



# **Biyomalzemelerin Akustik ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması**

**Program Kodu: 1002**

**Proje No: 119M115**

Proje Yürütücüsü:  
**Doç. Dr. Hasan KÖRÜK**

Araştırmacı:

Doç. Dr. Garip GENÇ

Bursiyerler:

Ahmet Cihan ÖZCAN

Yusuf SAYGILI

Büşra KOÇ

Barış EFENDİ

EKİM 2020  
İSTANBUL



## Önsöz

Bu proje kapsamında, jüt lifleri ve çeşitli luffa (kabak) lifleri kullanılarak farklı kalınlıklarda ve lif/reçine oranlarında yapılar üretilerek bu yapıların ses yutma ve ses iletim kaybı gibi akustik özellikleri ve elastik ve sönüm gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. (i) Farklı kalınlıklarda ve lif/reçine oranlarında üretilen yapılar için deneysel olarak belirlenen çok sayıda ses yutma katsayıları ve ses iletim kayıpları, (ii) ölçülen ses yutma ve iletim kaybı verilerine kalınlığa ve lif/reçine oranına bağlı uydurulan eğriler veya ampirik modeller, (iii) ses yutma katsayılarını ve iletim kayıplarını tahmin etmek için bu çalışmada kullanılan Delany-Bazley ve Johnson-Champoux-Allard gibi teorik modeller, (iv) farklı kalınlıklarda ve lif/reçine oranlarında üretilen yapılar için deneysel yollardan belirlenen sönüm ve elastisite modülü değerleri ve (v) deneysel olarak belirlenen sönüm ve elastisite modülü verilerine lif/reçine oranına bağlı uydurulan eğriler birçok uygulamada homojen ve hibrit biyokompozit yapılar tasarlamak için kullanılabilirler. Bu proje kapsamında, 1 makale uluslararası bir dergide (SCI) yayımlanmış olup, 2 uluslararası dergi makalesi ve 2 uluslararası kitap bölümü yazım aşamasındadır. Buradaki çalışmalar, ancak TÜBİTAK'ın 119M115 nolu proje kapsamında verdiği destek sayesinde gerçekleştirilebilmiştir.

## İçindekiler

Önsöz.....	ii
İçindekiler.....	iii
Tablo Listesi.....	v
Şekil Listesi.....	vi
Özet.....	xi
Abstract.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	6
3.1 Numunelerin Üretilmesi.....	6
3.2 Akustik Özelliklerin Belirlenmesi.....	8
3.2.1 Akustik Test Numuneleri.....	8
3.2.2 Akustik Özelliklerin Deneysel Olarak Belirlenmesi.....	9
3.2.3 Akustik Özelliklerin Tahmin Edilmesi.....	11
3.3 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	12
3.3.1 Mekanik Test Numuneleri.....	12
3.3.2 Frekans Tepki Fonksiyonu Ölçümleri.....	13
3.3.3 Deneysel Modal Parametrelerin Belirlenmesi.....	14
3.3.4 Sonlu Eleman Analizleri.....	16
4. BULGULAR.....	17
4.1 Reçinesiz Numunelerin Akustik Özellikleri.....	17
4.1.1 Fiberlerin Değişkenliği ve Üretim Sürecinin Tekrarlanabilirliği.....	17
4.1.2 Bitkilerin Yetiştirildiği Bölgenin Akustik Özellikler Üzerindeki Etkisi.....	19
4.1.3 Frekansa ve Kalınlığa Bağlı Değişen Akustik Özellikler.....	20
4.1.4 Düşük, Orta ve Yüksek Frekanslar için Akustik Özelliklerin Kalınlığa Bağlı Analizi.....	23
4.1.5 Homojen ve Hibrit Numunelerin Akustik Özelliklerin Karşılaştırılması.....	28



4.2 Reçineli Numunelerin Akustik Özellikleri.....	30
4.2.1 Frekansa ve Kalınlığa Bağlı Değişen Akustik Özellikler.....	30
4.2.2 Düşük, Orta ve Yüksek Frekanslar için Akustik Özelliklerin Kalınlığa Bağlı Analizi.....	31
4.2.3 Lif/Reçine Oranın Akustik Özelliklere Etkisi.....	34
4.2.4 Homojen ve Hibrit Numunelerin Akustik Özelliklerin Karşılaştırılması.....	36
4.2.5 Biyokompozitlerin Üretimi ve Test Edilmeleriyle İlgili Zorluklar.....	37
4.3 Akustik Özelliklerin Teorik Olarak Tahmin Edilmesi.....	39
4.3 Mekanik Özellikler.....	42
4.3.1 Modal Parametrelerin Belirlenmesi.....	42
4.3.2 Sönüm Değerleri.....	44
4.3.2 Elastik Özellikler.....	46
4.4 Doğal Liflerin Güncel Uygulamaları ve Potansiyel Kullanım Alanları.....	52
5. SONUÇ.....	53
Kaynaklar.....	56

## Tablo Listesi

Tablo 3.1. Titreşim test numunelerinin isimleri, konfigürasyonları, lif/epoksi oranları, kalınlıkları, uzunlukları ve genişlikleri .....	13
Tablo 4.1. Ölçülen akustik FTF'ler ve daire-uydurma yöntemi kullanılarak belirlenen on iki kompozit plakanın doğal veya modal frekansları .....	43
Tablo 4.2. Ölçülen yapısal FTF'ler ve daire-uydurma yöntemi kullanılarak on iki kompozit plakanın belirlenen kayıp faktörleri veya modal sönüm değerleri .....	44
Tablo 4.3. Homojen jüt ve luffa kompozit plakaların elastisite modülleri (plakaların izotropik olduğu varsayılmıştır) .....	47
Tablo 4.4. Homojen jüt ve luffa kompozit plakaların elastik özellikleri .....	49

## Şekil Listesi

Şekil 2.1 Jüt ve kenaf gibi çeşitli doğal liflerin ve karbon ve cam gibi klasik malzemelerin 500-2000 Hz arasındaki ses yutma katsayıları .....	3
Şekil 2.2. Lif/reçine oranları 0.5 civarında olan flaks ve luffa lif (kabak lifi) takviyeli biyokompozitlerin ve karbon ve aramid malzemelerinin kayıp faktörleri .....	4
Şekil 3.1. Biyokompozitlerin üretim süreci .....	7
Şekil 3.2. Reçinenin kullanılmadığı örnek reçinesiz jüt (a) ve luffa (c) ve epoksinin kullanıldığı reçineli kompozit jüt (b) ve luffa (d) numuneler .....	7
Şekil 3.3. Test numunelerinin tasarımları: homojen (a) jüt ve (b) luffa numuneler ve bunların hibrit (c) jüt-luffa-jüt (JLJ) ve (d) luffa-jüt-luffa (LJL) kompozitleri .....	8
Şekil 3.4. Akustik testlerde kullanılan 29 mm çapında örnek homojen jüt (a ve d) ve luffa (b ve e) numuneler ve bunların hibrit jüt-luffa-jüt veya JLJ (c ve f) kompozitleri: numunelerin kesit alanları (a-c) üretilen test parçaları (d-f) .....	9
Şekil 3.5. Empedans tüp yöntemine dayalı ses yut katsayısı (a) ve ses iletim kaybı (b) ölçümleri için deneysel düzeneklerin şematik resimleri .....	10
Şekil 3.6. Frekans tepki fonksiyonlarının ölçüm prosedürü .....	14
Şekil 3.7. Daire-uydurma yöntemi için frekans ve açılı tanımlamaları .....	16
Şekil 4.1. Nominal olarak özdeş dört adet reçinesiz homojen jüt numunesinin $\alpha$ ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (kalınlık: 10 mm, numune yoğunluğu: 419.8 kg/m <sup>3</sup> ) .....	18
Şekil 4.2. Nominal olarak özdeş dört adet reçinesiz homojen luffa numunesinin $\alpha$ ses yutma katsayıları ve TL iletim kaybı seviyeleri (kalınlık: 10 mm, numune yoğunluğu: 73.6 kg/m <sup>3</sup> ) ...	18
Şekil 4.3. Nominal olarak özdeş üç adet hibrit JLJ numunesinin $\alpha$ ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (kalınlık: 10 mm, JLJ'nin yoğunluğu: 187.4 kg/m <sup>3</sup> ) .....	19

Şekil 4.4. Nominal olarak özdeş üç adet hibrit LJL numunesinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (kalınlık: 10 mm, LJL'nin yoğunluğu: 178.0 kg/m<sup>3</sup>) .....  
19

Şekil 4.5. Nominal olarak özdeş dört adet reçinesiz homojen luffa (Mısır) numunesinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (kalınlık: 10 mm, numune yoğunluğu: 79.3 kg/m<sup>3</sup>) .....  
20

Şekil 4.6. Farklı kalınlıktaki reçinesiz homojen jüt numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 419.8 kg/m<sup>3</sup>) .....  
21

Şekil 4.7. Farklı kalınlıktaki reçinesiz homojen luffa numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 73.6 kg/m<sup>3</sup>) .....  
21

Şekil 4.8. Farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit JLJ numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (JLJ'nin yoğunluğu: 187.4 kg/m<sup>3</sup>) .....  
22

Şekil 4.9. Farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit LJL numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (LJL'nin yoğunluğu: 178.0 kg/m<sup>3</sup>) .....  
22

Şekil 4.10. Farklı frekans aralıklar için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz homojen jüt numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 419.8 kg/m<sup>3</sup>) .....  
23

Şekil 4.11. Farklı frekans aralıklar için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz homojen luffa numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 73.6 kg/m<sup>3</sup>) .....  
24

Şekil 4.12. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz homojen jüt numunelerinin ortalama  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 419.8 kg/m<sup>3</sup>) .....  
25

Şekil 4.13. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz homojen luffa numunelerinin ortalama  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve

TL ses iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 73.6 kg/m<sup>3</sup>)  
..... 25

Şekil 4.14. Farklı frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit JLJ (a ve b) ve LJJ (c ve d) numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (JLJ'nin yoğunluğu: 187.4 kg/m<sup>3</sup>, LJJ'nin yoğunluğu: 178.0 kg/m<sup>3</sup>) ..... 26

Şekil 4.15. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit JLJ numunelerinin ortalama  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (JLJ'nin yoğunluğu: 187.4 kg/m<sup>3</sup>)  
..... 27

Şekil 4.16. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit LJJ numunelerinin ortalama  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (LJJ'nin yoğunluğu: 178.0 kg/m<sup>3</sup>)  
..... 27

Şekil 4.17. Reçinesiz homojen ve hibrit jüt ve luffa numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kayıp düzeyleri (kalınlık: 10 mm, jüt numunesinin yoğunluğu = 419.8 kg/m<sup>3</sup>, luffa numunesinin yoğunluğu = 73.6 kg/m<sup>3</sup>, JLJ'nin yoğunluğu = 187.4 kg/m<sup>3</sup>, LJJ'nin yoğunluğu = 178.0 kg/m<sup>3</sup>) .....  
28

Şekil 4.18. Reçinesiz homojen ve hibrit jüt ve luffa numunelerinin 20 mm (a ve b) ve 30 mm (c ve d) kalınlıkları için  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kayıp düzeyleri (jüt numunesinin yoğunluğu = 419.8 kg/m<sup>3</sup>, luffa numunesinin yoğunluğu = 73.6 kg/m<sup>3</sup>, JLJ'nin yoğunluğu = 187.4 kg/m<sup>3</sup>, LJJ'nin yoğunluğu = 178.0 kg/m<sup>3</sup>)  
..... 29

Şekil 4.19. Üretilen reçineli örnek numuneler: jüt (a), luffa (b) ve jüte-luffa-jüt veya JLJ (c) ...  
30

Şekil 4.20. Farklı kalınlıklara sahip reçineli jüt kompozit numunelerinin ses yutma katsayıları (sol) ve ses iletim kaybı seviyeleri (sağ) (numune yoğunluğu: 997.6 kg/m<sup>3</sup>, lif/epoksi oranı: 0.6)  
..... 30

Şekil 4.21. Farklı kalınlıklara sahip reçineli luffa kompozit numunelerinin ses yutma katsayıları (sol) ve ses iletim kaybı seviyeleri (sağ) (numune yoğunluğu: 829.9 kg/m<sup>3</sup>,





lif/epoksi oranı: 0.45)  
..... 31

Şekil 4.22. Farklı kalınlıklara sahip reçineli jüt kompozit numunelerinin düşük, orta ve yüksek frekans aralıkları için ses yutma katsayıları (sol) ve ses iletim kaybı seviyeleri (sağ) (numune yoğunluğu: 997.6 kg/m<sup>3</sup>, lif/epoksi oranı: 0.6) .....  
31

Şekil 4.23. Farklı kalınlıklara sahip reçineli luffa kompozit numunelerinin düşük, orta ve yüksek frekans aralıkları için ses yutma katsayıları (sol) ve ses iletim kaybı seviyeleri (sağ) (numune yoğunluğu: 829.9 kg/m<sup>3</sup>, lif/epoksi oranı: 0.45) .....  
32

Şekil 4.24. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçineli homojen jüt kompozit numunelerinin ortalama ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 997.6 kg/m<sup>3</sup>, lif/epoksi oranı: 0.6) .....  
33

Şekil 4.25. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçineli homojen luffa kompozit numunelerinin ortalama ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 829.9 kg/m<sup>3</sup>, lif/epoksi oranı: 0.45) .....  
33

Şekil 4.26. Farklı lif/epoksi oranlarına sahip homojen jute kompozit numunelerinin ses yutma katsayıları (sol) ve iletim kaybı seviyeleri (sağ) .....  
34

Şekil 4.27. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı lif/epoksi oranlarına sahip jüt kompozit numunelerinin ortalama ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri .....  
35

