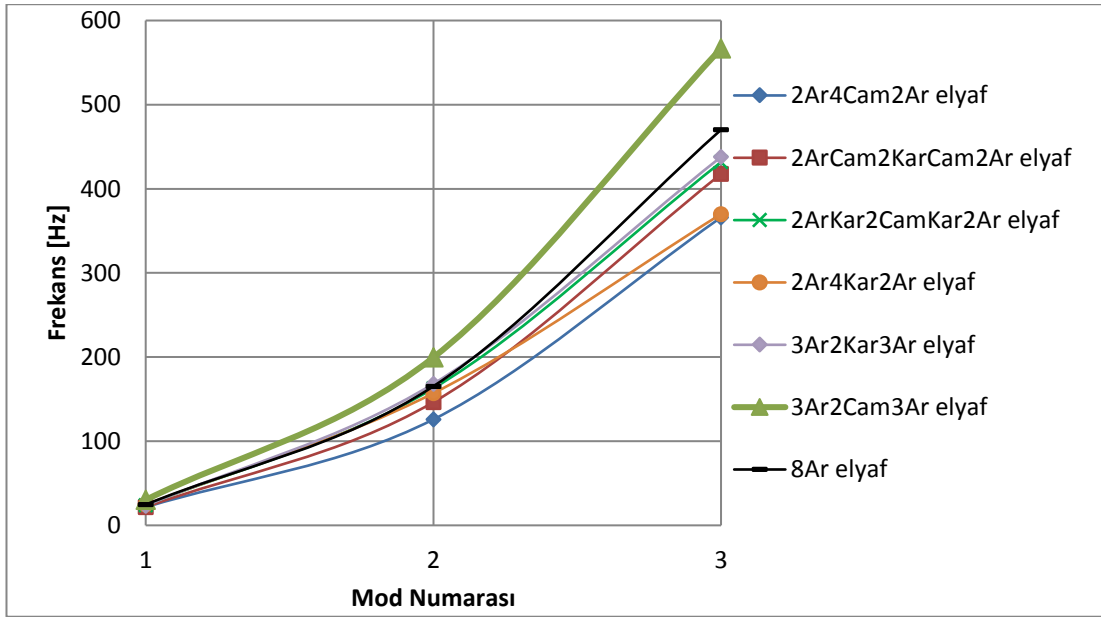
Şekil 4.2. Saf numunelerin mod-frekans grafiği

Saf aramid elyafının ve hibrit haldeki aramid elyafının sönüm-mod frekansı grafiği Şekil 4.3.'de gösterilmiştir. Cam elyaf takviyesi mod frekans sıklığını arttırmış ve sönüm özelliklerini azaltmıştır. Karbon elyaf takviyesi sönüm özelliklerini azaltmış ve mod frekans sıklığını azaltmıştır. Aramid elyafına cam elyafıyla birlikte karbon elyafı takviye edilmesi, sönüm özelliklerini arttıran bir özellik göstermiştir. Bununla birlikte aramid elyafına cam ve karbon elyaf takviyesi frekans aralıklarını yakınlaştıran özellik göstermiştir.



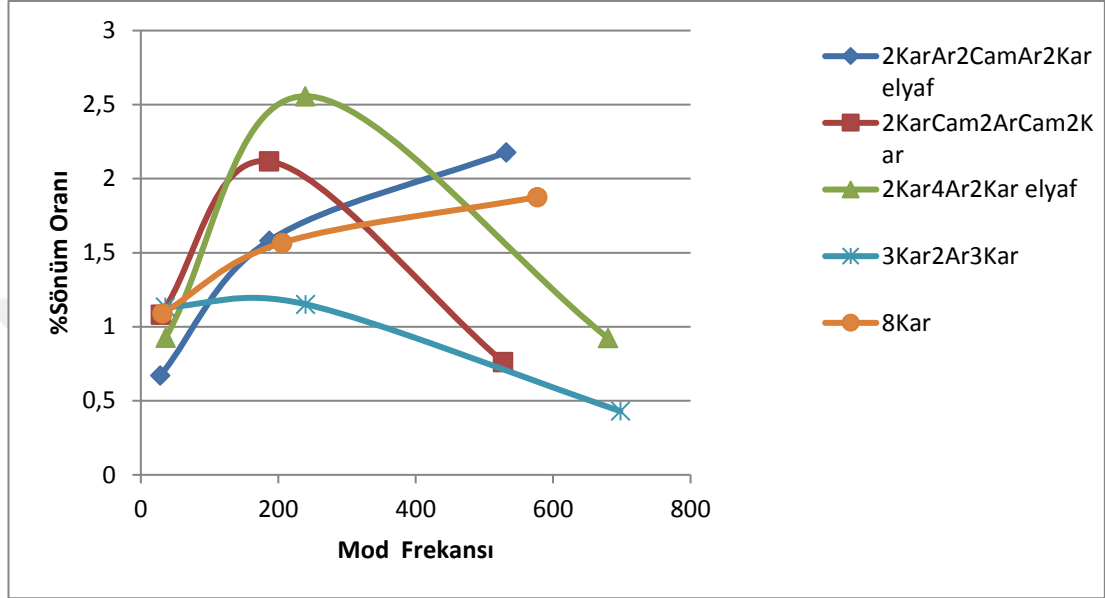
Şekil 4.3. Saf aramid elyaf ve hibritlerinin mod-sönüm grafiği

Saf aramid elyafın ve aramid elyafı laminatları arasında kalan hibritlerin mod frekansı-mod numarası grafiği Şekil 4.4.'te verilmiştir. Grafiğe göre saf aramid eğrisi merkez alınır ve hibritleşmenin pozitif etkisi 8Ar eğrisi üzerinde, negatif etkisi eğrinin altında görülmektedir.



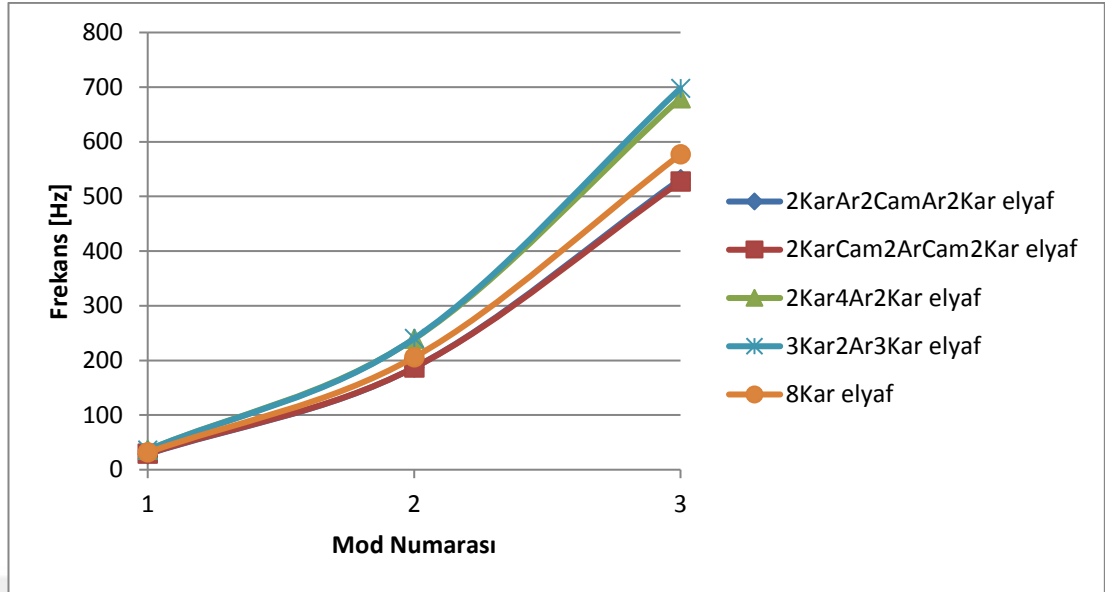
Şekil 4.4. Saf aramid elyaf ve hibritlerinin mod-frekans grafiği

Saf karbon elyafının ve hibrit haldeki karbon elyaflarının sönüm-mod frekansı grafiği Şekil 4.5.'de verilmiştir. Buna göre aramid elyaf takviyesi sönümü arttırmış ve frekans aralığını azaltmıştır. Cam elyaf takviyesi sönüm özelliklerini azaltmış ve mod frekanslarını yakınlaştırmıştır.



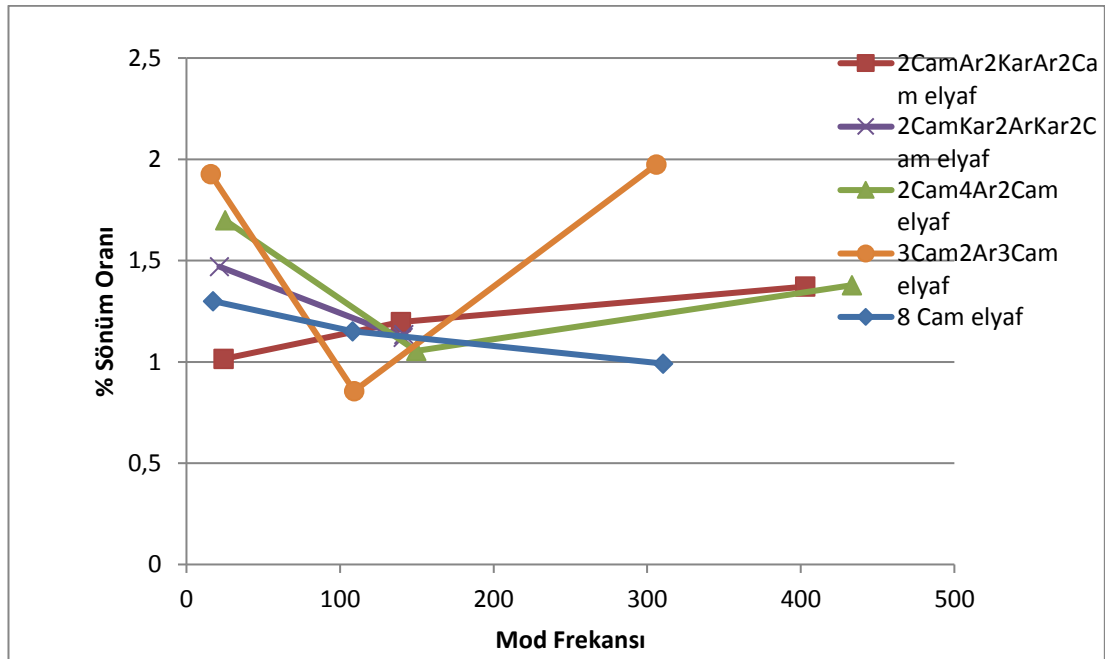
Şekil 4.5. Saf karbon ve hibritlerinin mod-sönüm grafiği

Saf karbon elyafın ve karbon elyafı laminatları arasında kalan hibritlerin mod frekansı-mod numarası grafiği Şekil 4.6.'da verilmiştir. Grafiğe göre saf karbon eğrisi merkez alınır ve hibritleşmenin pozitif etkisi 8Kar eğrisi üzerinde, negatif etkisi eğrinin altında görülmektedir. Karbon elyafına aramid elyaf takviyesi mod frekanslarını arttırıp rezonans frekanslarının görülme sıklığını azaltırken cam elyaf takviyesi mod frekanslarını azaltarak rezonans frekanslarının görülme sıklığını arttırmıştır.