Şekil 4.28. Farklı lif/epoksi oranlarına sahip homojen luffa kompozit numunelerinin ses yutma katsayıları (sol) ve iletim kaybı seviyeleri (sağ) .....  
36

Şekil 4.29. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı lif/epoksi oranlarına sahip luffa kompozit numunelerinin ortalama ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri .....  
36

Şekil 4.30. Reçineli jüt, luffa ve hibrit jüt-luffa-jüt numunelerinin yutma katsayıları (sol) ve iletim kaybı seviyeleri (sağ)

..... 37

Şekil 4.31. Nominal olarak özdeş üç adet reçineli jüt kompozit numunesinin (fiber/epoksi oranı: 0.6, numune yoğunluğu: 997.6 kg/m<sup>3</sup>, kalınlık: 10 mm) ses yutma katsayıları (sol) ve iletim kaybı seviyeleri (sağ)

..... 38

Şekil 4.32. Nominal olarak özdeş üç adet jüt kompozit numunesinin (fiber/epoksi oranı: 0.5, numune yoğunluğu: 1019.8 kg/m<sup>3</sup>, kalınlık: 13 mm) ses yutma katsayıları (sol) ve iletim kaybı seviyeleri (sağ)

..... 38

Şekil 4.33. (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm kalınlıktaki jüt numuneleri için deneysel ve Delany-Bazley (DB) ve Johnson-Champoux-Allard (JCA) modelleri kullanılarak tahmin edilen ses yutma katsayıları

..... 40

Şekil 4.34. (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm kalınlıktaki luffa numuneleri için deneysel ve Delany-Bazley (DB) ve Johnson-Champoux-Allard (JCA) modelleri kullanılarak tahmin edilen ses yutma katsayıları

..... 40

Şekil 4.35. (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 mm kalınlıktaki jüt numuneleri için deneysel ve teorik olarak tahmin edilen ses iletim kayıpları

..... 41

Şekil 4.36. (a) 10, (b) 12.5 ve (c) 15 mm kalınlıktaki luffa lifi takviyeli kompozit numuneleri için deneysel ve teorik olarak tahmin edilen ses iletim kayıpları

..... 41

Şekil 4.37. Homojen kompozit bir jüt plaka (burada J2) üzerinde ölçülen örnek (a) akustik ve (b) yapısal FTF'ler

Şekil 4.38. Homojen kompozit bir jüt plakanın (burada J2) birinci (a) ve ikinci (b) modları için daire-uydurma prosedürü

..... 43

Şekil 4.39. Kalınlığın bir fonksiyonu olarak homojen jüt (lif/epoksi oranı: 0.50) ve luffa (lif/epoksi oranı: 0.6) numunelerinin ortalama kayıp faktörleri

..... 45

- Şekil 4.40. Lif/epoksi oranına bağlı homojen jüt plakaların ortalama kayıp faktörü değerleri ve ölçülen verilere uydurulan eğri .....  
46
- Şekil 4.41. Lif/epoksi oranına bağlı homojen luffa plakaların ortalama kayıp faktörü değerleri ve ölçülen verilere uydurulan eğri .....  
46
- Şekil 4.42. Homojen jüt (lif/epoksi oranı: 0.5) ve luffa (lif/epoksi oranı: 0.6) numunelerinin iki farklı kalınlıkta plakalar kullanılarak belirlenen elastisite modülleri (plakaların izotropik olduğu varsayılmıştır) ..... 47
- Şekil 4.43. Lif/epoksi oranına bağlı homojen jüt plakaların elastisite modülleri ve ölçülen verilere uydurulan eğri (plakaların izotropik olduğu varsayılmıştır) .....  
48
- Şekil 4.44. Lif/epoksi oranına bağlı homojen luffa kompozit plakaların elastisite modülleri ve ölçülen verilere uydurulan eğri (plakaların izotropik olduğu varsayılmıştır) .....  
48
- Şekil 4.45. Homojen jüt ve luffa kompozit plakalarının (izotropik varsayıma dayalı olarak Tablo 4.3'te bulunan malzeme özelliklerinin kullanımıyla sonu elemanlar modeli ile belirlenen) teorik ve deneysel doğal frekansları arasındaki farklar ..... 50
- Şekil 4.46. Hibrit JLJ ve LJL plakalarının (Tablo 4.3'te belirlenen malzeme özellikleri kullanılarak sonu eleman modeli ile tahmin edilen) teorik ve deneysel doğal frekansları arasındaki farklar .....  
50
- Şekil 4.47. Homojen jüt ve luffa kompozit plakalarının (Tablo 4.4'te belirlenen yöne bağlı elastik malzeme özellikleri kullanarak sonlu eleman modeli ile tahmin edilen) teorik ve deneysel doğal frekansları arasındaki farklar ..... 51
- Şekil 4.48. Hibrit JLJ ve LJL plakalarının (Tablo 4.4'te belirlenen yöne bağlı elastik malzeme özellikleri kullanarak sonlu eleman modeli ile tahmin edilen) teorik ve deneysel doğal frekansları arasındaki farklar .....  
52

## Özet

Bu proje kapsamında, jüt lifleri ve çeşitli luffa (kabak) lifleri kullanılarak, farklı kalınlıklarda reçinesiz (hiçbir reçine kullanılmayan) homojen ve hibrit jüt ve luffa yapılar ve yine farklı kalınlıklarda ve farklı lif/reçine oranlarında reçineli homojen ve hibrit jüt ve luffa yapılar üretilerek, bu yapıların akustik ve mekanik özellikleri ile ilgili kapsamlı bir resmin ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu kapsamda kullanılan yöntemler/sonuçlar şu şekildedir: (i) Akustik testler için farklı kalınlıklarda hem reçinesiz hem de farklı lif/reçine oranlarına sahip reçineli homojen ve hibrit numuneler üretilmiştir. Empedans tüp yöntemi kullanılarak bu akustik numunelerin ses yutma ve ses iletim kaybı gibi akustik özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Homojen ve hibrit kompozit yapıların akustik performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçta, kalınlık ve lif/reçine oranının bu yapıların akustik özellikleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. (ii) Farklı frekans aralıkları için kalınlığın ve lif/reçine oranının bir fonksiyonu olarak ölçülen akustik verilere eğriler uydurularak, malzemelerin akustik özelliklerini belirlemeye yönelik eğriler veya basit ampirik modeller ortaya konulmuştur. Dahası, bazı numunelerin ses yutma katsayıları Delany-Bazley ve Johnson-Champoux-Allard gibi teorik modeller kullanılarak tahmin edilmiş ve sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde, bazı numunelerin ses iletim kayıpları teorik olarak hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçta, bu yapıların tasarımında akustik amaçla kullanılacak ampirik ve teorik modeller ortaya konulmuştur. (iii) Titreşim testleri için farklı kalınlık ve lif/reçine oranlarına sahip reçineli homojen ve hibrit numuneler üretilmiş, üretilen bu yapılar üzerinde akustik ve yapısal frekans tepki fonksiyonları ölçülmüş ve aynı yapıların teorik modellerinden yararlanılarak malzemelerin elastik ve sönüm gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Homojen jüt ve luffa kompozit yapıları hem izotropik varsayılarak hem de bu yapıların yöne bağlı elastik özelliklerinin olması durumu dikkate alınarak modellenmişlerdir. Sonuçta, kalınlık ve lif/reçine oranının jüt ve luffa kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerindeki



etkisi ortaya konulmuş ve pratikte bu yapıların tasarımı için kullanılabilir bazı yaklaşımlar ortaya konulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Biyomalzeme; biyokompozit; ses yutma katsayısı; ses iletim kaybı; sönüm; elastisite modülü.



## Abstract

In this project, it was aimed to thoroughly investigate the effects of sample thickness and fiber/resin ratio on the acoustic performances of natural fiber-based structures. The methods/results are as follows: (i) For acoustic tests, homogeneous and hybrid jute and luffa samples with different thicknesses and fiber/resin ratios were produced. The acoustic properties of these acoustic samples such as sound absorption and transmission loss were determined experimentally using the impedance tube method. Acoustic performances of the homogeneous and hybrid composite structures were compared. As a result, the effects of sample thickness and fiber/resin ratio on the acoustic properties of these samples were revealed. (ii) Simple empirical models for determining the acoustic properties of materials were presented by fitting curves to the acoustic data measured as a function of thickness and fiber/resin ratio for different frequency ranges. Moreover, the sound absorption coefficients of some jute and luffa samples were estimated using theoretical models such as Delany-Bazley and Johnson-Champoux-Allard and the results were compared with experimental results. Similarly, the sound transmission losses of some samples were calculated theoretically and compared with the experimental results. As a result, empirical and theoretical models that can be used for acoustic purposes in the design of these structures were presented. (iii) For vibration tests, homogeneous and hybrid samples with different thicknesses and fiber/resin ratios were produced, acoustic and structural frequency response functions were measured using these structures, and their mechanical properties such as damping and Young's moduli of the materials were determined by using theoretical models of the same structures. The homogeneous jute and luffa composite structures were modeled both by assuming them isotropic and considering the directional elastic properties of these structures. As a result, the effects of thickness and fiber/resin ratio on the mechanical properties of jute and luffa samples were revealed and some approaches that can be used for the design of these structures in practice were presented.

**Keywords:** Biomaterial; biocomposites; sound absorption coefficient; sound transmission loss; damping; Young's modulus.



## 1. GİRİŞ

Çeşitli liflerle güçlendirilmiş kompozit yapılar, havacılık, otomotiv, denizcilik, spor, biyomedikal ve inşaat gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır (Chung, 1994). Tercih edilen mekanik özelliklerinden dolayı bu alanlarda cam ve karbon gibi sentetik lif malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır (Fu vd., 2000; Sgriccia vd., 2008). Kimyasal bazlı malzemeler yerine doğal liflerin kullanılması çeşitli avantajlar sunmaktadır. Örneğin, biyolifler kullanılarak üretilen kompozitlerin sentetik ikamelerine karşı akustik ve mekanik özellikler, üretim kolaylığı ve geri dönüşüm açısından üstünlük sağlayabileceği bilinmektedir (Alves vd., 2010; Drzal vd., 2001; Joshi vd., 2004). Cam lif takviyeli kompozitlerin doğal lif takviyeli kompozitlerle değiştirdiğinde, otomobil parçalarının üretimi için enerji ihtiyacının %80 azaldığı ve bu malzemelerin kullanımının nihai ürünün kütlesini önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir (Drzal vd., 2001). Ayrıca bu doğal malzemeler, ticari olarak kullanılan alternatiflerine kıyasla daha az miktarda sera gazı yaymaktadır (Joshi vd., 2004). Biyolif esaslı kompozitlerin kullanımını teşvik etmek için, bu malzemelerin petrol esaslı liflere kıyasla ümit verici akustik ve mekanik özelliklere sahip olabileceğini göstermek için bu malzemelerin özelliklerinin tam olarak ortaya konulması gerekmektedir. Ses yutumu ve iletim kaybı, malzemelerin iki önemli akustik özelliğidir ve empedans tüp yöntemi (Jung, 2008; Koruk, 2014a; ASTM E2611-17, 2017) kullanılarak belirlenebilirler. Malzemelerin ses yutma ya da yutum katsayılarını (Allard ve Champoux, 1992; Hosseini Fouladi vd., 2011) ve iletim kaybı seviyelerini (Prascevic vd., 2012; Tadeu ve Mateus, 2011; Wang vd., 2011) tahmin etmek için bazı teorik modeller de literatürde vardır. Elastisite modülü ve sönüm malzemelerin iki önemli mekanik özelliğidir ve deneysel modal analiz yöntemi gibi çeşitli yöntemler kullanılarak belirlenebilirler (Koruk ve Genc, 2018; Ramesh vd., 2013).

Jüt lifi doğal lifler arasında dünya çapında en çok üretilen elyafıdır (Perumal, 2018). Luffa (kabak) lifi son yıllarda mühendisler ve araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmüştür (Koruk ve Genc, 2018). Cam ve jüt kullanılarak elde edilen kompozitlerin mekanik özellikleri ile cam ve sisal kullanılarak elde edilen kompozitlerin mekanik özellikleri karşılaştırıldığında, jüt tabanlı yapının daha iyi çekme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür (Ramesh vd., 2013). Ayrıca, jüt takviyeli kompozitler yüksek ses yutma katsayılarına ve ses iletim kayıp seviyelerine sahip olabilirler (Bansod vd., 2016). Bu nedenle, jüt birçok uygulamada ses yutucu olarak kullanılabilir. Luffa lifi, yüksek sönümü ve ses yutumu nedeniyle ses ve titreşim izolasyonu uygulamalarında kullanılabilir (Koruk ve Genc, 2015, 2018). Bununla birlikte, luffa lifi, jüt lifi gibi diğer bazı biyoliflere kıyasla yüksek çekme mukavemetine sahip değildir. Luffa lifi birkaç MPa gerilme mukavemeti değerine sahip iken, jüt lifi 100 MPa'dan daha yüksek bir gerilme mukavemeti değerine sahip olabilmektedir (Koruk ve Genc, 2018). Bu nedenle, bu iki malzemeyi pratik uygulamalarda etkin bir şekilde kullanmak için, bu iki lifin ve bunların hibrit

kompozitlerinin akustik ve mekanik özelliklerinin kapsamlı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

Jüt ve luffa malzemelerinin akustik ve mekanik özellikleri bazı çalışmalarda incelenmiştir (Bansod vd., 2016; Drzal vd., 2001; Fatima ve Mohanty, 2011; Genc ve Koruk, 2016, 2017; Koruk ve Genc, 2015, 2018; Raj vd., 2020; Tanobe vd., 2005). Fakat, çeşitli doğal lif bazlı yapıların akustik özellikleri üzerine yoğunluk, numune kalınlığı ve lif/reçine oranının etkilerini araştırmak için bazı çalışmalar (Kesharwani vd., 2020; Lim vd., 2018; Mat Tahir vd., 2018; Or vd., 2017; Sengupta vd., 2020; Suardana vd., 2020) yapılmasına rağmen, ***kalınlığın ve lif/reçine oranının luffa lifinin akustik özellikleri üzerindeki etkisi daha önce literatürde araştırılmamıştır. Reçinesiz ve reçineli jüt ve luffa liflerinin hibrit kompozitlerinin akustik özellikleri daha önce literatürde araştırılmamış ve luffa liflerinin ses yutma katsayıları da literatürdeki mevcut teorik modeller kullanılarak daha önce tahmin edilmemiştir. Farklı frekans aralıkları için jüt ve luffa lif tabanlı yapılarının ses yutma ve iletim kaybı gibi akustik özelliklerinin kalınlığa ve lif/reçine oranına bağlı eğilimlerinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Literatürde luffa lifi esaslı yapıların lif/reçine oranına bağlı elastik ve sönüm özellikleri incelenmemiştir. Jüt ve luffa lifi malzemelerinin elastik ve sönüm özelliklerinin de kalınlığa ve lif/reçine oranına bağlı eğilimlerinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bu proje kapsamında yapılan çalışmalar, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.*** Bu proje raporunun ana hatları aşağıda özetlenmiş olup, raporun sonunda doğal liflerin güncel uygulamaları ve potansiyel kullanım alanları kısaca tartışılmış ve genel bir değerlendirme yapılmıştır.