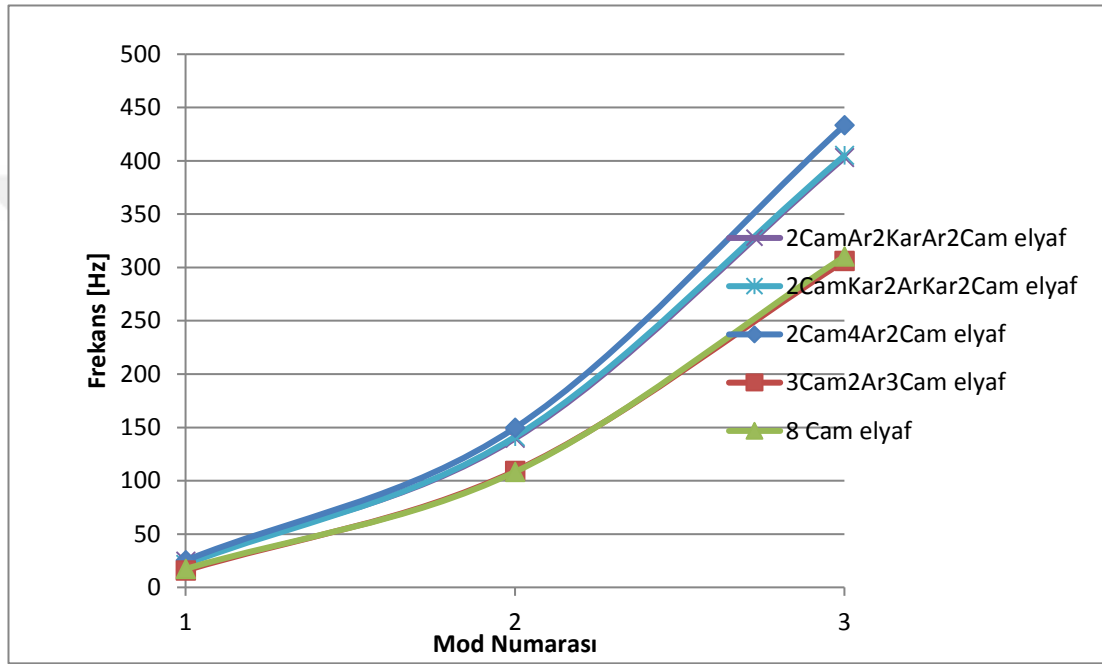
Şekil 4.6. Saf karbon elyaf ve hibritlerinin mod-frekans grafiği

Saf cam elyafının ve hibrit cam elyafının sönüm oranı-mod frekansı grafiği Şekil 4.7.'de verilmiştir. Buna göre karbon elyaf takviyesi sönüm oranını arttırmış, mod frekans sıklığını azaltmıştır. Aramid elyaf takviyesi sönüm oranını arttırmış frekans sıklığına düşük etki göstermiştir.



Şekil 4.7. Saf cam elyaf ve hibritlerinin mod-sönüm grafiği

Saf cam elyafın ve cam elyafı laminatları arasında kalan hibritlerin mod frekansı-mod numarası grafiği Şekil 4.4.'te verilmiştir. Grafiğe göre saf cam eğrisi merkez alınır, hibritleşmenin pozitif etkisi 8 Cam eğrisi üzerinde, negatif etkisi eğrinin altında görülmektedir. Buna göre cam elyafına az miktarda aramid elyafı katkısı çok etki etmese de genel olarak karbon ve aramid elyafı katkısı mod frekanslarını arttırarak pozitif etki etmiş, rezonans frekanslarının görülme sıklığını azaltmıştır



Şekil 4.8. Saf cam elyaf ve hibritlerinin mod-frekans grafiği

4.1.2. MAC sonuçları

Bu bölümde bir adet lamina kiriş türü için modal ölçümleri alınan numunelerin mod şekilleri verisi arasındaki korelasyon dereceleri karşılaştırılmıştır. Bu değer Bölüm 3.3'te anlatıldığı üzere 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Benzerliğin kolay anlaşılması için değerler renkle belirtilmiştir. Renklendirme 0-0,10 arası koyu mavi, 0,10-0,40 koyu yeşil, 0,40-0,50 açık yeşil, 0,50-0,60 sarı, 0,60-0,80 turuncu, 0,80-1 kırmızı renkle belirtilmiştir. Mod şekillerinin benzerliği arttıkça bu değer 1'e yaklaşmaktadır. Kalan numunelerin MAC değerleri ek olarak verilmiştir. Tablo 4.1.-4.3. değerlendirildiğinde modal ölçümü alınan üç kirişin de 2. ve 3. mod şekilleri birbirlerine çok yakın değerlerdedir. Birinci ve üçüncü numunelerin mod şekilleri

benzerliği yüksektir. İkinci numunenin birinci mod şekli diğer numunelere %35 benzemektedir. MAC değeri mod frekansı belirlenirken faydalanan bir diğer parametredir. MAC sonuçlarımız modal test sonucunun tutarlı olduğunu, üretilen numunelerimizin homojen olduğunu göstermektedir. Sınırlı sayıda numunelerde MAC sonuçları düşük çıkmıştır. Bunun nedenleri üretim hataları, homojenliğin az olması ya da ankastre test koşullarından kaynaklanabilmektedir.

Tablo 4.1. [A₂C G]_s numune 1-2 MAC tablosu

[A ₂ C G] _s Numune1	Frekans[Hz]	[A ₂ C G] _s Numune 2		
		22,206	152,396	435,313
	23,793	0,355399	0,132999	0,01303
	162,84	0,129344	0,798728	0,001552
	431,645	0,225693	0,066964	0,933036

Tablo 4.2. [A₂C G]_s numune 1-3 MAC tablosu

[A ₂ C G] _s Numune 1	Frekans[Hz]	[A ₂ C G] _s Numune 3		
		22,659	182,528	416,38
	23,793	0,793992	0,20246	0,109536
	162,84	0,323468	0,949368	0,075019
	431,645	0,047753	0,054539	0,953475

Tablo 4.3. [A₂C G]_s numune 2-3 MAC tablosu

[A ₂ C G] _s Numune 2	Frekans[Hz]	[A ₂ C G] _s Numune 3		
		22,659	115,536	416,38
	22,206	0,41775	0,155387	0,200555
	152,396	0,183802	0,949327	0,103507
	435,313	0,045444	0,004496	0,827123

4.2. Sarsıcı Testi Sonuçları

Sarsıcı test ölçümüne göre her bir numunenin eğilme mod frekansları ve logaritmik azalma metoduna göre sönüm oranı Tablo 4.4. Sarsıcı test sonuçları’da verilmiştir. Aramid elyafı katmanları arasında değişen numunelere göre karbon ve cam elyaf katkısı $[A]_8$ elyafının rezonans frekansı aralığını azaltmıştır. $[G]_8$ elyafına karbon, aramid elyaf katkısı rezonans frekans aralığına olan etkisinde aramid elyaf takviyesi frekans aralığını sıklaştırırken karbon elyaf takviyesi frekans aralığını arttırıcı özellik göstermiştir. $[C]_8$ elyafına aramid ve cam elyaf katkısının rezonans frekansına etkisi, cam elyafı frekans aralığını azaltırken aramid elyafı rezonans frekans aralıklarını arttırmıştır. Karbon ve aramid elyafı sönüm oranını arttırıcı özellik gösterirken cam elyafı sönüm oranını azaltıcı özellik göstermektedir.

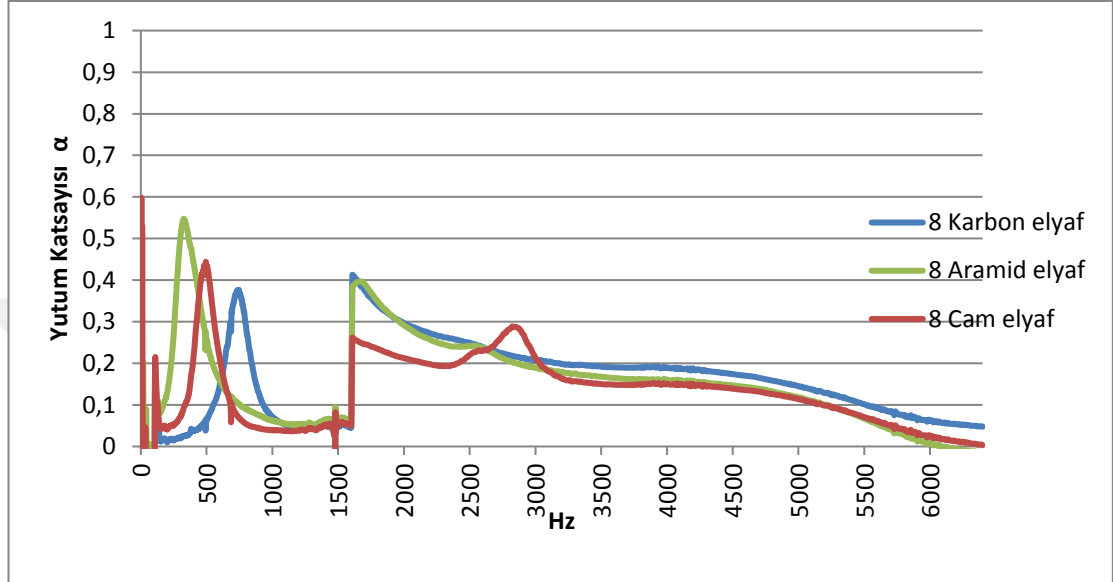
Tablo 4.4. Sarsıcı test sonuçları

Numune Adı	1.Mod Frekansı	1.Mod% Sönüm	2.Mod Frekansı	2.Mod %Sönüm	3.Mod Frekansı	3.Mod %Sönüm
1 $[A_2 G C]_S$	22,9	1,779	138,6	1,413	425,6	1,21
2 $[A_2 C G]_S$	23,5	1,755	148,1	1,721	443,4	1,29
3 $[A_2 G_2]_S$	21,5	2,093	130,8	1,683	391,3	1,04
4 $[A_2 C_2]_S$	19	2,684	118,4	1,696	359,5	1,21
5 $[G_2 A C]_S$	22,97	0,682	137,5	1,413	411,1	0,67
6 $[G_2 C A]_S$	23	0,944	135,5	0,697	411,1	0,62
7 $[G_2 A_2]_S$	25,63	1,026	151,6	0,825	452,3	0,37
8 $[C_2 A G]_S$	30	1,179	178	0,628	536	0,43
9 $[C_2 G A]_S$	30	1,674	180,2	0,93	543,3	0,32
10 $[C_2 A_2]_S$	36,88	1,119	220,6	0,825	651,6	0,90
11 $[A_3 G]_S$	29,69	2,012	178,6	1,392	542,5	1,03
12 $[A_3 C]_S$	23,5	2,658	158,1	1,771	475,9	1,01
13 $[G_3 A]_S$	17,81	2,585	105,9	1,063	320,5	0,58
14 $[C_3 A]_S$	38	0,988	234,5	0,616	705,3	0,87
15 $[C]_8$	34	0,591	201,4	1,340	604,4	0,69
16 $[A]_8$	26	1,568	155,2	2,495	478,8	0,93
17 $[G]_8$	14,69	1,749	92,66	2,097	330,4	0,73