1) Farklı kalınlıklarda jüt ve luffa (kabak) liflerinin reçinesiz (reçine kullanılmayan) homojen ve hibrit numuneleri ve farklı jüt/epoksi ve luffa/epoksi oranlarına ve farklı kalınlıklara sahip reçineli kompozit yapılar üretilmiştir. a) Üretilen numunelerin akustik özellikleri empedans tüp yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. b) Liflerin değişkenliği ve üretim sürecinin tekrarlanabilirliği ve bitkilerin yetiştiği bölgenin akustik özellikler üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. c) Numune kalınlığının homojen ve hibrit numunelerin akustik performansları üzerindeki etkisi frekansın bir fonksiyonu olarak ortaya konmuştur. d) Düşük (100-500 Hz), orta (500-2000 Hz) ve yüksek (2000-5000 Hz veya 2000-6300 Hz) frekans aralıkları için homojen ve hibrit numunelerin ses yutma ve iletim kaybı değerlerinin kalınlığa bağlı eğilimleri araştırılmıştır. e) Homojen ve hibrit numunelerinin akustik performansları karşılaştırılmıştır. f) Lif/epoksi oranının akustik özellikler üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

2) Farklı frekans aralıkları için kalınlığın bir fonksiyonu olarak belirlenen akustik özelliklere eğriler uydurularak, malzemelerin akustik özelliklerini belirlemeye yönelik basit ampirik modeller ortaya konulmuştur. Bazı jüt ve luffa numunelerinin ses yutma katsayıları Delany-Bazley ve Johnson-Champoux-Allard modelleri kullanılarak tahmin edilmiş ve

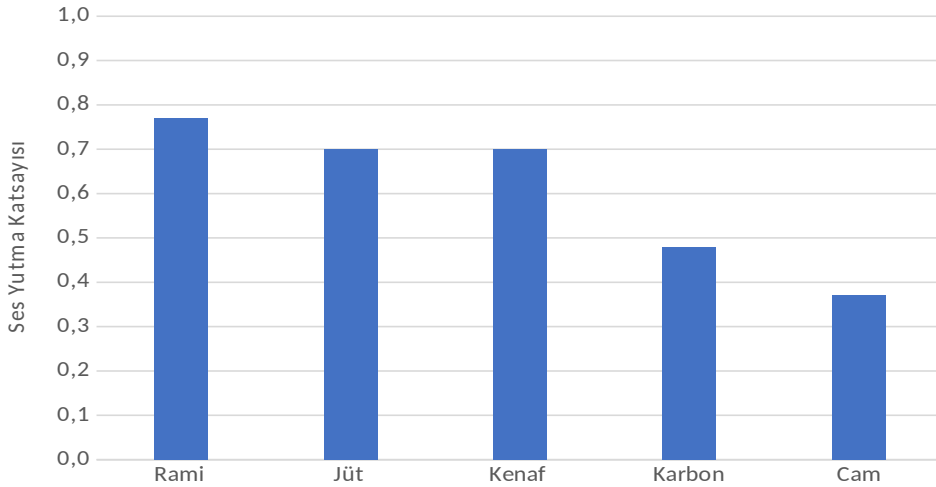


sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde, bazı numunelerin ses iletim kayıpları teorik olarak hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

3) Farklı kalınlıklarda ve lif/epoksi oranlarında homojen ve hibrit jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit plakalar üretilmiştir. Üretilen plakalar üzerinde akustik ve yapısal frekans tepki fonksiyonları ölçülerek ve aynı numunelerin teorik modellerinden yararlanılarak malzemelerin elastik ve sönüm gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Homojen jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit yapılar hem izotropik varsayılarak hem de bu yapıların yöne bağlı elastik özelliklerinin olması durumu dikkate alınarak modellenmişlerdir. Homojen plakalar kullanılarak belirlenen elastik özellikler, hibrit kompozit plakaların teorik modellerinde kullanılarak modal analizleri gerçekleştirilmiş ve teorik modal analiz ile belirlenen doğal frekanslar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak belirlenen mekanik özellikler doğrulanmıştır. Kalınlığın ve lif/epoksi oranının jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.

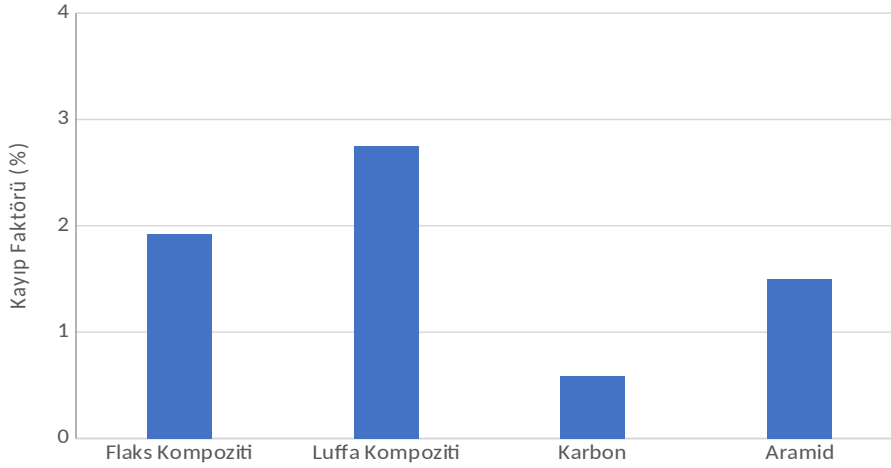
## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Doğal liflerle güçlendirilmiş kompozitler sentetik malzemelere kıyasla daha doğa dostudur ve düşük maliyetlidir (Alves vd., 2010; Drzal vd., 2001; Joshi vd., 2004). Pek çok doğal lif arasında, jüt lifi dünya çapında en çok üretilen elyafıdır (Perumal, 2018). Jüt üstün mekanik özelliklere ve yüksek ses yutma katsayılarına ve iletim kayıp seviyelerine sahiptir (Bansod vd., 2016; Ramesh vd., 2013). Şekil 2.1'de jüt ve kenaf gibi çeşitli doğal liflerin ve karbon ve cam gibi klasik malzemelerin 500-2000 Hz arasındaki ses yutma katsayıları karşılaştırılmıştır (Berardi ve Iannace, 2015; Yang ve Li, 2012). Görüldüğü gibi, başta jüt olmak üzere doğal liflerin ses yutma katsayıları oldukça yüksektir.



Şekil 2.1 Jüt ve kenaf gibi çeşitli doğal liflerin ve karbon ve cam gibi klasik malzemelerin 500-2000 Hz arasındaki ses yutma katsayıları (kalınlık: 40 mm)

Mısır ve Türkiye'nin Akdeniz bölgesi de dahil olmak üzere dünyanın birçok yerinde yetişen bir diğer doğal malzeme olan luffa (kabak lifi) son yıllarda mühendisler ve araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmüştür (Koruk ve Genc, 2018). Luffa lifi yüksek sönüm ve ses yutma katsayılarına sahiptir (Koruk ve Genc, 2015, 2018). Şekil 2.2'de lif/reçine oranları 0.5 civarında olan flaks ve luffa esaslı biyokompozitlerin ve karbon ve aramid malzemelerinin kayıp faktörleri (sönümleri) karşılaştırılmıştır (Koruk ve Genc, 2015, 2018; Le Guen vd., 2014; Rajesh vd., 2018). Görüldüğü gibi luffa takviyeli kompozitin sönümü oldukça yüksektir. Sonuçta, jüt ve luffa malzemelerinin pratik uygulamalarda etkin bir şekilde kullanmak için, bu iki elyafın farklı lif/reçine oranlarına ve kalınlıklara sahip kompozitlerinin akustik ve mekanik özelliklerinin araştırılması gerekmektedir.



Şekil 2.2. Lif/reçine oranları 0.5 civarında olan flaks ve luffa lif (kabak lifi) takviyeli biyokompozitlerin ve karbon ve aramid malzemelerinin kayıp faktörleri

Jüt ve luffa liflerinin reçinesiz numunelerinin veya reçine kullanılan kompozit yapılarının ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri deneysel olarak bazı çalışmalarda belirlenmiştir (Bansod vd., 2016; Drzal vd., 2001; Fatima ve Mohanty, 2011; Genc ve Koruk, 2016, 2017; Koruk ve Genc, 2015, 2018; Raj vd., 2020; Tanobe vd., 2005). Jüt dahil, gözenekli doğal liflerin, akustik özelliklerinin ölçümünü kapsayan deneysel bir çalışmada, bu doğal liflerin düşük ve orta frekanslarda tercih edilebilir ses yutma özellikleri gösterdiği, kalınlık artışı durumunda ise düşük frekanslarda daha yüksek iletim kaybı seviyelerinin gözlemlendiği bulunmuş ve jüt lifinin doğal kenaf lifinden sonra en iyi akustik yutum özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir (Kesharwani vd., 2020). Çeşitli doğal lif bazlı yapıların akustik özellikleri üzerine yoğunluk, numune kalınlığı ve lif/reçine oranının etkilerini araştırmak için bazı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Sengupta vd. (2020), lif kalınlığının ve yoğunluğunun ses yutum ve iletim kaybını etkilediğini belirlemiştir. Suardana vd. (2020), lif/reçine oranı ve panel

kalınlığının Hindistan cevizi liflerinin akustik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Mat Tahir vd. (2018), yoğunluk ve kalınlığın kapok doğal lifinin akustik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemiştir. Or vd. (2017), kalınlık ve yoğunluğun yağ palmyesi liflerinin ses yutma katsayıları üzerindeki etkisini belirlemiştir. Lim vd. (2018) yakın zamanda kalınlığın kenaf liflerinin ses yutumu üzerindeki etkisini araştırmıştır. Numune kalınlığı ve lif/reçine oranının luffa lif takviyeli yapıların akustik özellikleri üzerindeki etkilerinin daha önce literatürde araştırılmadığı görülmektedir. Dahası, reçinesiz ve reçineli jüt ve luffa liflerinin hibrit kompozitlerinin akustik özellikleri de daha önce literatürde araştırılmamış ve luffa liflerinin ses yutma katsayıları da literatürdeki mevcut teorik modeller (Delany ve Bazley, 1970; Dunn ve Davern, 1986; Johnson vd., 1987; Kino, 2015; Kino ve Ueno, 2008; Miki, 1990) kullanılarak daha önce tahmin edilmemiştir. Farklı frekans aralıkları için jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit yapıların ses yutma ve iletim kaybı gibi akustik özelliklerinin kalınlığa ve lif/reçine oranına bağlı eğilimlerine literatürde rastlanmamıştır. Bu proje kapsamında yapılan akustik çalışmalar, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Bugün uygulamalarını geliştirmek için biyomalzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesine büyük ilgi vardır. Literatürde keten, kenaf ve luffa lifi gibi birçok biyomalzemenin mekanik özellikleri çalışılmıştır (Arulmurugan, 2019; Koruk ve Genc, 2018). Daha önce de belirtildiği gibi, bu biyolifler arasında jüt malzemesi üstün mekanik özellikleri nedeniyle öne çıkmaktadır ve literatürde bu malzemenin özelliklerini inceleyen bazı deneysel ve teorik çalışmalar bulunmaktadır (Alves vd., 2010; Liu vd., 2009). Potansiyel olarak gelecek vaat eden diğer bir kompozit malzeme ise, daha önce de belirtildiği gibi, iç yapısı sayesinde kompozit yapıya önemli bir sönüm özelliği ekleyen luffa lifidir (Koruk ve Genc, 2018; Papanicolaou vd., 2015; Saw vd., 2017). Luffa lifi takviyeli kompozitler ortalama elastik özelliklere sahip olsalar bile, düşük yoğunlukları ve yüksek sönüm kabiliyetleri nedeniyle, hafif ve sönümlenme potansiyeli yüksek kompozit yapılar elde etmek için kullanılabilirler. Literatürde luffa lifi takviyeli kompozit yapıların lif/reçine oranına bağlı elastik ve sönüm özelliklerinin incelenmediği görülmüştür. Jüt ve luffa lifi malzemelerinin elastik ve sönüm özelliklerinin kalınlığa ve lif/reçine oranına bağlı eğilimlerinin belirlenmesine de ihtiyaç vardır. Bu proje kapsamında bu konuda yapılan çalışmalar, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Ses yutumu ve iletim kaybı gibi akustik özellikleri belirlemek için literatürde empedans tüp yöntemi (Jung, 2008; Koruk, 2014a; ASTM E2611-17, 2017) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ses yutma katsayılarını belirlemek için kullanılan empedans tüpünde gelen ve yansıyan ses basıncı sinyallerini ölçmek için iki mikrofon kullanılır (Koruk, 2014a). Öte yandan, basınç ve partikül hızını ölçmek için dört mikrofonlu empedans tüpü kullanılır ve bunlarla ölçülen veriler transfer fonksiyonunu ve ardından iletim kaybı seviyelerini belirlemek