4.3. Akustik Yutum Testi Sonuçları

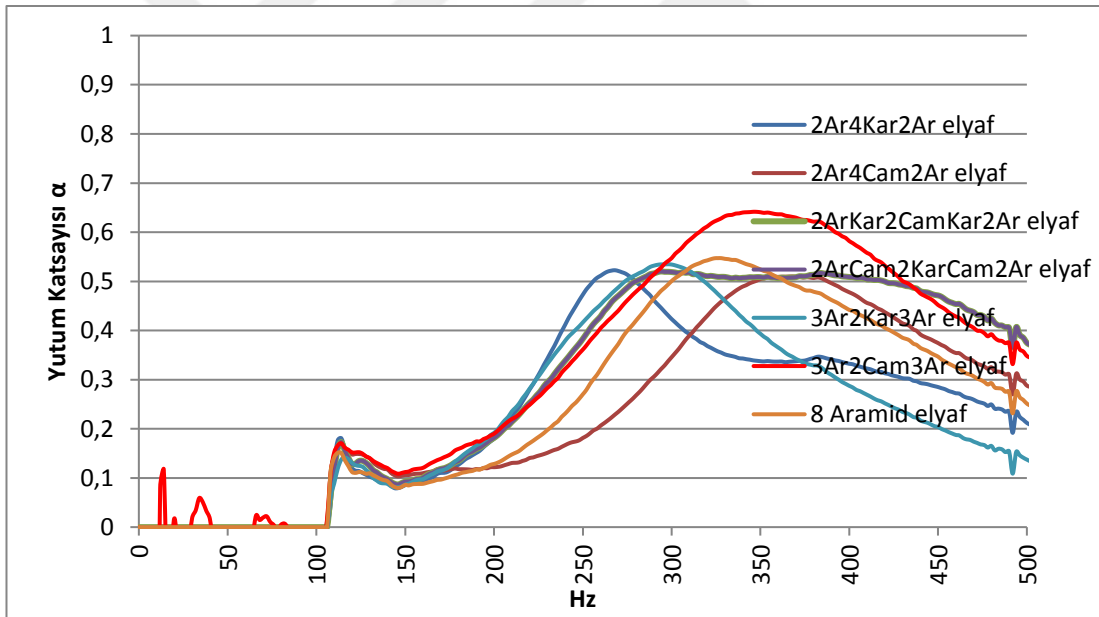
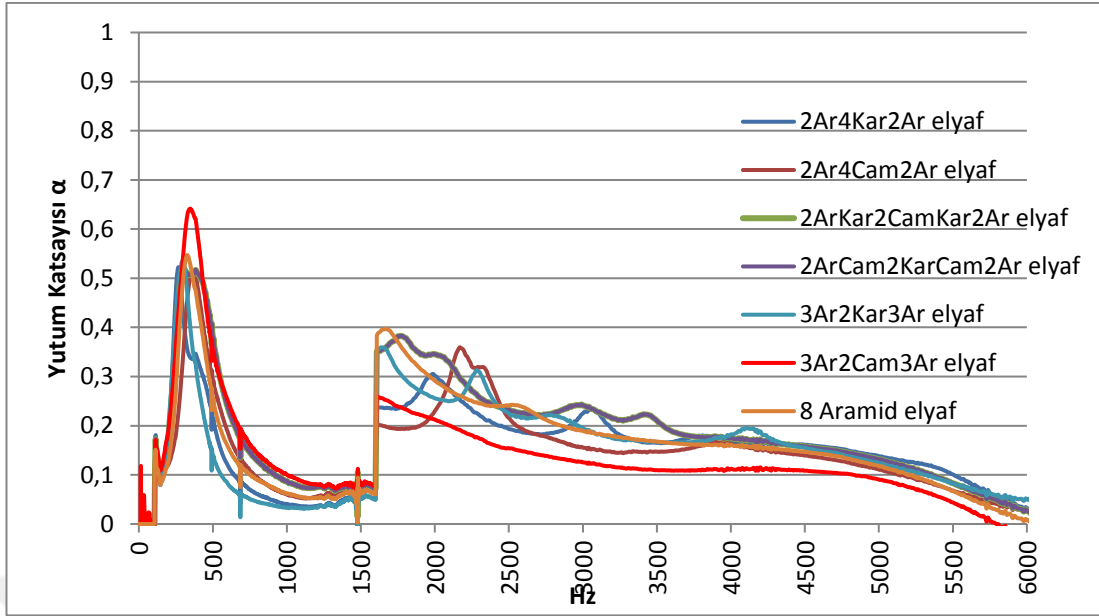
Saf aramid, cam, karbon elyaflarının yutum sonuçları Şekil 4.9.’da verilmiştir. Düşük frekanslar yani 0-1600 Hz arasında, $[A]_8$ numunesi 200-700 Hz bandında yutum kabiliyetine, $[G]_8$ numunesi 350-750 Hz bandında yutum kabiliyetine, $[C]_8$ numunesi

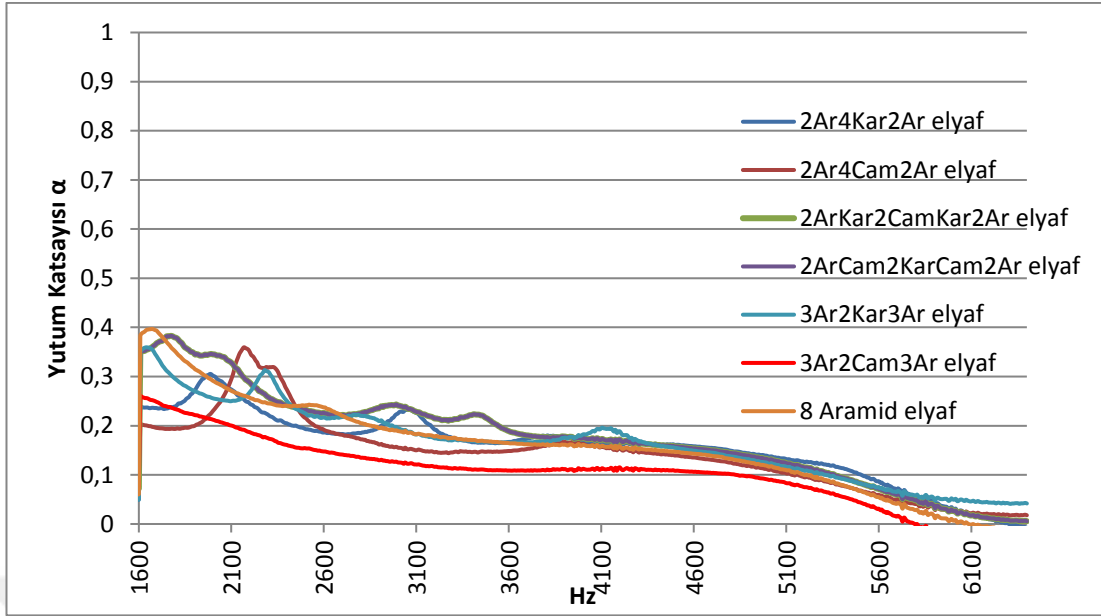
500-1000 Hz bandında yutum kabiliyetine sahiptir. Yüksek frekanslarda, 1600-2000 Hz arasında, $[A]_8$ numunesi 1600-4000 Hz bandında yutum kabiliyetine, $[G]_8$ numunesi 2500-3500 Hz bandında yutum kabiliyetine, $[C]_8$ numunesi 1600-2000 Hz bandında yutum kabiliyetine sahiptir.



Şekil 4.9. 8 katman aramid, cam, karbon elyafının yutum grafiği

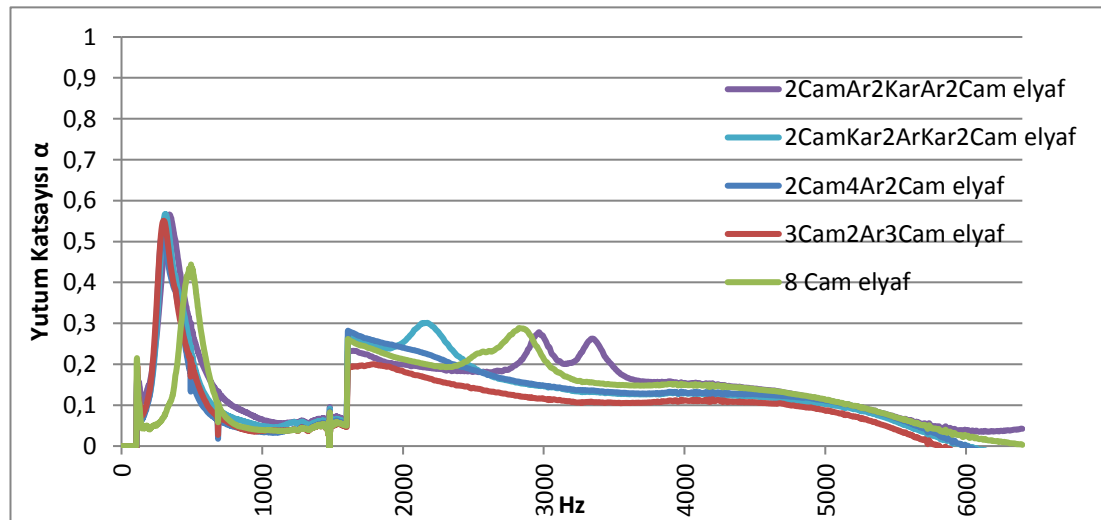
Aramid elyaf katmanlarına karbon ve cam elyafı takviyesinin etkisi Şekil 4.10.'da gösterilmiştir. Düşük frekanslar için Şekil 4.11.'de bakıldığında sadece karbon elyaf takviyesi ses yutum kabiliyetini olumsuz etkilerken sadece cam elyaf takviyesiyle oluşturulan hibrit numunenin ses yutum kabiliyeti %65 civarına yükselmiştir, Şekil 4.12. İncelendiğinde yüksek frekanslarda, cam elyaf takviyesinin yutumu düşürdüğü, karbon ve aramid elyaf takviyesinin yüksek frekanslarda daha iyi ses yutumu sağladığı görülmektedir.



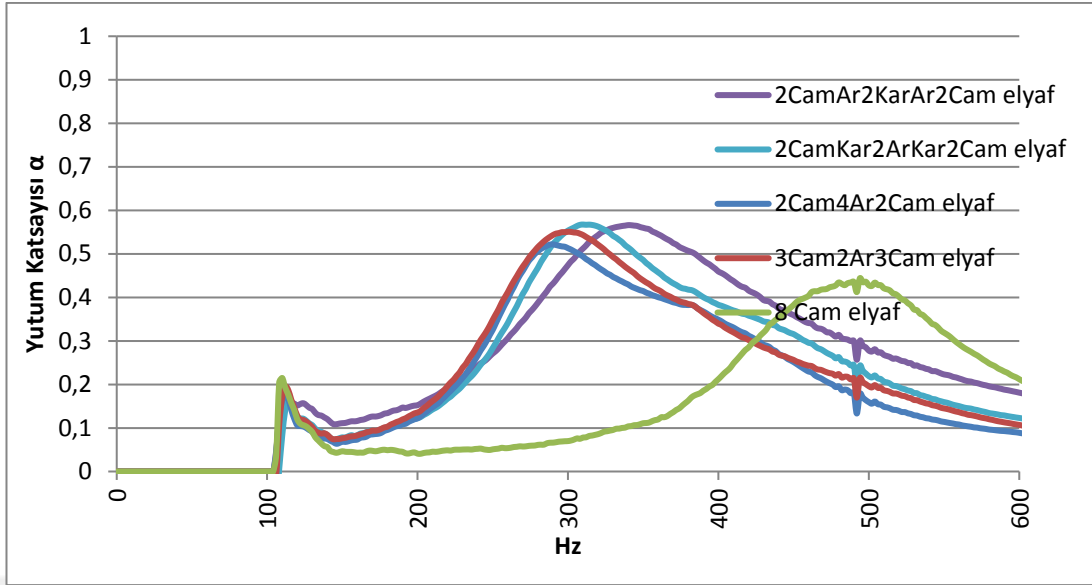


Şekil 4.12. Aramid elyaf numunelerinin 1600-6400 Hz yutum grafiği

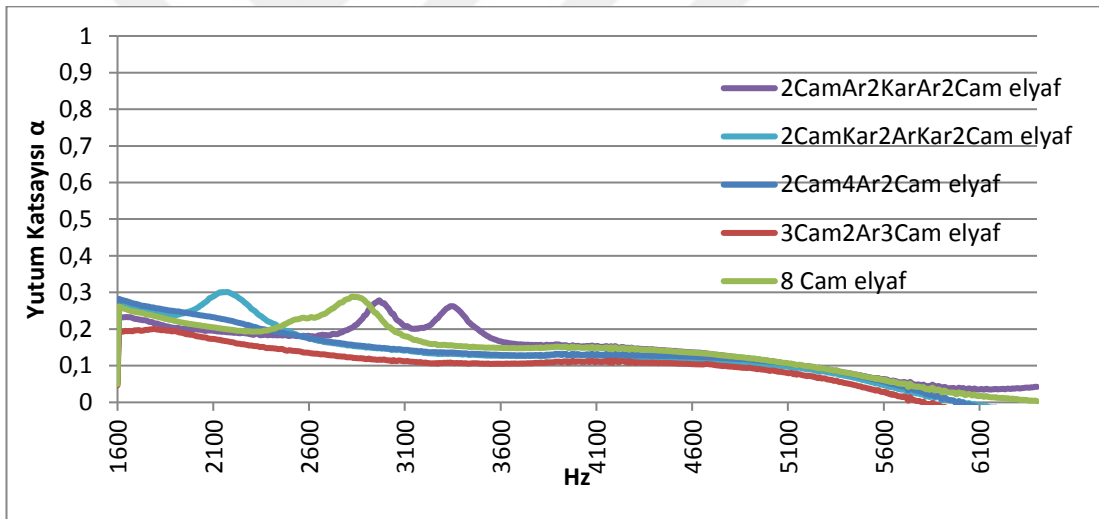
Cam elyaf katmanları arasında karbon ve aramid elyafı takviyesinin ses yutum özelliklerine etkisi Şekil 4.13.'de gösterilmiştir. Aramid ve karbon elyafı, cam elyafının yutumu düşük olan, (Şekil 4.14.) düşük frekans bölgesindeki özelliğini yükseltici özellik göstermiştir. 250 Hz bandında %40'lık bir maksimum sönüm değeri görülürken, hibritleşmeyle birlikte bu değer 170 Hz bandına gerilemiş ve %55'lik bir maksimum yutum değeri elde edilmiştir. Yüksek frekans bölgesinde ise (Şekil 4.15.) hibritleşmenin ihmal edilebilir olumlu etkisi görülmektedir.