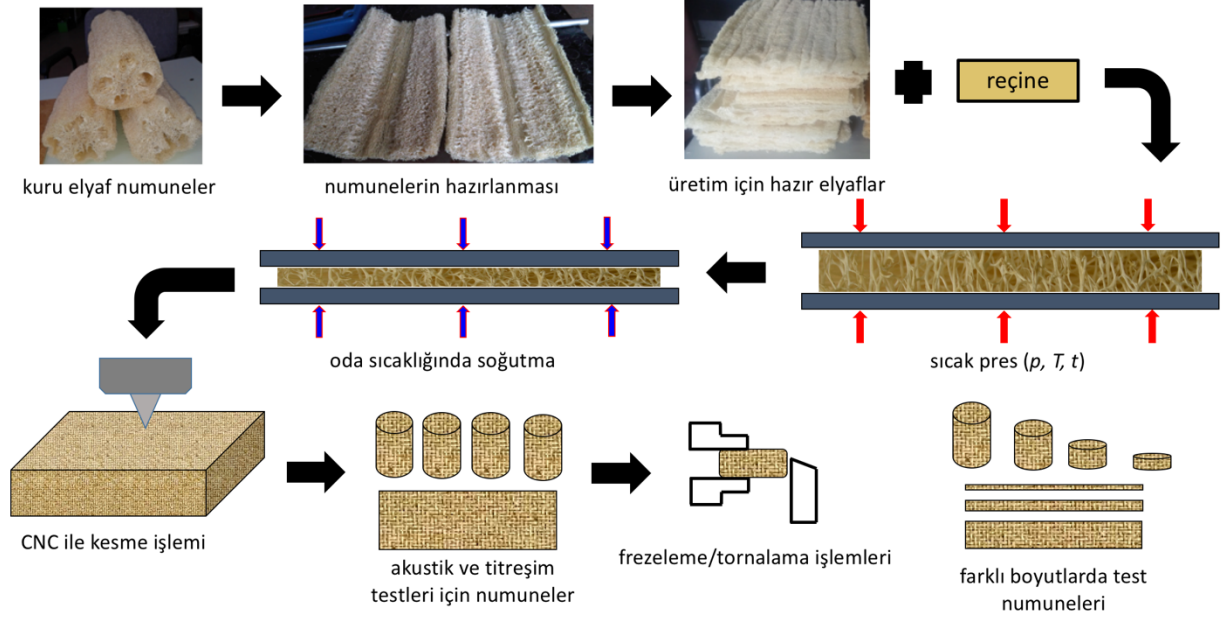
için kullanılırlar (Jung, 2008; ASTM E2611-17, 2017). Olası her tasarımın üretilmesi ve test edilmesi imkansız veya pahalı olduğundan, farklı tasarımları simüle etmek için güvenilir modeller geliştirmek son derece önemlidir. Bu nedenle, deneysel yöntemlere ek olarak, malzemelerin ses yutumu özelliklerini (Allard ve Champoux, 1992; Hosseini Fouladi vd., 2011) ve iletim kaybı seviyelerini (Prascevic vd., 2012; Tadeu ve Mateus, 2011; Wang vd., 2011) tahmin etmek için literatürde bazı teorik modeller de vardır. Elastisite modülü ve sönüm malzemelerin iki önemli mekanik özelliği olup deneysel modal analiz yöntemi gibi çeşitli yöntemler kullanılarak belirlenebilirler (Koruk ve Genc, 2018; Perumal, 2018; Ramesh vd., 2013). Ancak, literatürde, bazı biyomalzemelerin modal sönüm gibi dinamik mekanik özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde araştırılmadığı görülmüştür. Literatürde genelde biyomalzemelerin gerilme mukavemeti gibi statik mekanik özellikleri üzerine birçok çalışmanın gerçekleştirildiği görülmüştür.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

#### 3.1 Numunelerin Üretilmesi

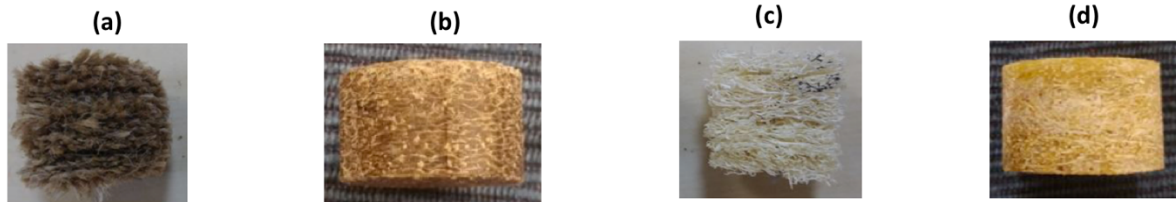
Bu proje kapsamında, takviye elemanı olarak dokuma tipi jüt lifi ve doğal luffa (kabak) lifi kullanılmıştır. Reçineli kompozit numunelerin üretiminde matris olarak ise epoksi reçinesi kullanılmıştır. Burada kullanılan jüt ve luffa liflerinin kaynağı sırasıyla Bangladeş ve Hatay/Türkiye'dir. Öte yandan, raporun ileriki kısımlarında detaylı olarak sonuçları verildiği gibi, çeşitli karşılaştırmalar yapmak ve değerlendirmelerde bulunmak için, Hatay'da yetişen luffa lifine ek olarak, Mısır'da yetişen luffa lifi de bazı numunelerin hazırlanmasında kullanılmıştır.

Numunelerin üretilmesi için, önce kuru lifler dikey olarak kesilmiştir. Daha sonra, lifler simetrik olarak düzenlenmiş ve epoksi ekleyebilmek için malzemeler kalıba yerleştirilmiştir. Kütleme işlemi için kalıp hidrolik pres altında  $p = 5$  Bar ve  $T = 120$  °C sıcaklıkta  $t = 2$  saat boyunca bekletilmiştir. Kütleme işleminden sonra kalıp ve dolayısıyla içindeki kompozit oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Üretilen biyokompozit bir CNC yönlendirici makine kullanılarak kesilmiş ve akustik ve titreşim testleri için numuneler elde edilmiştir. Burada, çeşitli boyutlara numuneler elde etmek için frezele ve tornalama gibi işlemler de gerçekleştirilmiştir. Biyokompozitlerin üretim süreci Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Biyokompozitlerin üretim süreci

Bu proje kapsamında hem reçine kullanılmayan reçinesiz hem de epoksinin kullanıldığı reçineli numuneler üretilmiştir. Şekil 3.2'de bu çalışma kapsamında akustik testler için üretilen örnek reçinesiz ve reçineli numuneler verilmiştir.



Şekil 3.2. Reçinenin kullanılmadığı örnek reçinesiz jüt (a) ve luffa (kabak lifi) (c) ve epoksinin kullanıldığı reçineli jüt (b) ve luffa (d) numuneler

Proje kapsamında hem homojen hem de hibrit numuneler üretilmiştir. Homojen jüt ve luffa lif numuneleri (Şekil 3.3a ve b) yalnızca bir tür doğal lif malzemesi (yani jüt veya luffa) içerirken, hibrit numunelerde üç katman vardır (Şekil 3.3c ve d). Görüldüğü gibi, hibrit numuneler farklı sıralarda luffa ve jüt liflerinin katmanlarını içermektedir. Bu çalışmada kullanılan hibrit numunelerin ilk türü, iki ince jüt tabakası ve kalın bir luffa çekirdek tabakasına sahiptir ve jüt-luffa-jüt veya JLJ olarak adlandırılır (Şekil 3.3c). Diğer hibrit numune türü ise, iki ince luffa tabakasına ve kalın bir çekirdek jüt tabakasına sahiptir ve luffa-jüt-luffa veya LJL olarak adlandırılır (Şekil 3.3d).

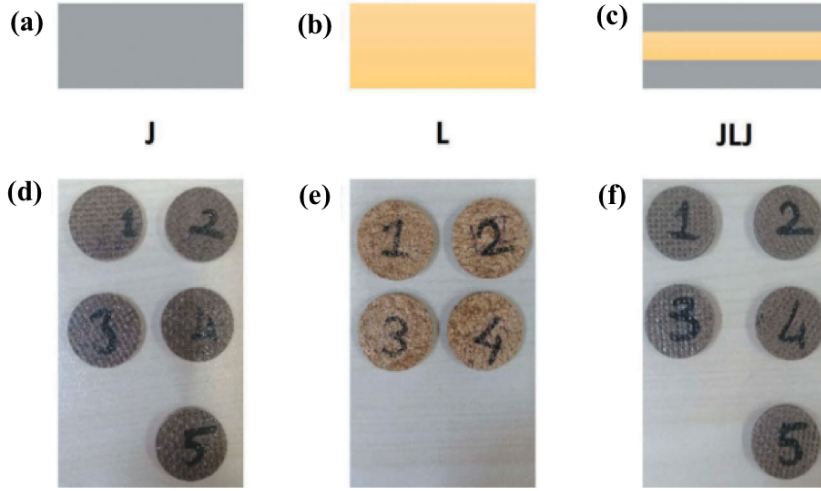


Şekil 3.3. Test numunelerinin tasarımları: homojen (a) jüt ve (b) luffa numuneler ve bunların hibrit (c) jüt-luffa-jüt (JLJ) ve (d) luffa-jüt-luffa (LJL) kompozitleri

## 3.2 Akustik Özelliklerin Belirlenmesi

### 3.2.1 Akustik Test Numuneleri

Akustik testler için, hem reçinesiz hem de farklı lif/reçine oranlarına sahip reçineli numuneler üretilmiştir. Hem homojen hem de hibrit jüt ve luffa (kabak lifi) numuneler üretilmiştir. Burada akustik testler için üretilen numuneler silindirik olup, çapları empedans tüpünün iç çapına (29 mm) eşittir. Kalınlığın akustik özellikler üzerindeki etkisini araştırmak için farklı kalınlıklarda numuneler üretilmiştir. Başlangıçta 10 mm kalınlığında numuneler üretilmiştir. Burada her 10 mm kalınlığındaki hibrit numunedeki toplam jüt (veya luffa) kalınlığı, hibrit numunenin toplam kalınlığının yaklaşık yarısına eşittir. Reçinesiz numunelerin yumuşak yapısı sayesinde, aynı türden 10 mm lif numuneleri birbirine dikilerek 20, 30 ve 40 mm kalınlıktaki numuneler elde edilmiştir. Fakat, bu yöntem nispeten rijit olan reçineli kompozit numunelere uygulanamaz. Bu nedenle, reçineli kompozit numuneler farklı kalınlık değerleri için ayrı ayrı üretilmiştir. Lif/epoksi oranının akustik özellikler üzerindeki etkisini araştırmak için, lif/epoksi oranı 1.0 (veya 100%) olan reçinesiz numunelerin dışında farklı lif/epoksi oranına sahip jüt (0.5 ve 0.6) ve luffa (0.60 ve 0.70) numuneler üretilmiştir. Burada, aynı üretim parametrelerinin jüt ve luffa numuneleri için farklı lif/epoksi oranları oluşturduğu belirtilmelidir. Gürültü ve istenmeyen etkilerden kurtulabilmek için 2 veya daha fazla (genelde 3-5) eşdeğer numune için akustik testler gerçekleştirilmiş ve ortalama sonuçları kullanılmıştır. Şekil 3.4'te akustik testler için üretilen 29 mm çapında örnek test numuneleri verilmiştir.



Şekil 3.4. Akustik testlerde kullanılan 29 mm çapında örnek homojen jüt (a ve d) ve luffa (b ve e) numuneler ve bunların hibrit jüt-luffa-jüt veya JLJ (c ve f) kompozitleri: numunelerin kesit alanları (a-c) üretilen test parçaları (d-f)

### 3.2.2 Akustik Özelliklerin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Empedans tüp yöntemine dayalı ses yutma katsayısı ve ses iletim kaybı ölçümleri için kullanılan deney düzeneklerinin şematik resimleri Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Bu parametrelerin ölçümleri aşağıda açıklanmıştır.

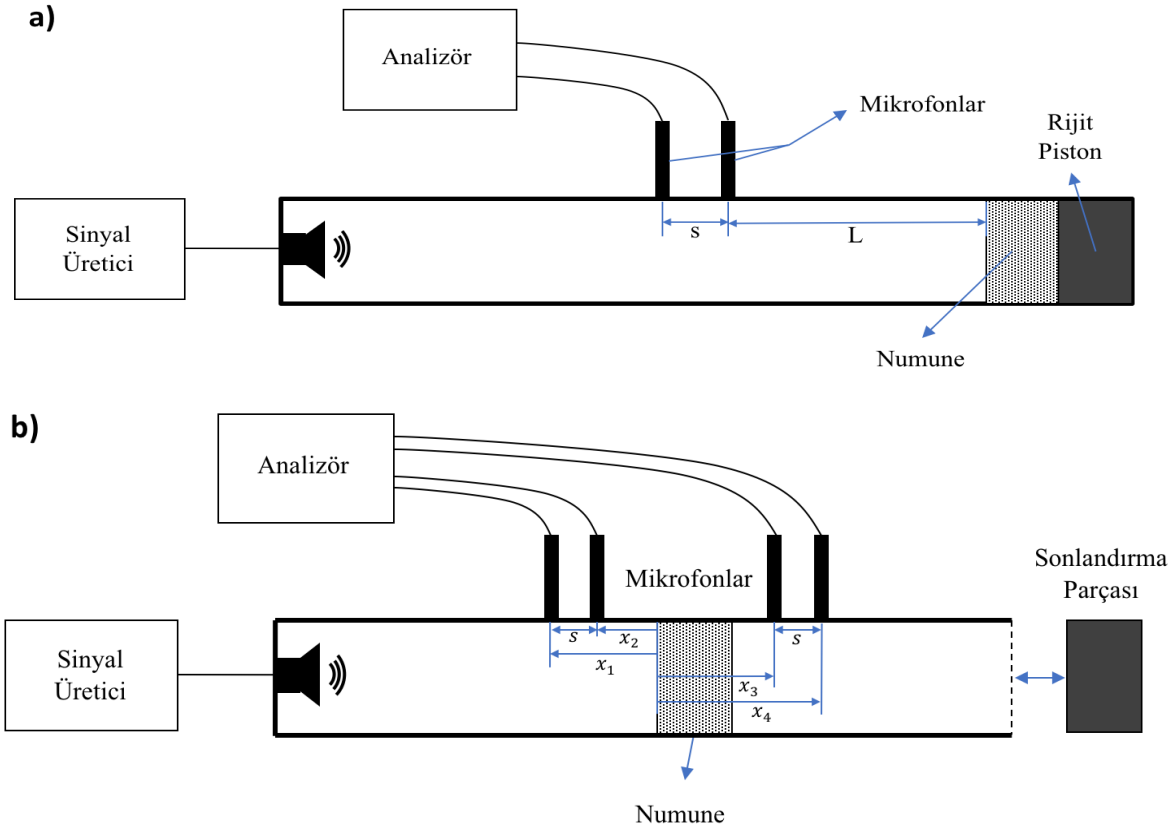
Ses yutma katsayısı ölçümlerinde gelen ve yansıyan ses dalgalarını ölçmek için iki mikrofon kullanılır. Numune, tüpün ucuna, sert bir silindirik pistonun yanına yerleştirilir (Koruk, 2014a). Ses yutma katsayıları, tüp boyutları ve kompleks değerli akustik transfer fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Şekil 3.5'a'da görüldüğü gibi, ses yutma katsayılarının hesaplanması için girdi parametreleri şunlardır: iki mikrofon arasındaki mesafe  $s$ , sağ mikrofon ile test numunesi arasındaki mesafe  $L$ , iki mikrofon ile ölçülen ses basınçları kullanılarak hesaplanan  $p_1$ 'den  $p_2$ 'ye hesaplanan kompleks değerli akustik transfer fonksiyonu  $H_{12}$  ve dalga numarası  $k = 2\pi f/c$  (burada  $c$  havadaki sesin hızı ve  $f$  frekanstır). Bu parametreler kullanılarak, karmaşık değerli normal yansımaya katsayısı şu şekilde hesaplanır (Koruk ve Genc, 2015):

$$\tilde{R}(f) = \frac{\tilde{H}_{12}(f) - e^{-jks}}{e^{jks} - \tilde{H}_{12}(f)} e^{2jk(s+L)}$$

(3.1)

Normal yansımaya katsayısı kullanılarak normal ses yutma katsayısı da şu şekilde hesaplanır:

$$\alpha(f) = 1 - |\tilde{R}(f)|^2 \quad (3.2)$$



Şekil 3.5. Empedans tüp yöntemine dayalı ses yutma katsayısı (a) ve ses iletim kaybı (b) ölçümleri için kullanılan deney düzeneklerinin şematik resimleri

Ses iletim kaybı ölçümleri için, ses yutma katsayısı ölçümleri için kullanılan düzeneğe benzer bir düzenek kullanılır, ancak iletilen ses sinyallerinin ve sonlandırmadan yansıyan ses sinyallerinin ses basıncını ölçmek için ek iki mikrofona ihtiyaç vardır (Jung, 2008; ASTM E2611-17, 2017). Bu ölçümler, gelen akustik enerjinin ne kadarının malzemedan geçtiğinin belirlenmesi için önemlidir. Ses kaynağı ile test numunesi arasına yerleştirilen ilk iki mikrofona, ses yutum ölçümüne benzer şekilde kullanılır. Ses iletim kaybı ölçümlerinde test numunesi ve sonlandırma arasına da iki mikrofona yerleştirilir. Şekil 3.5b'te görüldüğü gibi, normal ses iletim kaybının hesaplanması için girdi parametreleri: her bir mikrofona çifti arasındaki mesafe  $s$ , mikrofona ile ölçülen ses basınçları kullanılarak hesaplanan  $p_1$ 'den  $p_2$ 'ye ve  $p_3$ 'ten  $p_4$ 'e kompleks değerli akustik transfer fonksiyonları  $H_{12}$  ve  $H_{34}$ , numunenin ön ( $S_u$ ) ve arka ( $S_d$ ) yüzleri ile ilgili oto-spektrumları arasındaki oran  $H_t = \sqrt{|S_u/S_d|}$  ve dalga numarası  $k$ . Burada, her mikrofona konumu numunenin ön yüzü referans alınarak  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  ve  $x_4$  ile gösterilmiştir. Ses iletim kaybı seviyesi aşağıdaki ifade ile belirlenebilir:

$$TL = 20 \log \left| \frac{e^{jks} - H_{12}}{e^{jks} - H_{34}} \right| - 20 \log |H_t| \quad (3.3)$$



Burada akustik ölçümler standartlara göre yapılmıştır (Jung, 2008; ASTM E1050-12, 2012; ASTM E2611-17, 2017; ISO 10534-2, 2011). Empedans tüpü kullanarak malzemelerin ses yutma katsayılarının belirlenmesi ISO 10534-2 (2011) ve ASTM E 1050-12 (2012) standartlarında açıklanmıştır. Malzemelerin iletim kaybı seviyelerinin ölçümü ise ASTM E2611-17 (2017) standardında açıklanmıştır. Ölçümlerde, Brüel&Kjaer 4206 (ses yutumu için) ve 4206T (ses iletim kaybı için) tip empedans tüpleri, Brüel&Kjaer 4187 tip mikrofonlar, Brüel&Kjaer 3560C tip analizör ve Brüel&Kjaer 276C tip güç yükselticisi kullanılmıştır.

### 3.2.3 Akustik Özelliklerin Tahmin Edilmesi

Mümkün olan her tasarımı üretmek ve test etmek imkansız veya pahalı olduğundan, farklı tasarımları simüle etmek için güvenilir modeller geliştirmeye ihtiyaç vardır. Bu proje kapsamında, gözenekli numunelerin ses yutma katsayılarını tahmin etmek için iki teorik model kullanılmıştır. Yöntemlerden biri, izotropik ve homojen gözenekli bir malzeme tabakasının akustik parametrelerinin tahmini için nispeten basit bir teknik olan Delany-Bazley modelidir (Hosseini Fouladi vd., 2011). Bu model, bire yakın gözenek değerine sahip ( $\phi \approx 1$ ) bir lifli malzeme katmanını eşdeğer bir akışkan katmanıyla değiştirmeye izin verir. Kompleks dalga sayısı  $k$  ve karakteristik empedans  $Z_c$ , bire yakın gözenek değerine sahip birçok lifli malzemede geniş bir frekans aralığı için ölçülmüştür (Delany ve Bazley, 1970; Miki, 1990). Bu ölçümlere göre,  $k$  ve  $Z_c$  ifadeleri esas olarak açılal frekansa  $\omega$  ve gözenekli ortamın akış direncine  $\sigma$  bağlıdır. Aşağıdaki ifadelerle  $k$  ve  $Z_c$ 'nin ölçülen değerleri ile iyi bir uyum elde edildiği görülmüştür (Hosseini Fouladi vd., 2011):

$$Z_c(\omega) = Z_0 \left\{ \left[ 1 + c_1 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{c_2} \right] - j c_3 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{c_4} \right\} \quad (3.4)$$

$$k(\omega) = k_0 \left\{ \left[ 1 + c_5 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{c_6} \right] - j c_7 \left( \frac{f}{\sigma} \right)^{c_8} \right\} \quad (3.5)$$

Burada  $f$  ve  $c_0$  sesin frekansı (Hz) ve hızını,  $\sigma$  akış direncini,  $c_1$ - $c_8$  Delany – Bazley regresyon sabitlerini ve  $\rho_0$ ,  $k_0 = 2\pi f/c_0$  ve  $Z_0 = \rho_0 c_0$ , sesin yoğunluğunu, dalga sayısını ve havanın empedansını göstermektedir.

Lif takviyeli yapıların geometrisi Delany-Bazley modelinde (Delany ve Bazley, 1970) ve değiştirilmiş versiyonlarında (Dunn ve Davern, 1986; Miki, 1990) hesaba katılmamıştır. Viskoz kuvvetlerin açıklamasında önemli bir gelişme, Johnson vd. (1987) tarafından gerçekleştirilmiştir. Allard ve Champoux (1992), yapıların geometrisinden, Delany-Bazley modelinin denklemlerinin geçerlilik aralığında benzer sonuçlar veren ve gözenekli malzemelerin farklı fiziksel özellikleriyle ilişkili akustik olayların fiziksel bir temsiline dayanan yeni denklemler elde ettiler. Johnson-Champoux-Allard modeli, katı yapının hareketsiz

kaldığı rijit çerçeveli bir modelidir (Allard ve Champoux, 1992). Bu model yapıların akustik özelliklerinin tahmini için burada kullanılan ikinci modeldir ve bu model (Hosseini Fouladi vd., 2011; Johnson vd., 1987; Kino, 2015; Kino ve Ueno, 2008) kaynaklarından detaylı olarak anlatılmıştır.

Ses iletim kaybı değerlerinin hesabı için, numunelerin kritik frekansının hesaplanması gerekmektedir. Kritik frekans şu ifade ile hesaplanabilir (Norton ve Karczub, 2003):

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_s}{B}} \quad (3.6)$$

Burada  $c$  ses hızını ve  $\rho_s$  yüzey yoğunluğunu göstermektedir. Eğilme rijitliği modülü  $B$  şu şekilde ifade edilmiştir:

$$B = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.7)$$

Burada  $E$  elastisite modülünü,  $t$  kalınlığı ve  $\nu$  Poisson oranını göstermektedir. Sonuçta rezonans bölgesi ile kritik frekans arasındaki ses iletim kaybı aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir (Norton ve Karczub, 2003):

$$TL = 10 \log \left\{ 1 + \left( \frac{\rho_s \pi f}{\rho_0 c} \right)^2 \right\} - 5dB \quad (3.8)$$

Burada  $f$  frekansı (Hz) göstermektedir.

### 3.3 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Biyomalzemelerin mekanik karakterizasyonu için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Çekme testi gibi klasik karakterizasyon yöntemlerinin yanı sıra, malzemelerin sönüm ve elastik özelliklerinin belirlenmesi için deneysel modal analiz yönteminden de yararlanılabilir. Bu çalışmada, kompozit plakaların mekanik özellikleri aşağıda detaylı açıklandığı gibi deneysel ve teorik modal analiz kullanılarak belirlenmiştir.

#### 3.3.1 Mekanik Test Numuneleri

Lif/reçine oranı ve kalınlığın mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmak için farklı lif/epoksi oranı ve kalınlıklarda test plakaları üretilmiştir. Üzerlerinde titreşim testlerinin gerçekleştirildiği bu 12 farklı test numunesinin isimleri, konfigürasyonları, lif/epoksi oranları, kalınlıkları, uzunlukları ve genişlikleri Tablo 3.1'de listelenmiştir. Tablo 3.1'de görüldüğü gibi jüt numuneleri 0.45 (plaka kalınlığı: 4 mm), 0.50 (plaka kalınlığı: 12.2, 14.5 ve 23 mm) ve 0.60 (plaka kalınlığı: 12.6 mm) lif/epoksi oranlarında üretilmişlerdir. Luffa (kabak lifi) numuneleri 0.55 (plaka kalınlığı: 4 mm), 0.60 (plaka kalınlığı: 12.8 ve 18.2 mm) ve 0.70 (plaka kalınlığı: 14.8 mm) lif/epoksi oranlarında üretilmişlerdir. Burada, aynı üretim

parametrelerinin jüt ve luffa numuneleri için farklı lif/epoksi oranları oluşturduğu belirtilmelidir. Homojen numuneler kullanılarak belirlenen mekanik özellikleri doğrulamak için, Tablo 3.1'de görüldüğü gibi, iki farklı hibrit JLJ numunesi (yani, JLJ1 ve JLJ2) ve bir hibrit LJL1 numunesi üretilmiştir.