Şekil 4.13. Cam elyaf numunelerinin yutum grafiği

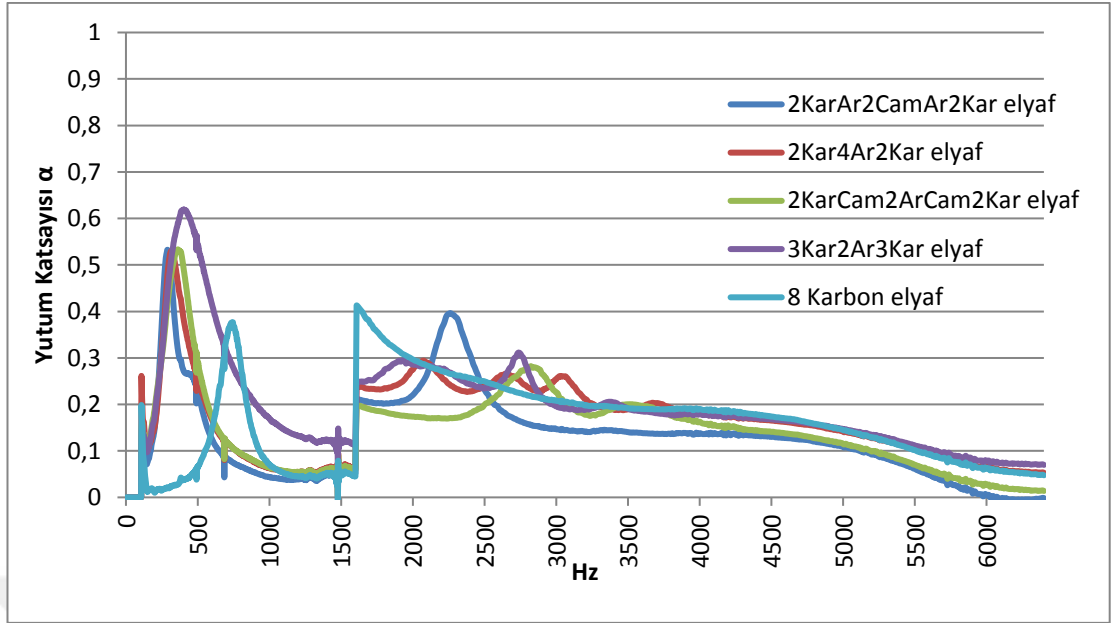


Şekil 4.14. Cam elyaf numunelerinin 0-500 Hz yutum grafiği

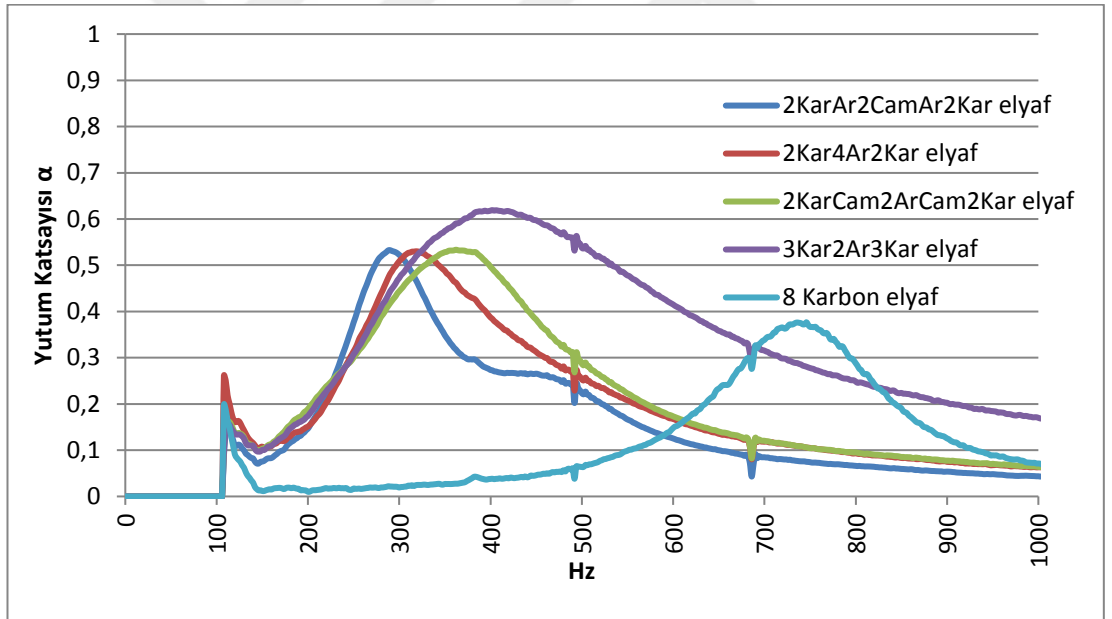


Şekil 4.15. Cam elyaf numunelerinin 1600-6400 Hz yutum grafiği

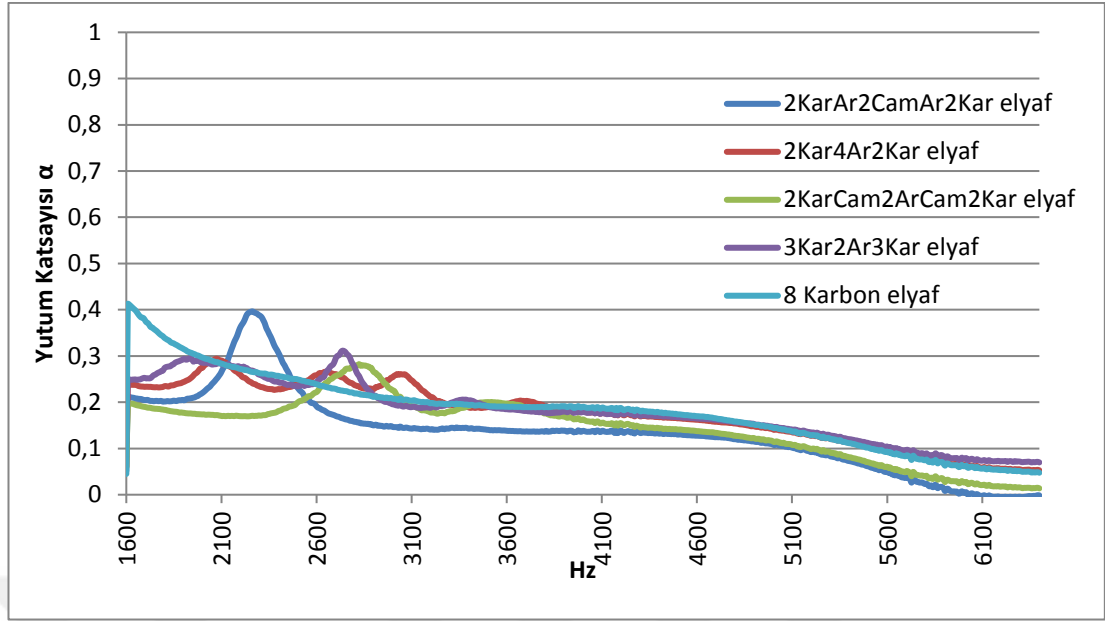
Karbon elyafı katmanları arasına cam ve aramid elyaf takviyesinin ses yutumuna olan etkisi Şekil 4.16.'da gösterilmiştir. Düşük frekans bölgesinde (Şekil 4.17.) [C]₈ numunesi 750 Hz bandında aktif yutum özelliği göstermekteyken cam ve aramid elyaf takviyesi ile aktif yutum 450 Hz frekans bandına kaymıştır. Hibritleşmeyle birlikte akustik yutum %38 seviyelerinden %60 seviyelerine yükselmiştir. Yüksek frekans bölgesinde (Şekil 4.18.) hibritleşmenin ihmal edilebilir olumlu etkisi görülmektedir.



Şekil 4.16. Karbon elyaf numunelerinin yutum grafiği



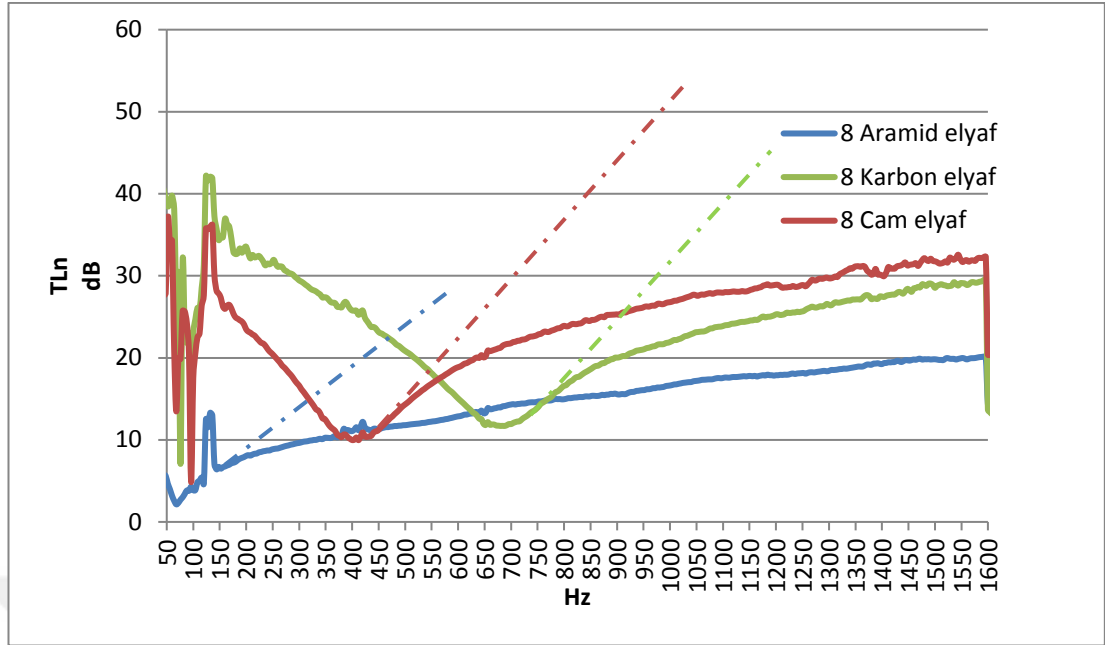
Şekil 4.17. Karbon elyaf numunenin 0-1000 Hz yutum grafiği