Tablo 3.1. Titreşim test numunelerinin isimleri, konfigürasyonları, lif/epoksi oranları, kalınlıkları, uzunlukları ve genişlikleri

Numune No	İsim	Konfigürasyon	Lif/Epoksi Oranı	Kalınlık (mm)	Boyutlar (mm x mm)
1	J1	Jüt	0.45	4.0	110 x 250
2	L1	Luffa	0.55	4.0	
3	JLJ1	Jüt	0.45	1.0	
		Luffa	0.55	2.0	
		Jüt	0.45	1.0	
4	LJL1	Luffa	0.55	1.0	
		Jüt	0.45	2.0	
		Luffa	0.55	1.0	
5	J2	Jüt	0.50	12.2	150 x 200
6	L2	Luffa	0.60	18.2	
7	JLJ2	Jüt	0.50	4.4	
		Luffa	0.60	3.6	
		Jüt	0.50	5.1	
8	J3	Jüt	0.50	23	
9	L3	Luffa	0.60	12.8	
10	J4	Jüt	0.60	12.6	
11	J5	Jüt	0.50	14.5	110 x 180
12	L4	Luffa	0.70	14.8	

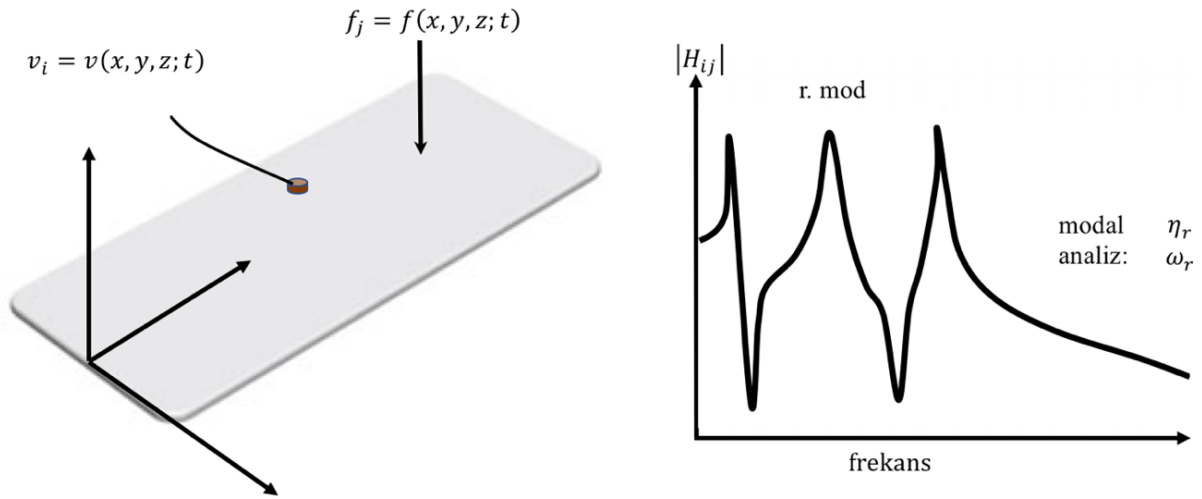
### 3.3.2 Frekans Tepki Fonksiyonu Ölçümleri

Burada çalışılan plakaların modal frekans ve sönüm seviyeleri yapıların deneysel olarak belirlenen frekans tepki fonksiyonları (FTF'ler) kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3.6). Bu amaçla, her plaka bir  $j$  noktasından bir modal çekiç ile tahrik edilerek başka bir  $i$  noktasındaki cevap bir ivmeölçer ile ölçülmüştür. Ölçülen tahrik ( $f$ , kuvvet) ve cevap ( $v$ , titreşim) sinyalleri kullanılarak yapısal FTF aşağıdaki ifade ile elde edilebilir (Koruk, 2014b; Koruk ve Genc, 2018):

$$H_{ij}(\omega) = \frac{S_{fv}(\omega)}{S_{ff}(\omega)} \quad (3.4)$$

Burada  $S_{ff}(\omega)$  tahrik (kuvvet) sinyalinin oto-spektrumu ve  $S_{fv}(\omega)$  cevap (titreşim) ve tahrik sinyalleri arasındaki çapraz-spektrumdur. Deneyler, sınır koşullarından kaynaklanan sönüm

ve rijitlik ile ilgili belirsizlikleri ortadan kaldırmak için serbest sınır koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Test plakaları 4x7 noktaya bölünmüş ve her bir plaka için yirmiden fazla FTF ölçülmüştür. Plakalar hafif olduğundan, yapıya yapıştırılan ivmeölçerin kütle etkisi modal frekanslarda hatalara yol açar (Koruk, 2014b), dolayısıyla plakaların doğal frekansları akustik FTF'ler kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, plakalar yine modal çekiç ile tahrik edilmiş ve tahrihe olan cevap plaka yakınına konulan bir mikrofon kullanılarak ölçülmüştür. Yapısal FTF'lere benzer olarak, ölçülen tahrik ( $f$ , kuvvet) ve cevap ( $p$ , ses basıncı) sinyalleri kullanılarak akustik FTF,  $H(\omega) = S_{fp}(\omega) / S_{ff}(\omega)$  ifadesi ile elde edilmiştir (Koruk, 2014b). Burada,  $S_{fp}(\omega)$  ses basıncı ve kuvvet sinyalleri arasındaki çapraz-spektrumdur. Sonuçta, akustik FTF'ler kullanılarak sönüm hassas olarak belirlenemeyebileceği için, sönüm değerleri yapısal FTF'ler, kullanılarak belirlenmiştir ve doğal frekanslar akustik FTF'ler kullanarak belirlenmiştir. Burada ölçümlerde B&K 3560D tip analizör, B&K 4507B tip ivmeölçer, Endevco 2302-10 tip modal çekiç ve B&K 4189-A-21 tip mikrofon kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Frekans tepki fonksiyonlarının ölçüm prosedürü

### 3.3.3 Deneysel Modal Parametrelerin Belirlenmesi

Frekans tepki fonksiyonları deneysel olarak belirlendikten sonra her plakanın modal frekans ve sönüm değerleri daire-uydurma yöntemi (Ewins, 2000; Koruk, 2013) kullanılarak belirlenmiştir. Daire-uydurma yöntemi, doğal bir frekansın çevresinde FTF verisine bir daire uydurmaya dayanır. Burada  $r$  mod numarasını,  $j$  ve  $k$  cevap ve tahrik noktalarını,  $\omega$  frekansı,  $\omega_r$  doğal frekansı ve  $\eta_r$  modal sönümü göstermek üzere, yapısal sönümlü bir sistemin tepki modeli Denklem 3.5'teki gibi ifade edilebilir, çünkü  ${}_r A_{jk}$  modal sabitinin etkisi çemberin

boyutunu genliğe göre ölçeklendirmek ve  $\angle_r A_{jk}$  faz açısına göre döndürmektir (Ewins, 2000).

$$\bar{\alpha}(\omega) = \frac{1}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r \omega_r^2} \quad (3.5)$$

Şekil 3.7'de verilen  $\bar{\alpha}(\omega)$  ifadesinin grafiği düşünülürse, herhangi bir  $\omega$  frekansı için Denklem 3.6 ve 3.7'deki ifadeler yazılabilir.

$$\tan \phi = \frac{\eta_r}{1 - (\omega/\omega_r)^2} \quad (3.6)$$

$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1 - (\omega/\omega_r)^2}{\eta_r} \quad (3.7)$$

Denklem 3.6 ve 3.7'deki ifadeler kullanılarak Denklem 3.8 elde edilebilir. Doğal frekans, Denklem 5'in  $\theta$ 'ya sonra da  $\omega$ 'ya göre türetilerek ve elde edilen ifadenin sıfıra eşitlenmesi ile bulunabilir (Ewins, 2000).

$$\omega^2 = \omega_r^2 (1 - \eta_r \tan(\theta/2)) \quad (3.8)$$

Denklem 3.7 dikkate alınarak, Şekil 3.7'deki özel noktalar için aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\tan(\theta_a/2) = \left[ (\omega_a/\omega_r)^2 - 1 \right] / \eta_r \quad (3.9)$$

$$\tan(\theta_b/2) = \left[ 1 - (\omega_b/\omega_r)^2 \right] / \eta_r \quad (3.10)$$

Yukarıdaki iki ifade kullanılarak sönüm ifadesi aşağıdaki gibi elde edilebilir (Koruk, 2013):

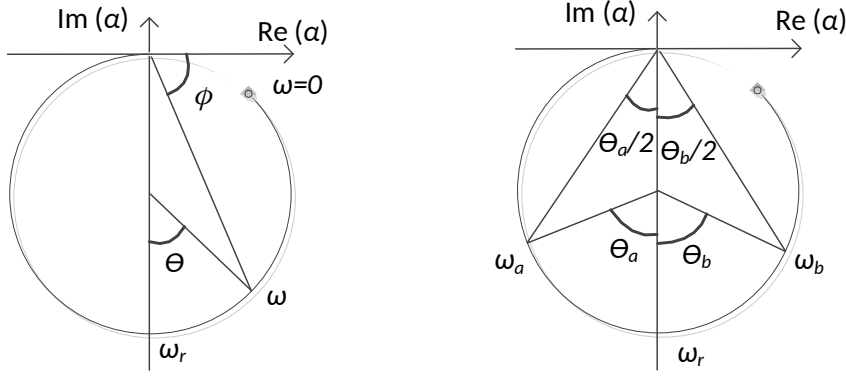
$$\eta_r = \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{\omega_r^2 (\tan(\theta_a/2) + \tan(\theta_b/2))} \quad (3.11)$$

Denklem 3.5 Reel-İmajiner düzleminde çizdirilirse aşağıdaki ifadesi verilen çapa sahip bir daireyi takip eder.

$${}_r D_{jk} = 1/\eta_r \omega_r^2 \quad (3.12)$$

Dairenin çapı  $|{}_r A_{jk}|$  ile ölçeklendirilirse, modal sabit aşağıdaki gibi bulunur (Ewins, 2000; Koruk, 2013):

$$|{}_r A_{jk}| = \eta_r \omega_r^2 {}_r D_{jk} \quad (3.13)$$



Şekil 3.7. Daire-uydurma yöntemi için frekans ve açı tanımlamaları

### 3.3.4 Sonlu Eleman Analizleri

Plakaların modal parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesinin ardından, yapıların modal frekanslarını tahmin etmek için aynı yapılar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Burada, yapı için rijitlik ( $K$ ) ve kütle ( $M$ ) matrisleri, tek tek elemanların katkılarının ( $k_i$  eleman rijitlik matrisi,  $m_i$  eleman kütle matrisi ve  $n$  toplam eleman sayısı) bir toplama işlemi aracılığıyla eklenmesiyle elde edilir (Sanlitürk ve Koruk, 2013, 2014):

$$K = \sum_{i=1}^n k_i; \quad M = \sum_{i=1}^n m_i \quad (3.14)$$

Rijitlik ve kütle matrisleri elde edildikten sonra, sistemin için doğal frekansları ve mod şekilleri, aşağıda verilen standart özdeğer problemini çözerek elde edilebilir:

$$(K - \lambda^2 M)\Psi = 0 \quad (3.15)$$

Yukarıdaki özdeğer probleminin çözümü, her mod için özdeğerleri ( $\lambda_r^2$ ) veya doğal frekansları ( $\omega_r = \sqrt{\lambda_r^2}$ ) ve mod şekillerini ( $\psi_r$ ) verir.

Burada, her plaka Abaqus yazılımındaki (Dassault Systems, Fransa) kabuk sonlu elemanlar (120 tane S4R) kullanılarak modellenmiş ve modal analizler gerçekleştirilerek yapının doğal frekansları belirlenmiştir. Sonlu elemanlar modelinde ihtiyaç duyulan her bir malzemenin yoğunluğu, ölçülen boyutlar ve numunenin kütlesi kullanılarak belirlenmiştir.

İlk olarak, homojen jüt ve luffa plakalarının izotropik olduğu varsayılmıştır. Her bir malzemenin elastisite modülü, deneysel olarak belirlenen modal frekanslar ile sonlu elemanlar modelinde malzemenin elastisite modülünün değerini değiştirerek tahmin edilen modal frekanslar arasındaki hata en aza indirilerek belirlenmiştir.

Homojen jüt ve luffa plakalarının izotropik olduğu varsayımının yanı sıra, aynı plakaların yönlü elastik özellikleri dikkate alınarak da aynı yapılar modellenmiştir. Her bir malzemenin ilgili elastik özellikleri, deneysel olarak belirlenen modal frekanslar ile bu

değerlerin sonlu elemanlar modelinde değiştirilmesiyle tahmin edilen modal frekanslar arasındaki hata en aza indirilerek belirlenmiştir.

## 4. BULGULAR

### 4.1 Reçinesiz Numunelerin Akustik Özellikleri

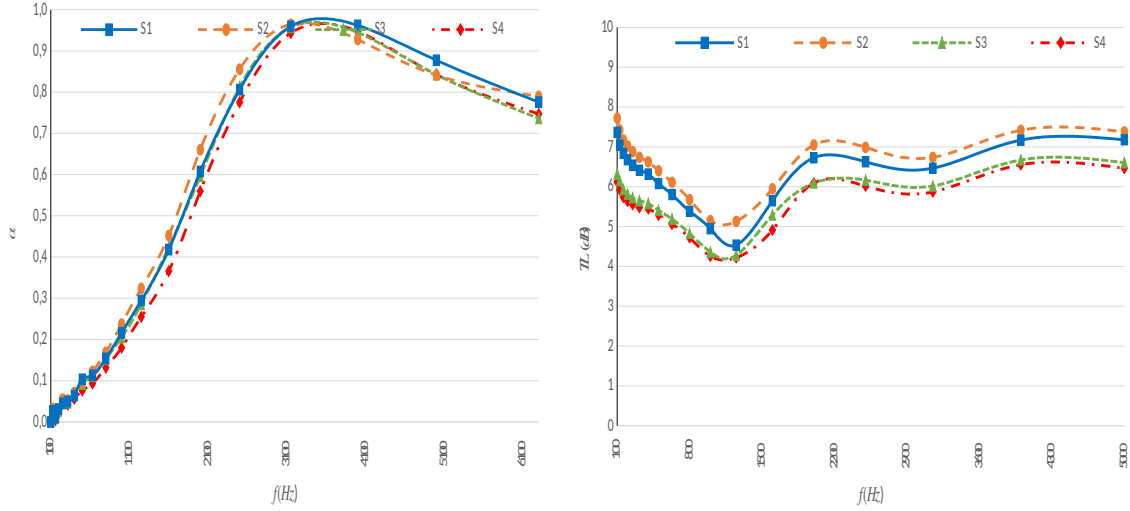
Öncelikle hiç reçine kullanmadan hazırlanan homojen ve hibrit jüt ve luffa (kabak lifi) numunelerin akustik özellikleri bu başlık altında sunulmuştur.