Şekil 4.18. Karbon elyaf numunelerinin 1600-6400 Hz yutum grafiği

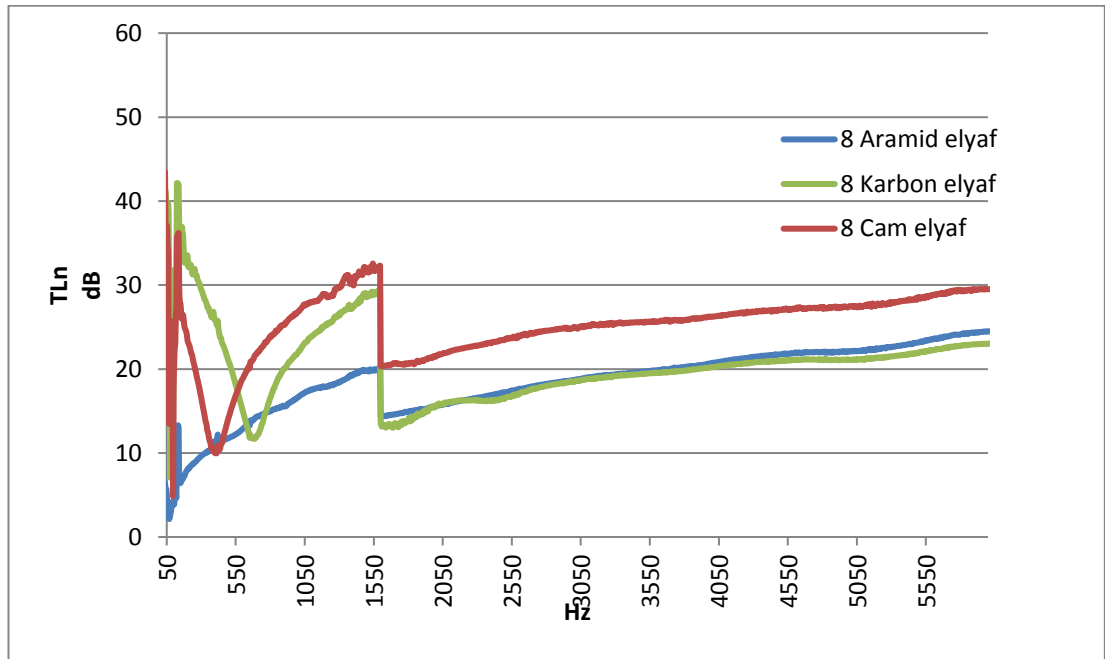
4.4. Ses İletim Kaybı Testi Sonuçları

Düşük frekans bantlarında $[C]_8$ numunesi 40 dB'lik ses iletim kaybı sağlamakta 600 Hz bandında bu değer azalıp ardından tekrar artmaktadır. $[G]_8$ numunesi düşük frekans bantlarında 35 dB'lik iletim kaybı sağlamakta 400 Hz bandında azalıp artmaktadır. Bu durum karbon ve cam elyaf numunelerinin rezonans kontrollü bölgesi olduğuna işaret etmektedir. $[C]_8$ ve $[G]_8$ numunelerinin ilk rezonans kontrollü bölgesi ise 50-100 Hz bandında görülmektedir. $[A]_8$ numunesi ise 100-150 Hz frekans bantlarında 15 dB'lik yüksek frekans bantlarında ise maksimum 20 dB'lik bir ses iletim kaybı sağlamaktadır. $[A]_8$ numunesinin rezonans kontrollü bölgesi 70-100 Hz arasında görülmektedir. 6000 Hz'e kadar tekrarlayan bir rezonans kontrollü bölge görülmemiştir. Numunelerin iç soğuruculuğu az olması nedeniyle geniş bir plato görülmektedir. Şekil 4.19.'da platoların anlaşılması amacıyla kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Bu durum numunelerin gürültü taşıdığı anlamına gelmektedir.



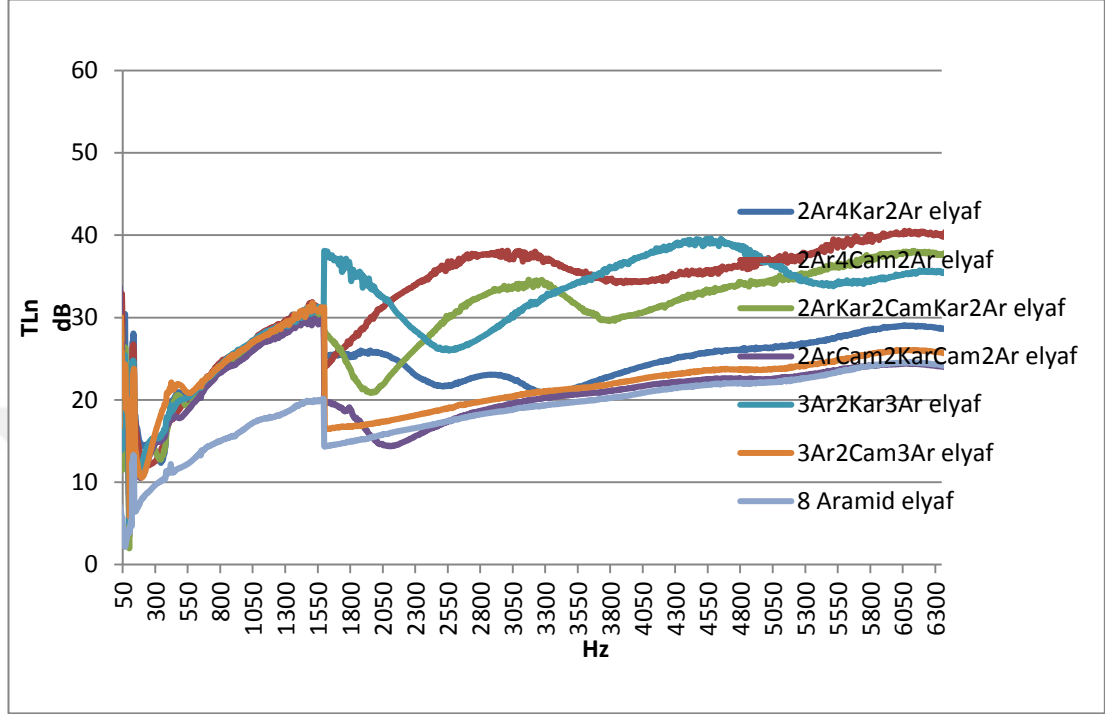
Şekil 4.19. Saf numunelerin 50-1600 Hz ses iletim kaybı grafiği

Saf numunelerin geniş frekans aralığındaki ses iletim kaybı grafiği Şekil 4.20.'de verilmiştir. 1600 Hz üzeri frekanslarda $[C]_8$ ve $[A]_8$ benzer özellik göstermekte 20 dB'lik bir ses geçiş kaybı sağlamakta, $[G]_8$ numunesi 30 dB'lik bir ses geçiş kaybı sağlamaktadır.

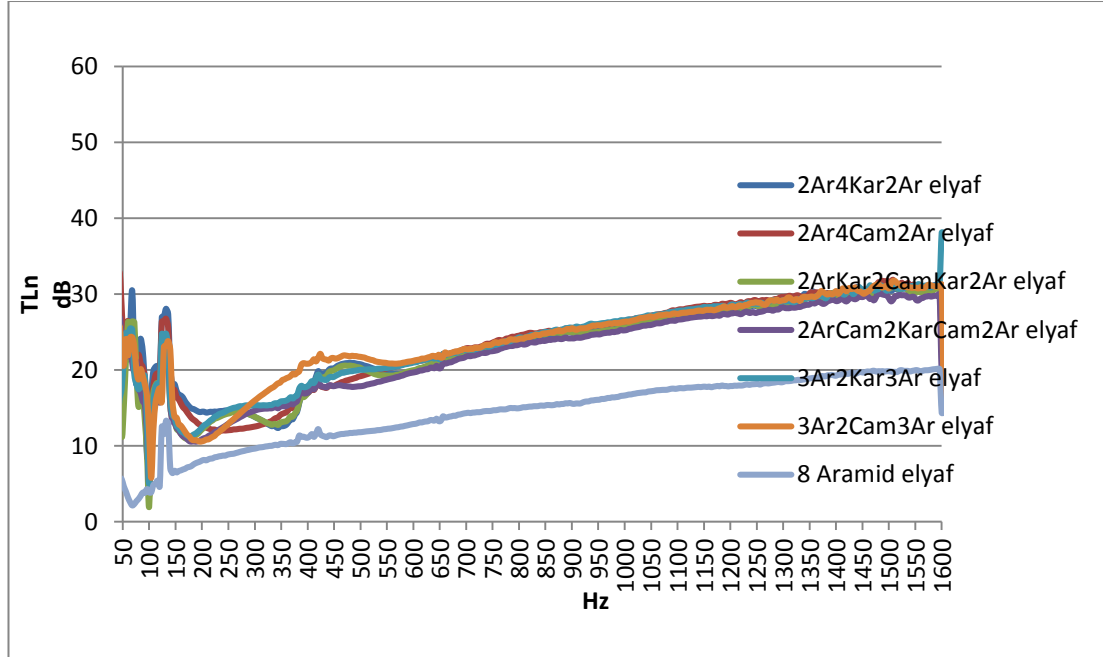


Şekil 4.20. Saf numunelerin ses iletim kaybı grafiği

Aramid elyaf katmanları arasında değişen numunelerin geniş frekans aralığındaki ses iletim kaybı grafiği Şekil 4.21.'de verilmiştir.

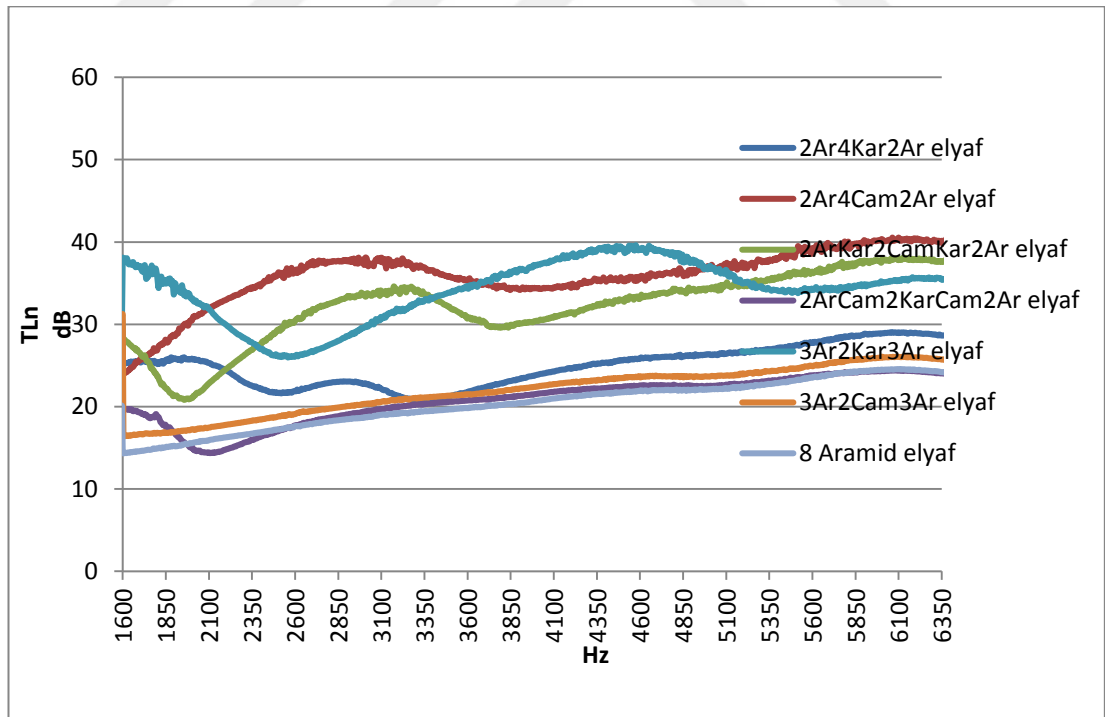


Şekil 4.21. Aramid elyaf numunelerinin ses iletim kaybı grafiği



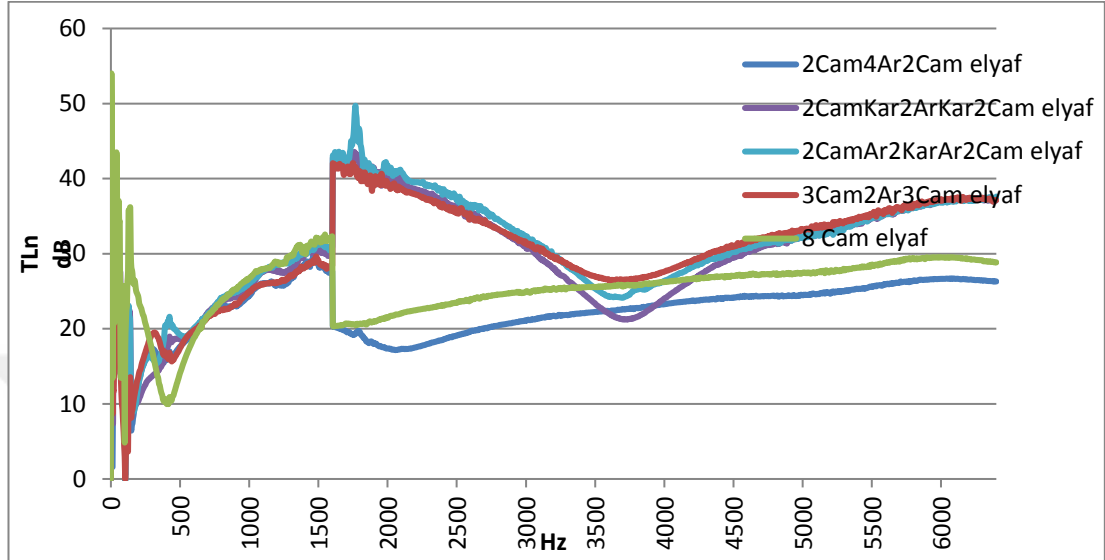
Şekil 4.22. Aramid elyaf numunelerinin 50-1600 Hz ses iletim kaybı grafiği