#### 4.1.1 Fiberlerin Değişkenliği ve Üretim Sürecinin Tekrarlanabilirliği

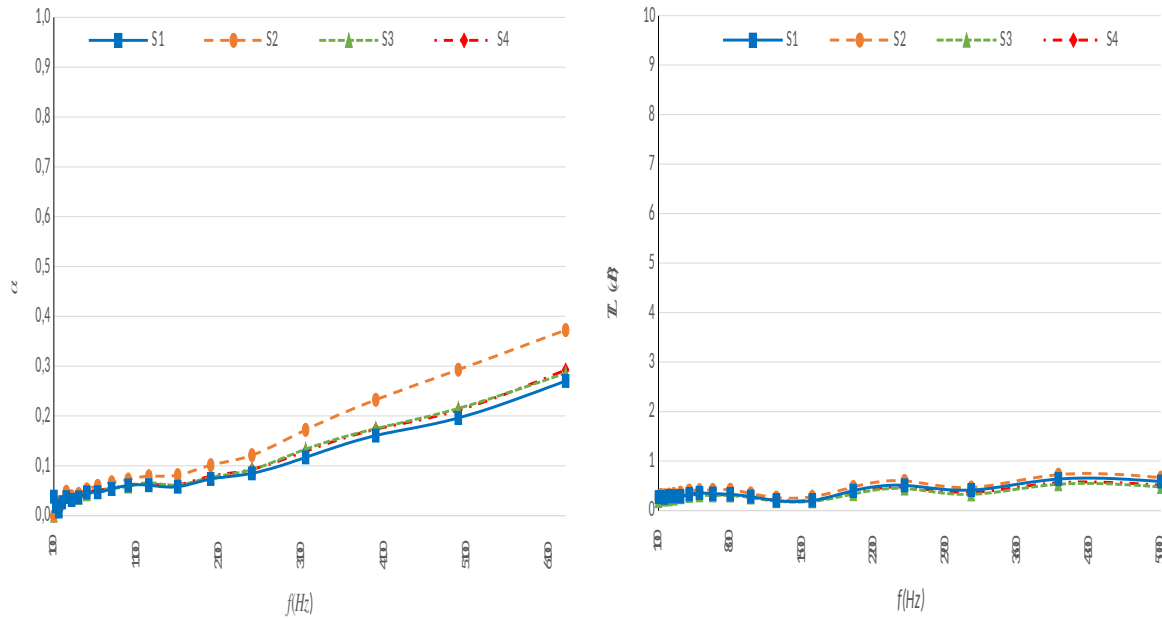
Kimyasal bazlı liflerin aksine, bir gruptaki her bir doğal lif farklı bireysel mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olabilir. Dahası, doğal lif bazlı yapılar için üretim yöntemleri günümüzde çok hassas değildir. Bu nedenle, öncelikle eşdeğer olarak üretilen numunelerin akustik özellikleri karşılaştırılıp, benzer özellikler elde edilip edilmediği ortaya konulmalıdır. Nominal olarak özdeş dört adet homojen jüt ve luffa lif numunesinin ses yutma katsayıları ( $\alpha$ ) ve ses iletim kaybı (transmission loss veya TL) seviyeleri sırasıyla Şekil 4.1 ve 4.2'de verilmiştir. Bazı küçük farklılıklar olsa da genel olarak homojen jüt ve luffa lif numuneleri için hem ses yutum hem de iletim kaybı deneylerinin tekrarlanabilir olarak değerlendirilebileceği görülmektedir. Verilen dört jüt numunesi için ses yutma katsayılarının ortalamaları ve sapmaları 500, 2000 ve 5000 Hz için sırasıyla  $0.092 \pm 0.01$ ,  $0.268 \pm 0.02$  ve  $0.822 \pm 0.02$ 'dir. Verilen dört jüt numunesi için iletim kaybı seviyelerinin ortalamaları ve standart sapmaları 500, 2000 ve 5000 Hz için sırasıyla  $6.28 \pm 0.65$  dB,  $5.38 \pm 0.47$  dB ve  $6.61 \pm 0.43$  dB'dir. Benzer şekilde, verilen dört luffa örneği için ses yutum katsayıları sırasıyla 500, 2000 ve 5000 Hz için  $0.029 \pm 0.006$ ,  $0.062 \pm 0.008$  ve  $0.171 \pm 0.03$ 'tür. Verilen dört luffa numunesi için iletim kaybı seviyeleri 500, 2000 ve 5000 Hz için sırasıyla  $0.252 \pm 0.06$  dB,  $0.269 \pm 0.06$  dB ve  $0.43 \pm 0.10$  dB'dir. Bu sonuçlar, farklı frekanslar için hem ses yutum hem de iletim kaybı değerlerindeki sapmaların her iki malzeme için de küçük olduğunu göstermektedir.

Burada yukarıda sunulan homojen jüt ve luffa elyaf numuneleri için olan sonuçlara ek olarak, reçinesiz hibrit jüt ve luffa kompozitlerinin akustik özellikleri de sunulmuştur. Hibrit JLJ ve LJL numunelerinin ses yutum katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri Şekil 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Homojen numunelerin sonuçlarına benzer şekilde, hibrit numuneler arasında test sonuçlarının varyasyonları küçük kabul edilebilir. Verilen üç JLJ numunesi için ses yutma katsayılarının ve iletim kaybı seviyelerinin ortalamaları ve sapmaları 500, 2000 ve 5000 Hz için sırasıyla  $0.041 \pm 0.007$ ,  $0.132 \pm 0.023$  ve  $0.538 \pm 0.080$ ;  $1.73 \pm 0.42$  dB,  $1.6 \pm 0.34$  dB ve  $2.3 \pm 0.42$  dB'dir. Verilen üç LJL örneği için karşılık gelen değerler 500, 2000 ve 5000 Hz için sırasıyla  $0.034 \pm 0.004$ ,  $0.112 \pm 0.018$  ve  $0.573 \pm 0.098$ ;  $2.25 \pm 0.75$  dB,  $1.94 \pm 0.57$  dB ve

2.87 ± 0.71 dB'dir. Hibrit JLJ ve LJL numunelerinin ses yutma katsayıları ile ses iletim kaybı düzeylerinin karşılaştırılabilir olduğu görülmektedir.

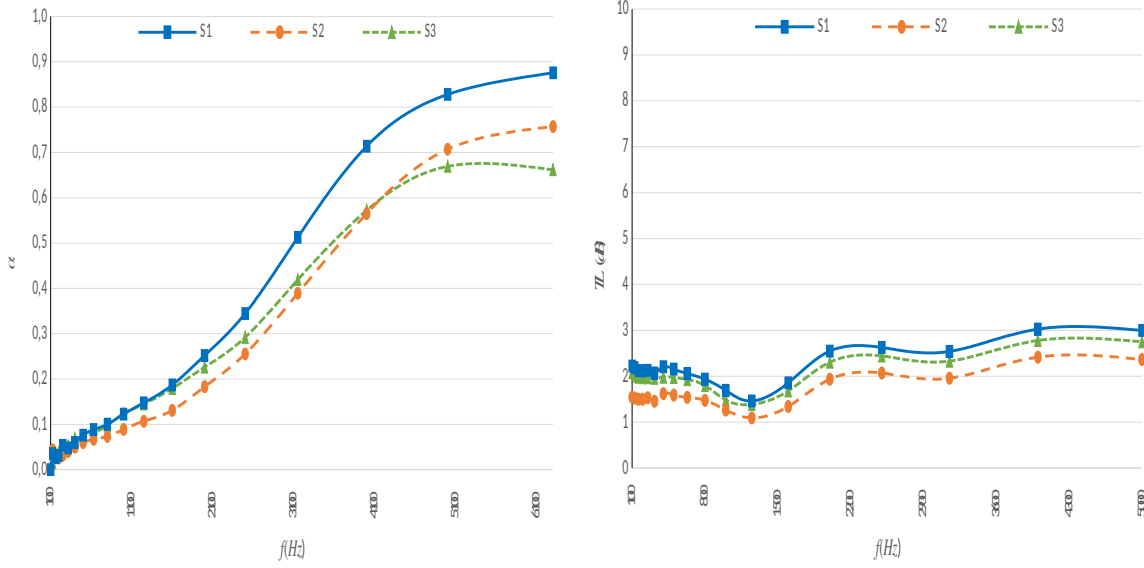


Şekil 4.1. Nominal olarak özdeş dört adet reçinesiz homojen jüt numunesinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (kalınlık: 10 mm, numune yoğunluğu: 419.8 kg/m<sup>3</sup>)

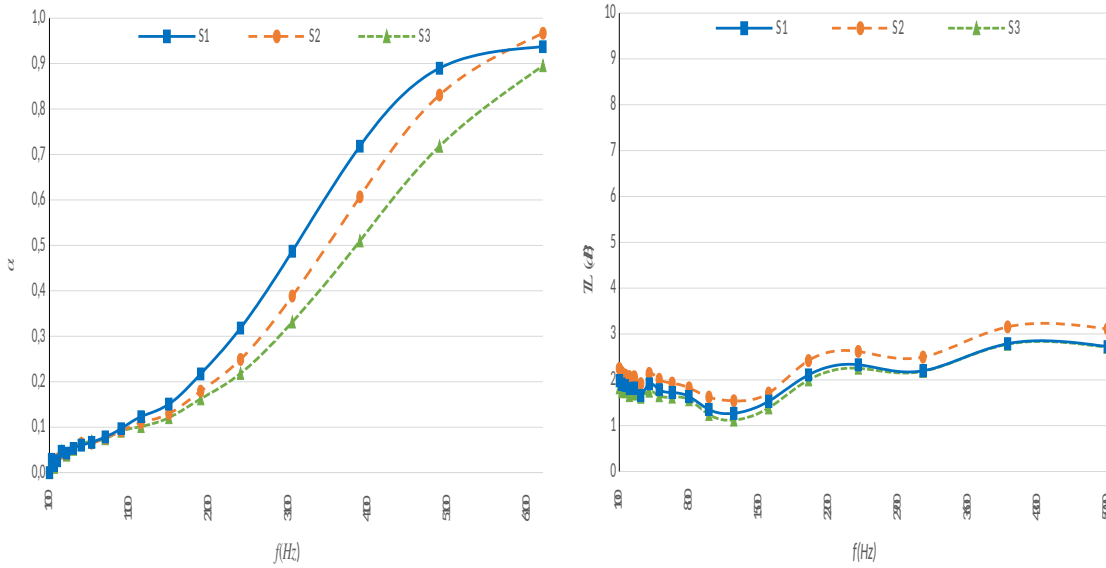


Şekil 4.2. Nominal olarak özdeş dört adet reçinesiz homojen luffa (kabak lifi) numunesinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL iletim kaybı seviyeleri (kalınlık: 10 mm, numune yoğunluğu: 73.6 kg/m<sup>3</sup>)





Şekil 4.3. Nominal olarak özdeş üç adet hibrit JLJ numunesinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (kalınlık: 10 mm, JLJ'nin yoğunluğu: 187.4 kg/m<sup>3</sup>)

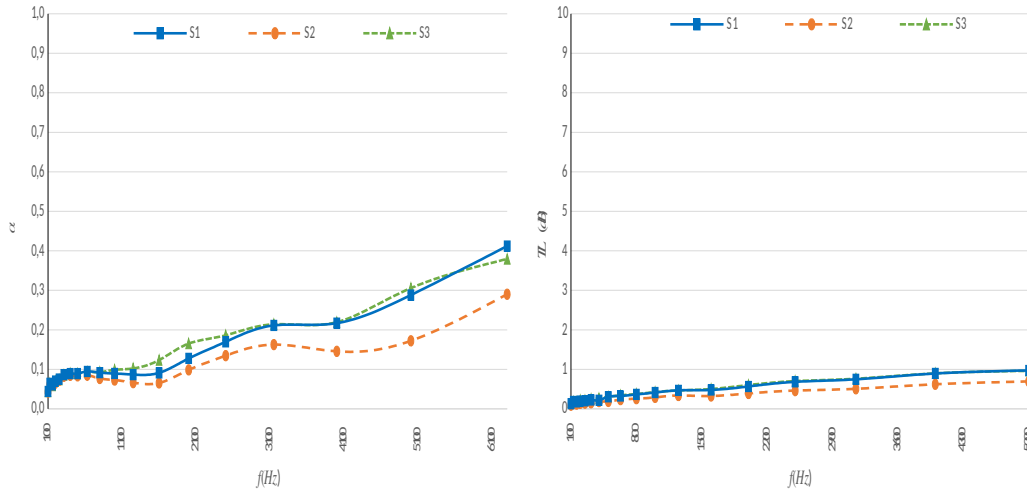


Şekil 4.4. Nominal olarak özdeş üç adet hibrit LJJ numunesinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (kalınlık: 10 mm, LJJ'nin yoğunluğu: 178.0 kg/m<sup>3</sup>)

#### 4.1.2 Bitkilerin Yetiştği Bölgenin Akustik Özellikler Üzerindeki Etkisi

Gerektiğinde farklı bölgelerden bitkiler aynı ürünün üretimi için kullanılabilir, dolayısıyla bitkilerin yetiştği bölgesinin doğal lif esaslı yapıların akustik özellikleri üzerindeki etkisinin gösterilmesine ihtiyaç vardır. Burada, Mısır ve Hatay/Türkiye olmak üzere iki farklı bölgeden alınan luffa numunelerinin özellikleri araştırılmıştır. Türkiye (73.6 kg/m<sup>3</sup>) ve Mısır

(79.3 kg/m<sup>3</sup>) luffa numunelerinin numune yoğunlukları çok farklı değildir. Türkiye'den alınan numuneler için akustik sonuçlar Şekil 4.2'de daha önce verilmişti. Mısır'dan alınan numuneler için ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Her iki bölgeden alınan numunelerin benzer akustik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Beklendiği gibi, aynı bölgeden numuneler arasında bile bazı farklılıklar olduğunu belirtmekte fayda var. Bitkilerin yetiştiği bölgenin, en azından buradaki iki bölge için, luffanın akustik özellikleri üzerinde ihmal edilebilir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Dolayısıyla, bundan sonraki üretimlerde sadece Hatay/Türkiye'de yetişen luffa lifleri kullanılmıştır.