Aramid elyaf laminaları arasında değişen tüm numunelerin ilk rezonans bölgesi 100 Hz bandında görülmektedir. 50-1600 Hz aralığında Aramid elyaf laminaları arasında kalan numunelerin değişimiyle ikinci rezonans bölgesinden sonra kütle kontrollü bölgeler ve çakışım kontrollü frekans bölgeleri birbirlerine yakın fakat değişkenlik göstermektedir. 50-1600 Hz aralığında tüm aramid elyafları içeren numuneler 450 Hz frekansında plato yüksekliğine ulaşmıştır. Aramid elyaf numunelerine farklı oranlarda cam elyaf ya da karbon elyaf eklenmesiyle saf aramid numunesinin hibritleşmesi ses iletim kaybını arttırmıştır. İlk rezonans bölgesinden önce ve sonra karbon elyafı katkısı, aramide kıyasla 10 dB'den 30 dB'e yükseltmiştir. Aramid numunelerine karbon elyafı katkısı, cam elyafı katkısına kıyasla fayda göstermiştir. $[A_3G]_s$ numunesi aramid elyaf numuneleri arasında geniş kütle kontrollü bölgesine sahiptir. Aramid ve az miktarda cam elyaf katkısı olumlu sonuç vermektedir. Cam elyafı oranı arttıkça rezonans bölgeleri genişlediği $[A_2G_2]_s$ numunesinden anlaşılmaktadır. Karbon elyafı ve cam elyafı katkısının eşit olduğu durumda ise $[A_2CG]_s$ numunesinde rezonans bölge sayısı artmaktadır.



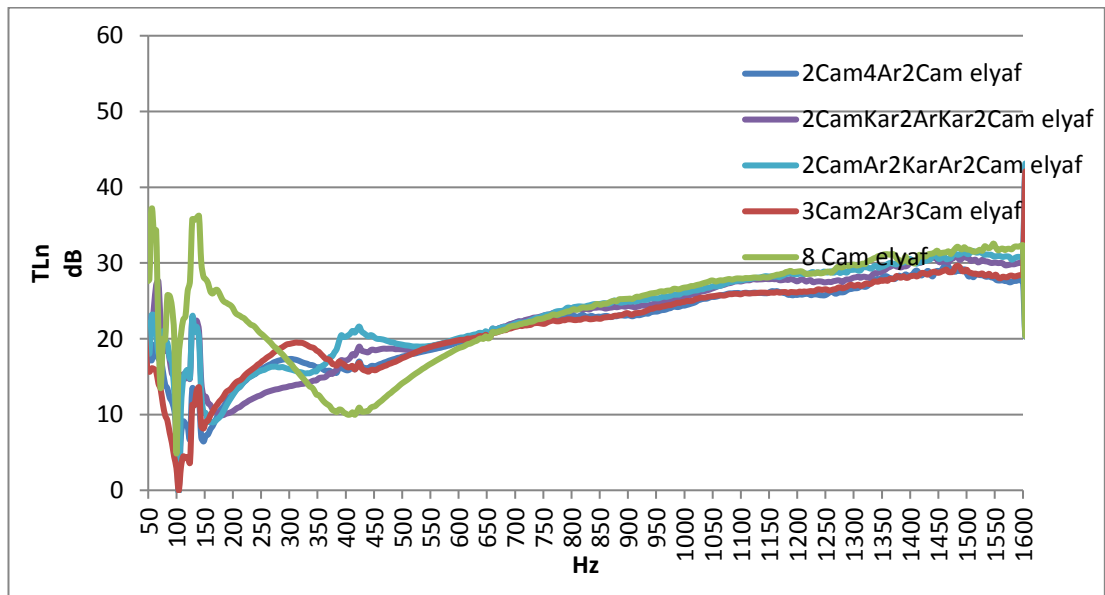
Şekil 4.23. Aramid elyaf numunelerinin 1600-6400 Hz ses iletim kaybı grafiği

Geniş frekans bölgesinde ise $[A_3C]_s$ numunesinin en iyi özellik gösterdiği Şekil 4.23.'de görülmektedir. Saf aramid elyaf maksimum 20 dB'lik bir ses iletim kaybı gösterirken, hibritleşmeyle birlikte bu değer 10 dB'lik bir artışla 30 dB olmuştur.



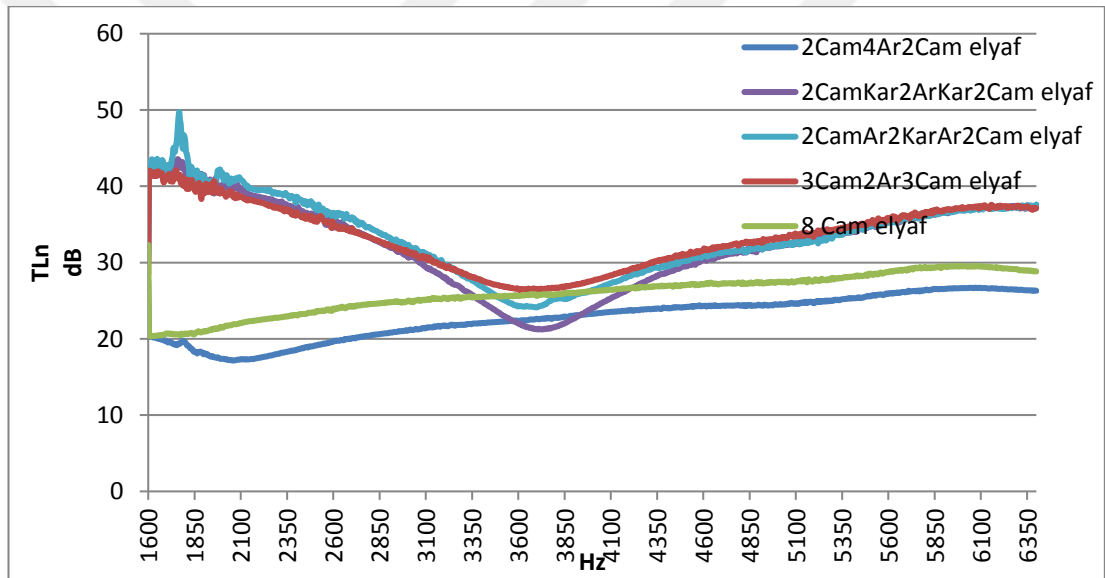
Şekil 4.24. Cam elyaf numunelerinin ses iletim kaybı grafiği

Cam elyaf katmanları arasında değişen numunelerin geniş frekans aralığındaki ses iletim kaybı grafiği Şekil 4.24.'de verilmiştir.



Şekil 4.25. Cam elyaf katmanları numunelerinin 50-1600 Hz ses iletim kaybı grafiği

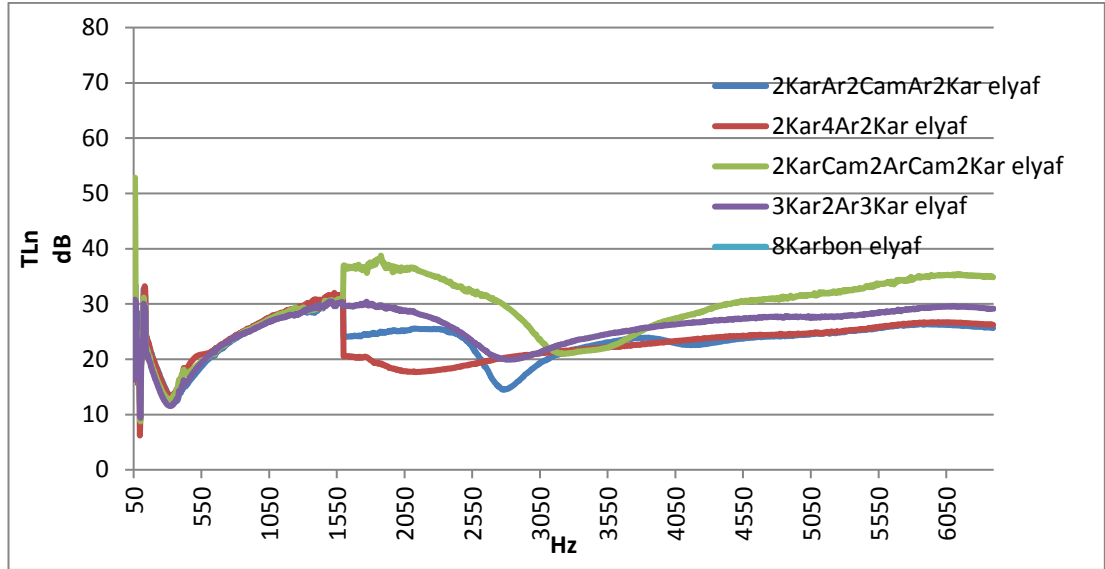
Cam elyaf laminaları arasında değişen tüm numunelerin ilk rezonans bölgesi 100 Hz bandında görülmektedir. 50-1600 Hz aralığında cam elyaf laminaları arasında kalan numunelerin değişimiyle ikinci rezonans bölgesinden sonra kütle kontrollü bölgeler ve çakışım kontrollü frekans bölgeleri birbirlerine yakın fakat değişkenlik göstermektedir. Karbon ve aramid elyaf katkısı $[G]_8$ numunesinin üçüncü rezonans bölgesini kaldırarak faydalı bir etkisi olmuştur. 50-1600 Hz aralığında tüm cam elyafları içeren numuneler 450 Hz frekansında plato yüksekliğine ulaşmıştır. Cam elyaf numunelerine farklı oranlarda karbon elyaf ya da aramid elyaf eklenmesiyle saf cam numunesinin hibritleşmesi ses iletim kaybını azaltmıştır. İlk rezonans bölgesinden önce ve sonra karbon ve aramid elyafı katkısı, 35 dB'den 20 dB'e düşürmüştür.



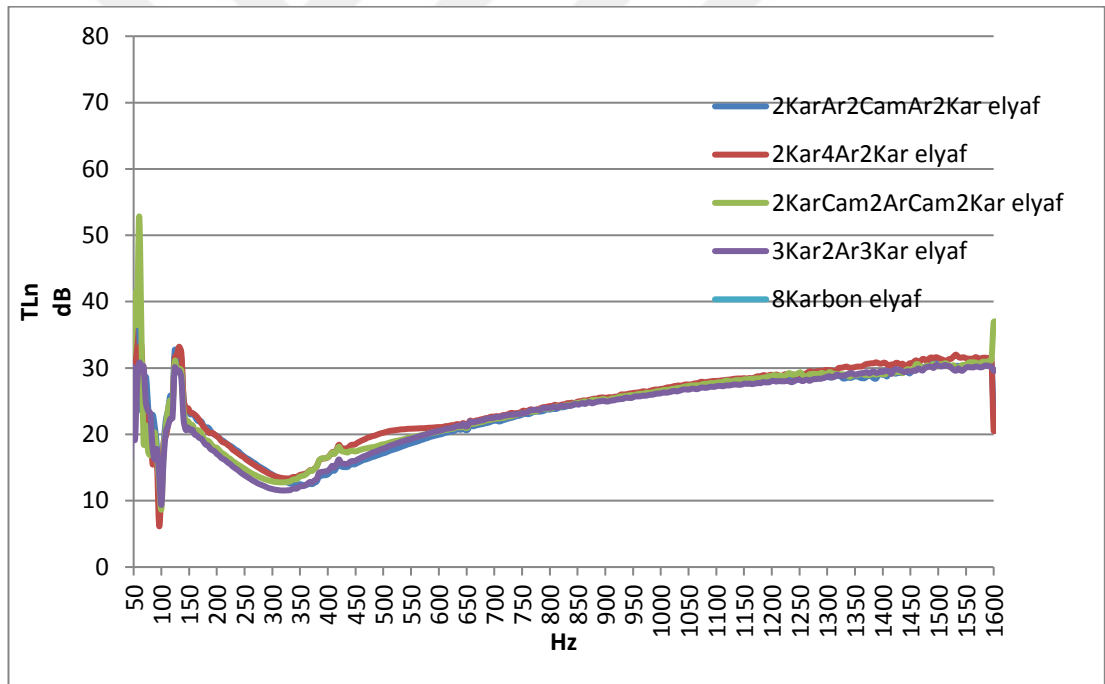
Şekil 4.26. Cam elyaf numunelerinin 1600-6400 Hz ses iletim kaybı grafiği

Cam elyafının hibritleşmesinin 1600-6000 Hz arasındaki ses iletim kaybına etkisi Şekil 4.26.'da gösterilmiştir. $[G]_8$ ve $[G_2A_2]_S$ numunesi ses iletim kaybı değerleri 30 dB'de sabitlenirken, diğer numuneler 3600 Hz'de üçüncü rezonans bölgesi görülmektedir.

Karbon elyaf katmanları arasında değişen numunelerin geniş frekans aralığındaki ses iletim kaybı grafiği Şekil 4.27.'de verilmiştir.



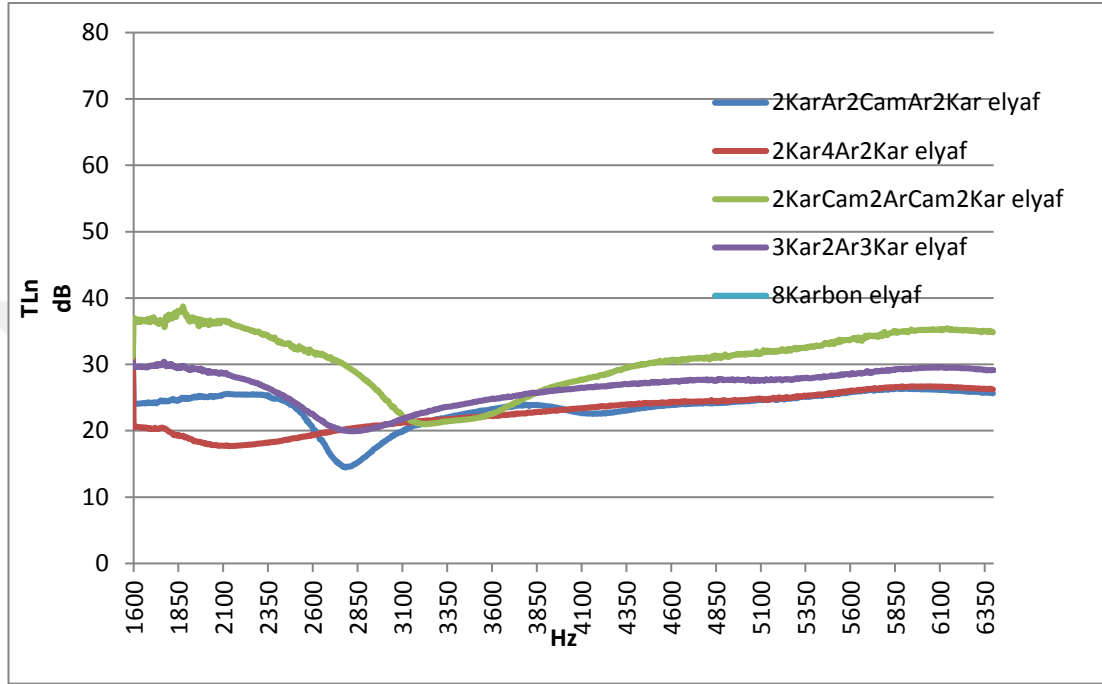
Şekil 4.27. Karbon elyaf numunelerinin ses iletim kaybı grafiği



Şekil 4.28. Karbon elyaf numunelerinin 50-1600 Hz ses iletim kaybı grafiği

Karbon elyaf laminaları arasında değişen tüm numunelerin ilk rezonans bölgesi 100 Hz bandında görülmektedir. 50-1600 Hz aralığında karbon elyaf laminaları arasında kalan numunelerin değişimiyle ikinci rezonans bölgesinden sonra kütle kontrollü bölgeler ve çakışım kontrollü frekans bölgeleri birbirlerine iç içe olduğu görülmektedir. Cam ve aramid elyaf katkısı $[C]_8$ numunesinin ilk rezonans

bölgesindeki iletim kaybı özelliğine olumsuz etkisi olmuştur. 50-1600 Hz aralığında tüm karbon elyafları içeren numuneler 450 Hz frekansında plato yüksekliğine ulaşmıştır. İlk rezonans bölgesinden önce ve sonra cam ve aramid elyafı katkısı, 40 dB'den 30 dB'e düşürmüştür.



Şekil 4.29. Karbon elyaf numunelerinin 1600-6000 Hz ses iletim kaybı grafiği

Karbon elyafının hibritleşmesinin 1600-6000 Hz arasındaki ses iletim kaybına etkisi Şekil 4.29.'de verilmiştir. [C]₈ numunesin hibritleştirilmesi sonucu 2850 Hz'deki üçüncü rezonans bölgesi kaldırılmıştır.

4.5. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Deneysel ve sayısal yöntemlerle elde edilen mod frekansları

Tablo 4.5.'de verilmiştir. Birkaç istisna haricinde deneysel ve sayısal yöntemlerle elde edilen mod frekanslarının birbiriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Buradan deneylerimizin hassas bir şekilde gerçekleştirildiği ve güvenilir sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

Tablo 4.5. Mod frekanslarının karşılaştırılması

Numune Adı	1.Mod [Hz]			2.Mod [Hz]			3.Mod [Hz]		
	Modal	Sarsıcı	Numerik	Modal	Sarsıcı	Numerik	Modal	Sarsıcı	Numerik
[C] ₈	32,27	34,00	34,06	205,44	201,40	213,27	586,57	604,40	596,61
[A] ₈	25,44	26,00	26,05	167,61	155,20	163,19	467,91	478,80	456,73
[G] ₈	17,29	14,69	14,74	108,27	92,66	92,34	310,27	330,40	258,64
[A ₂ G C] _s	21,68	22,90	22,95	146,37	138,60	143,77	417,59	425,60	402,47
[A ₂ C G] _s	23,79	23,50	23,55	182,53	148,10	147,53	388,67	443,40	412,96
[A ₂ G ₂] _s	21,60	21,50	21,55	140,12	130,80	134,99	374,74	391,30	377,91
[A ₂ C ₂] _s	24,54	19,00	19,05	156,77	118,40	119,35	419,04	359,50	334,16
[G ₂ A C] _s	21,68	22,97	14,74	139,58	137,50	92,37	402,88	411,10	258,70
[G ₂ C A] _s	21,45	23,00	23,05	141,21	135,50	144,39	417,92	411,10	404,20
[G ₂ A ₂] _s	25,18	25,63	25,68	149,62	151,60	160,86	417,90	452,30	404,92
[C ₂ A G] _s	28,42	30,00	30,05	188,57	178,00	188,23	531,57	536,00	526,00
[C ₂ G A] _s	28,33	30,00	30,06	192,48	180,20	188,24	527,09	543,30	526,72
[C ₂ A ₂] _s	36,07	36,88	36,94	244,48	220,60	231,28	679,73	651,60	646,84
[A ₃ G] _s	42,72	29,69	29,74	192,87	178,60	186,26	547,14	542,50	521,12
[A ₃ C] _s	23,31	23,50	23,55	118,29	158,10	147,54	341,38	475,90	413,00
[G ₃ A] _s	15,75	17,81	17,86	109,16	105,90	111,89	305,99	320,50	313,35
[C ₃ A] _s	35,83	38,00	38,06	239,90	234,50	238,27	697,75	705,30	666,32

Sarsıcı test sonuçlarından ve modal analiz sonuçlarından elde edilen sönüm değerleri Tablo 4.6.'da verilmiştir. Sarsıcı testinden elde edilen sönümler modal analiz sönüm sonuçlarına kıyasla daha düşük çıkmıştır. Sarsıcı testlerinde uygulanan serbest titreşim, numunelerdeki homojenliğe bağlı olarak sönüm değerlerini etkilemiştir. Modal analiz doğası gereği anlık darbelerden oluşan hareketin referans noktasına göre izafi hareketinin hesaplanması olduğundan dolayı sönüm değerleri sarsıcı test sonuçlarına kıyasla yüksektir.

Tablo 4.6.Sarsıcı ve modal sönüm değerlerinin karşılaştırılması

Numune Adı	1.Mod		2.Mod		3.Mod	
	Sarsıcı	Modal	Sarsıcı	Modal	Sarsıcı	Modal
1 [C] ₈	0,59128	1,01013	1,340187	2,71954	0,696026	1,05684
2 [A] ₈	1,56867	3,14692	2,495105	3,49676	0,939177	1,91667
3 [G] ₈	1,74965	1,30022	2,097332	1,15095	0,739945	0,99185
4 [A ₂ G C] _s	1,77953	2,14025	1,413687	3,1123	1,036174	0,98526
5 [A ₂ C G] _s	1,75551	1,91933	1,721241	1,18423	1,294985	4,37889
6 [A ₂ G ₂] _s	2,09371	1,21361	1,683849	1,86891	1,045936	0,61287
7 [A ₂ C ₂] _s	2,68487	2,90597	1,696234	0,97671	1,217075	1,14749
8 [G ₂ A C] _s	0,68295	1,7467	1,150233	1,19739	0,672186	1,37179
9 [G ₂ C A] _s	0,94414	1,47043	0,697991	1,12136	0,621614	1,20677
10 [G ₂ A ₂] _s	1,02649	1,69906	0,825688	1,05417	0,377575	1,24112
11 [C ₂ A G] _s	1,17916	0,67019	0,628999	1,62129	0,439981	2,17806
12 [C ₂ G A] _s	1,67437	1,86381	0,93098	1,14006	0,321458	0,76276
13 [C ₂ A ₂] _s	1,11912	0,92644	0,835824	2,17275	0,902289	0,92399
14 [A ₃ G] _s	2,01283	5,77907	1,39248	2,13537	1,035723	1,92814
15 [A ₃ C] _s	2,65867	1,73229	1,771776	3,14645	1,016191	1,52521
16 [G ₃ A] _s	2,58566	1,92722	1,063184	0,83557	0,582924	1,97425
17 [C ₃ A] _s	0,98879	1,13373	0,61619	1,15182	0,878797	1,39973

Numunelerin modal sönüm bilgileri (loss factor), Tablo 4.7.'de verilmiştir. Modal sönüm, radyan başına dağılan enerjinin tepe potansiyel enerjiye çevrimi olarak tanımlanır. Bu, farklı malzemelerin sönümleme kapasitesini karşılaştırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu değer düşük sönümleye sahip numuneleri karşılaştırmak için kullanılmaktadır.