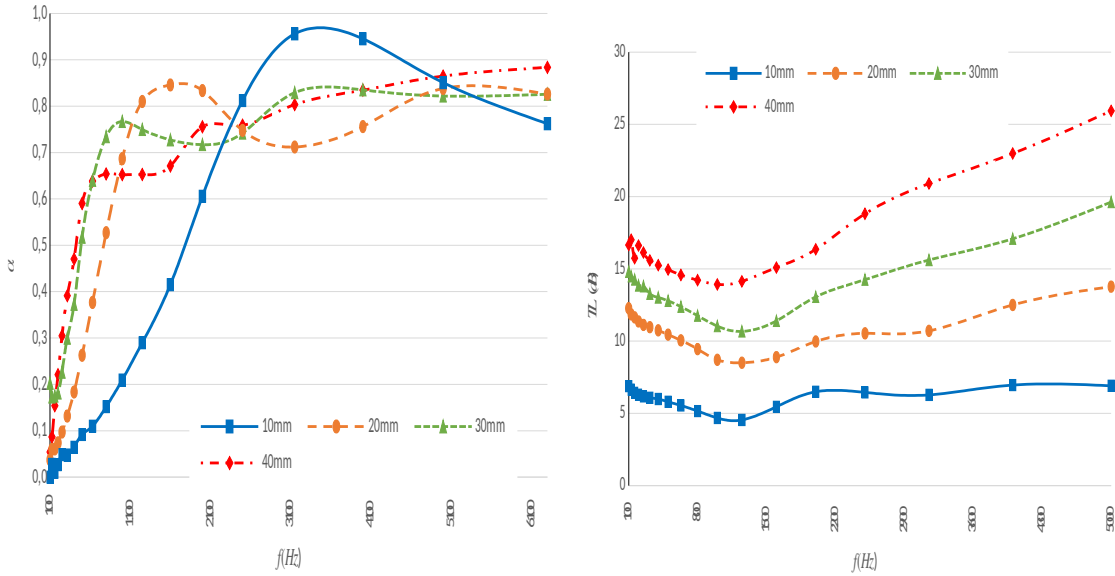


Şekil 4.5. Nominal olarak özdeş dört adet reçinesiz homojen luffa (Mısır) numunesinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (kalınlık: 10 mm, numune yoğunluğu: 79.3 kg/m<sup>3</sup>)

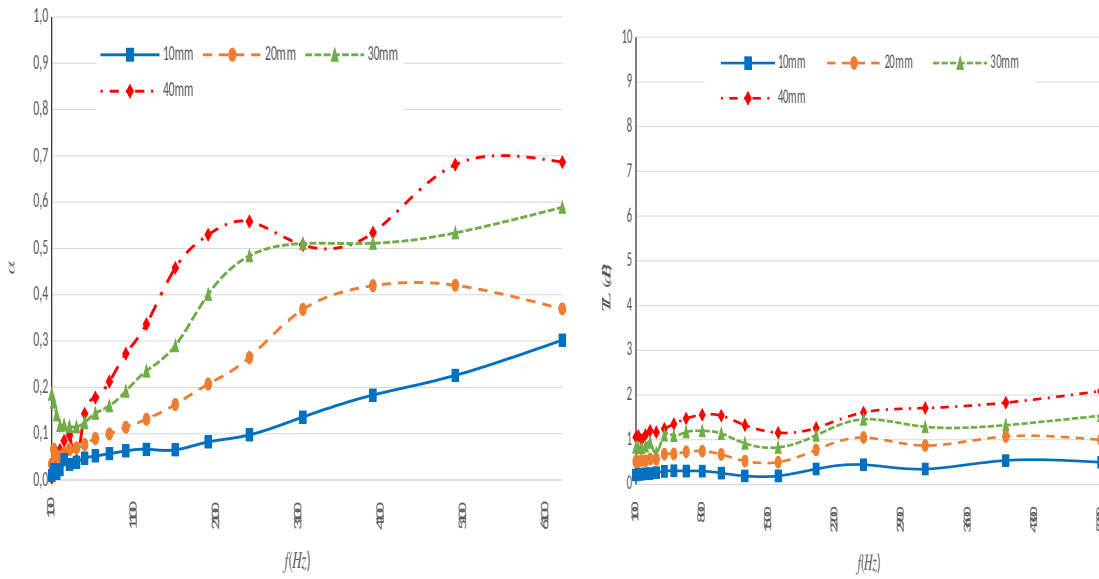
#### 4.1.3 Frekansa ve Kalınlığa Bağlı Değişen Akustik Özellikler

Farklı kalınlıklara sahip reçinesiz homojen jüt ve luffa numunelerinin ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri Şekil 4.6 ve 4.7'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, ses yutma katsayısı eğrileri önce bir tepe değerine ulaşma eğilimindedir ve daha sonra frekansla küçük bir düşüş gösteriyorlar. Beklendiği gibi, numune kalınlığı arttıkça ses yutma eğrilerindeki ilk tepenin frekansı azalmaktadır. Örneğin, Şekil 4.6'da görüldüğü gibi kalınlığı 10 mm olan jüt numunesi için ses yutma katsayıları 3500 Hz civarında ilk tepe değerine ulaşırken, daha kalın numunelerin ilk tepelerinin frekansları daha düşüktür. Öte yandan, Şekil 4.7'deki luffa numuneleri ile ilgili olarak, 10 mm kalınlık için eğrinin herhangi bir tepe noktasına sahip olmadığı görülmektedir. Kalınlığı 20 mm olan luffa numunesi için ses yutma katsayısı eğrisindeki ilk tepe frekansı 4500 Hz civarında iken, 30 ve 40 mm kalınlıktaki numunelerin ilk tepe noktaları sırasıyla 3000 ve 2500 Hz civarındadır. Şekil 4.6'ya bakıldığında, jüt lif

numuneleri için numune kalınlığı arttıkça, esas olarak daha düşük frekanslarda ses yutumu arttığı görülmekte, 10 mm jüt numunesinin bile yüksek düzeyde ses yutma katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan, luffa numuneleri için, numune kalınlığı arttıkça, hemen hemen tüm frekanslarda ses yutumunun arttığı görülüyor. Ses iletim kaybı seviyelerinin her iki malzeme için de kalınlıkla tutarlı bir şekilde arttığı görülüyor.

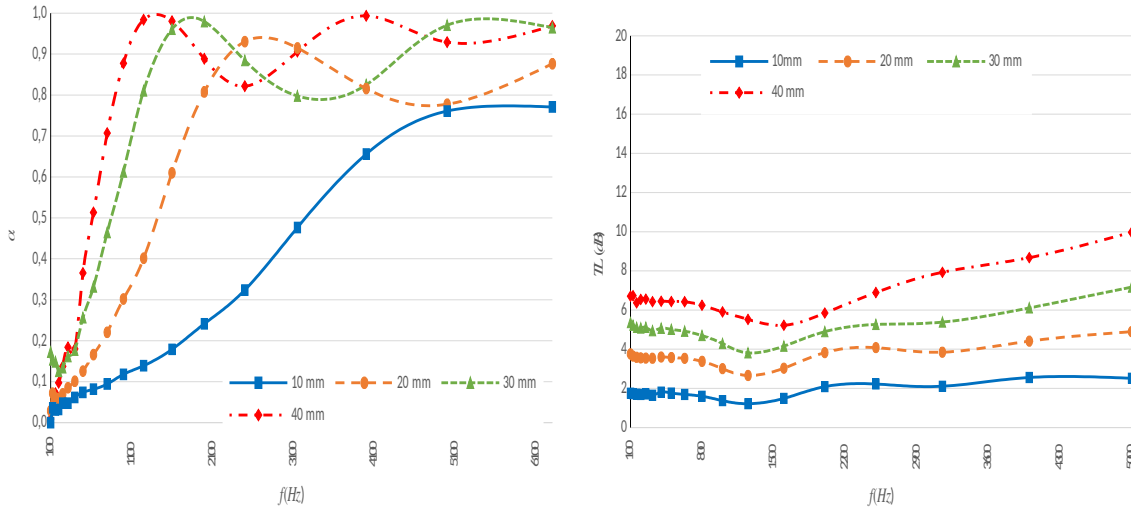


Şekil 4.6. Farklı kalınlıktaki reçinesiz homojen jüt numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 419.8 kg/m<sup>3</sup>)

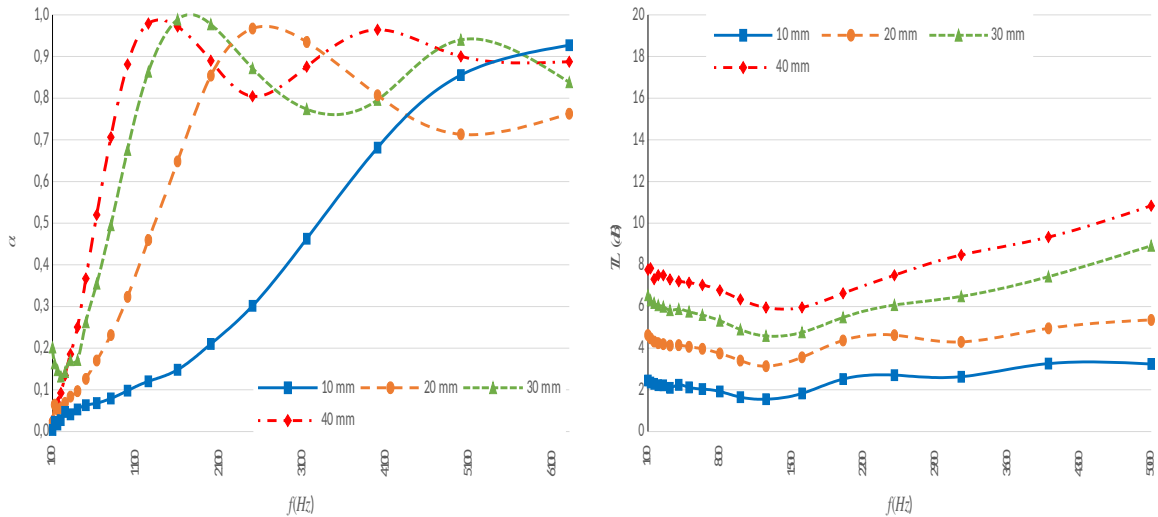


Şekil 4.7. Farklı kalınlıktaki reçinesiz homojen luffa numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 73.6 kg/m<sup>3</sup>)

Benzer şekilde, farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit jüt ve luffa numunelerinin ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri Şekil 4.8 ve 4.9'da gösterilmiştir. Daha önce homojen jüt ve luffa lif numunelerinde görüldüğü gibi, hibrit JLJ ve LJL numunelerinin ses yutma katsayısı eğrilerinin ilk tepelerinin frekansları kalınlık arttıkça azalmaktadır. Hibrit JLJ ve LJL numunelerinin ses yutma katsayıları, numune kalınlığı arttıkça kararlı şekilde artmaktadır. Hibrit JLJ ve LJL numunelerinin ses iletim kaybı seviyeleri, homojen jüt ve luffa lif numuneleri için daha önce gözlemlendiği gibi kalınlıkla tutarlı bir şekilde artmaktadır.



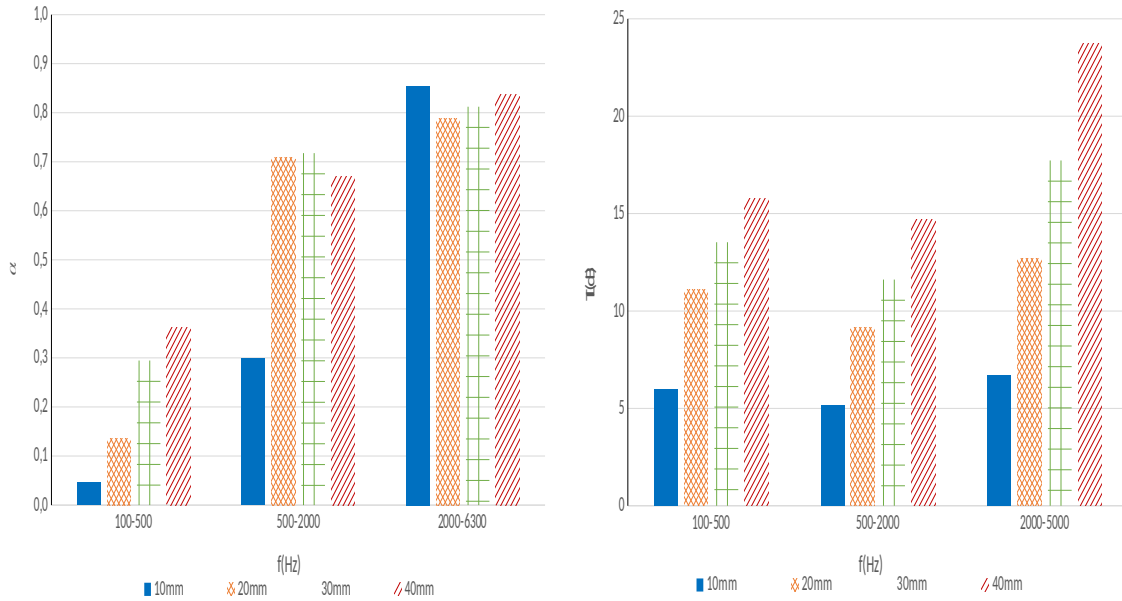
Şekil 4.8. Farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit JLJ numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (JLJ'nin yoğunluğu:  $187.4 \text{ kg/m}^3$ )