Tablo 4.7. Modal sönüm tablosu

Numune Adı	1.Mod	2.Mod	3.Mod
1 [C] ₈	5,975E-07 + 0i	9,122E-06 + 0i	1,295E-06 + 0i
2 [A] ₈	7,34E-06 + 0i	1,322E-05 + 0i	3,6E-06 + 0i
3 [G] ₈	9,165E-06 + 0i	3,444E-06 + 0i	7,566E-06 + 0i
4 [A ₂ G C] _s	7,903E-06 + 0i	8,583E-06 + 0i	3,04E-06 + 0i
5 [A ₂ C G] _s	3,21E-06 + 0i	2,095E-06 + 0i	1,268E-05 + 0i
6 [A ₂ G ₂] _s	6,52E-07 + 0i	2,542E-06 + 0i	3,349E-06 + 0i
7 [A ₂ C ₂] _s	2,29E-06 + 0i	1,804E-06 + 0i	1,907E-06 + 0i
8 [G ₂ A C] _s	2,195E-06 + 0i	4,564E-06 + 0i	8,241E-06 + 0i
9 [G ₂ C A] _s	8,56E-07 + 0i	1,816E-06 + 0i	3,689E-06 + 0i
10 [G ₂ A ₂] _s	1,003E-06 + 0i	7,37E-07 + 0i	1,66E-06 + 0i
11 [C ₂ A G] _s	2,281E-07 + 0i	5,108E-06 + 0i	7,929E-06 + 0i
12 [C ₂ G A] _s	5,82E-07 + 0i	3,002E-06 + 0i	2,222E-06 + 0i
13 [C ₂ A ₂] _s	1,323E-07 + 0i	4,6E-06 + 0i	1,007E-06 + 0i
14 [A ₃ G] _s	4,628E-06 + 0i	2,417E-06 + 0i	3,01E-06 + 0i
15 [A ₃ C] _s	3,151E-07 + 0i	1,155E-05 + 0i	5,014E-06 + 0i
16 [G ₃ A] _s	6,266E-06 + 0i	2,175E-07 + 0i	6,896E-06 + 0i
17 [C ₃ A] _s	1,569E-07 + 0i	8,179E-07 + 0i	2,586E-06 + 0i

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmanın amacı saf ve hibrit haldeki karbon-cam-aramid malzeme tabakalı kompozit yapıların titreşim ve akustik karakteristiklerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesidir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere belirli katman özelliklerinde numuneler hazırlanmıştır. Titreşim testleri için ankastre giriş numuneler, akustik testler için ise dairesel formda numuneler kullanılmıştır. Sayısal çalışmalar için sonlu elemanlar tekniği tercih edilmiştir. Numunelerin titreşim karakteristiklerinin belirlenebilmesi için deneysel modal testler ve sarsıcı testleri kullanılmıştır. Akustik özelliklerin incelenmesi için ise akustik empedans tüpü kullanılmıştır.

Sayısal ve deneysel sonuçlar birbiriyle önemli oranda örtüşmüştür. Bu da deneysel çalışmaların güvenilir olduğunu göstermektedir. Toplanan verilerin işlenmesiyle elde edilen sonuçlar, karbon-cam-aramid kompozit katmanlarının dizilim sırasının numunelerin titreşim ve akustik özellikleri üzerine önemli etkilerinin olduğunu göstermiştir. Karbon-cam-aramid kompozitlerinin dizilimi titreşim karakteristiklerini akustik özelliklerden daha fazla etkilemektedir.

Farklı frekans aralıklarındaki titreşim mod frekanslarının cam elyafı kullanımıyla sıklaştığı, karbon ve aramid elyafı kullanımıyla azaldığı görülmüştür. Modal analiz sonuçlarına göre $[C_3A]_8$ kompozitlerinin en iyi, $[G]_8$ kompozitlerinin en zayıf titreşim performansına sahip olduğu görülmüştür. Dizilimdeki Karbon katmanının malzeme rijitliğini arttırdığı gözlenmiştir. Genel eğilime göre karbon katmanı takviyesinin sönüm oranını azalttığı, aramidin ise nispeten arttırdığı belirlenmiştir.

Kompozit numunelerin akustik cevaplarının belirli bir frekans aralığında yoğunlaştığı görülmüştür. Karbon katmanları azaltıldıkça yutum frekans bandı küçülmektedir. Modal analiz sonuçlarına göre $[C_3A]_8$ kompozitlerinin en iyi, $[G]_8$ kompozitlerinin en

zayıf mekanik performansa sahip olduğu görülmüştür. Yutum testlerinin sonuçlarına göre $[C_3A]_8$ kompozitlerinin en iyi, $[C]_8$ kompozitlerinin ise en zayıf akustik yutum performansına sahip olduğu görülmüştür.

Test numunesinin çok ince dolayısıyla çok hafif olması Testlerin yapılmasında karşılaşılan en önemli zorluklardan birisi olduğu belirlenmiştir. Hafif numuneler modal test ile elde edilen frekans cevaplarının hassasiyetini düşürmektedir. İnce numuneler ise akustik yutum cevaplarının elde edilmesini zorlaştırmaktadır.

Elde edilen nihai sonuçlara göre, çok hafif olmasına karşın, rijitliği ve rezonansa dayanımı önemli oranda arttırdığı için karbon-cam-aramid kompozitleri dinamik titreşim yüklere maruz kalınan birçok alanda rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca iyi bir dizilim formasyonu ile da akustik ortamlarda rahatlıkla kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] N. M. Ula, Y. G. Wijaya, P. Muksin, M. Gilang, N. L. Muzayadah ve R. A. Ramadhan, «Vibration characteristics investigation of sandwich composite materials of uni-directional and twill carbon fibers,,» *Measurement: Sensors*, cilt 18, no. 2665-9174, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100230>, 2021.
- [2] G. Fairlie ve J. Njuguna, «Damping properties of flax/carbon hybrid epoxy/fibre-reinforced composites for automotive semi-structural applications,,» *mdpi J.*, cilt 8 (10), no. 10.3390/fib8100064, pp. 1-15, 2020.
- [3] B. & K. Ole Døssing, *Structural Testing Part1 Mechanical Mobility Measurements handbook*, Denmark: Brüel and Kjær, 1988.
- [4] M. Assarar, W. Z. Wajdi Zouari, H. Sabhi, A. Rezak ve J.-M. Berthelot, «Evaluation of the Damping of Hybrid Carbon-Flax Reinforced Composites,,» *Composite Structures*, cilt 132. 10.1016/j.compstruct.2015.05.016., 2015.
- [5] Q. Liu, «Analytical sensitivity analysis of frequencies and modes for composite laminated structures,,» *International Journal of Mechanical Sciences*, cilt 90, pp. 258-277, 2015.
- [6] R. Akbar, N. M. Ula, Y. Giri, P. Muksin, M. Gilang, N. L. Muzayadah ve R. A. Ramadhan, «Vibration characteristics investigation of sandwich composite materials of uni-directional and twill carbon fibers,,» *Measurement: Sensors*, cilt 18 , no. 2665-9174, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100230>., p. , 2021.
- [7] V. erbundwerkstoff, «composite material». United States of America Patent US 7,210,627 B2, 1 May 2007.
- [8] T. Keerthi vasan, S. Shibi ve C. Tamilselvan, «Fabrication and testing of composite leaf spring using carbon, glass and aramid fiber,,» *Materials Today: Proceedings*, Cilt %1 / %2Volume 21, Part 1, no. ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.358>., pp. 45-51, 2020.
- [9] K. Cheour, M. Assarar, D. Scida, A. Rezak ve G. Xiao-lu, «Effect of Stacking Sequences on the Mechanical and Damping Properties of Flax Glass Fiber Hybrid,,» *Journal of Renewable Materials*, cilt 7., no. 10.32604/jrm.2019.06826, pp. 877-889, 2019.

- [10] Y. Zhang, Y. Li, H. Ma ve Y. Tao, «Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites,» *Composites Science and Technology*, cilt 88, no. ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.08.037>, pp. 172-177, 2013.
- [11] M. J. L. Guen, R. H. Newman ve A. Fernyhough, «The damping–modulus relationship in flax–carbon fibre hybrid composites,» *Composites Part B: Engineering*, cilt 89, no. ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.046>, pp. 27-33, 2016.
- [12] Z. Zhang, Y. Xiao, Y. Liu ve Z. Su, «A Quantitative Investigation on Vibration Durability of Viscoelastic Relaxation in Bolted Composite Joints,» *Journal of Composite Materials*, no. <https://doi.org/10.1177/0021998316631810>, p. 4041–4056, 2016.
- [13] S. Doebling, C. Farrar ve M. Prime, «A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods.,» *The Shock and Vibration Digest*, cilt 30, no. 10.1177/058310249803000201., pp. 91-105, 1998.
- [14] W. Fan ve P. Qiao, «Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study.,» *Structural Health Monitoring*, cilt 10(1), no. <https://doi.org/10.1177/1475921710365419>, p. 83–111, 2011.
- [15] F. Flor, R. d. Medeiros ve V. Tita, «Numerical and experimental damage identification in metal-composite bonded joint,» *Adhesion*, cilt 91(10–11), p. 863–82, 2015.
- [16] C. & O. S. Yang, «Detection of delamination in composite beams using frequency deviations due to concentrated mass loading,» *Composite Structures*, cilt 146, no. 10.1016/j.compstruct.2015.12.002. , pp. 1-13, 2016.
- [17] Z. Zhang, H. Xu, Y. Liao, Z. Su ve Y. Xiao, «Vibro-Acoustic Modulation (VAM)-inspired structural integrity monitoring and its applications to bolted composite joints.,» *Compos Struct*, no. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.043>., 2017..
- [18] R. Chandra, S. Singh ve K. Gupta, «Damping studies in fiber-reinforced composites : a review,» *Composite Structures*, cilt 46, pp. 41-51, 1999.
- [19] A. Treviso, B. Van Genechten, D. Mundo ve M. Tournou, «Damping in composite materials: Properties and models,» *Composites Part B: Engineering*, cilt 78, no. 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.081>., pp. 144-152, 2015.

- [20] Z. Hashin, «Complex moduli of viscoelastic composites—I. General theory and application to particulate composites.,» *International Journal of Solids and Structures*, cilt 6, pp. 539-552, 1970.
- [21] R. Gibson ve R. Plunkett, «Dynamic mechanical behavior of fiber-reinforced composites: measurement and analysis,» *J Compos Mater*, cilt 10(4), no. <https://doi.org/10.1177/002199837601000406>, p. 325–341, 1976.
- [22] R. & B. D. Adams, «Effect of Fibre Orientation and Laminate Geometry on the Dynamic Properties of CFRP,» *Journal of Composite Materials*, cilt 7, pp. 402 - 428, 1973.
- [23] S. Jimmy Hwang ve F. Gibson Ronald., «The use of strain energy-based finite element techniques in the analysis of various aspects of damping of composite materials and structures,» *J Compos Mater*, cilt 26(17), p. 2585–2605, 1992.
- [24] Y. Ohta, Y. Narita ve K. Nagasaki, «On the damping analysis of FRP laminated composite plates,» *Composite Structures*, cilt 57, no. 10.1016/S0263-8223(02)00080-6., pp. 169-175, 2002.
- [25] J. Tsai ve N. Chang, «2-D analytical model for characterizing flexural damping responses of composite laminates,» *Composite Structures*, cilt 89, no. 10.1016/J.COMPSTRUCT.2008.09.003, pp. 443-447, 2009.
- [26] J. C. Slater, W. Keith Belvin ve D. J. Inman, «A comparison of viscoelasticdamping models. In: 5th NASA/DOD Controls,» *Structures Interaction Technology Conference*, cilt 1, 1993.
- [27] C. Kyriazoglou ve F. Guild, «Finite element prediction of damping of composite GFRP and CFRP laminates – a hybrid formulation – vibration damping experiments and Rayleigh damping,» *Composites Science and Technology*, cilt 66, no. 10.1016/J.COMPSCITECH.2004.12.044, pp. 2643-2654., 2006.
- [28] J.-M. Berthelot, M. Assarar, Y. Sefrani ve A. El Mahi, «Damping Analysis of Composite Materials and Structures,» *Composite Structures*, cilt 85, no. 10.1016/j.compstruct.2007.10.024., pp. 189-204, 2008.
- [29] P. Thakare, N. Kumar ve V. Ugale, «Sound transmission loss and flexural strength assessment of hybrid composite reinforced with natural fibers and kevlar.,» *Materials Today: Proceedings*, no. 19. 10.1016/j.matpr.2019.07.754., 2019.
- [30] X. Tang ve Y. Xiong, «Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review,» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, cilt 101, no. 1359-835X,doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.07.002., pp. 360-380, 2017.

- [31] Y. Yang, B. Li, Z. Chen, N. Sui, Z. Chen ve M. Sae, «Acoustic properties of glass fiber assembly-filled honeycomb sandwich panels,» *Compos. B Eng*, cilt 96, no. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.046>, p. 281–286, 2016.
- [32] «Product Data: Impedance Tube Kits Type 4206,» Brüel & Kjær, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.bksv.com/media/doc/bp1039.pdf>, Erişim tarihi: 11.01.2022.
- [33] A. S. E1050-12, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System, 2012.
- [34] A. E2611-17, Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method, 10.1520/E2611-17, 2019.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Furkan Kerem AK

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makina Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makina Mühendisliği	2018
Lise	Şehit Üsteğmen Selçuk Esedoğlu Anadolu Lisesi	2012

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2020-Halen	Pro-Plan Proje Mühendislik San. ve Tic.	Makina Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce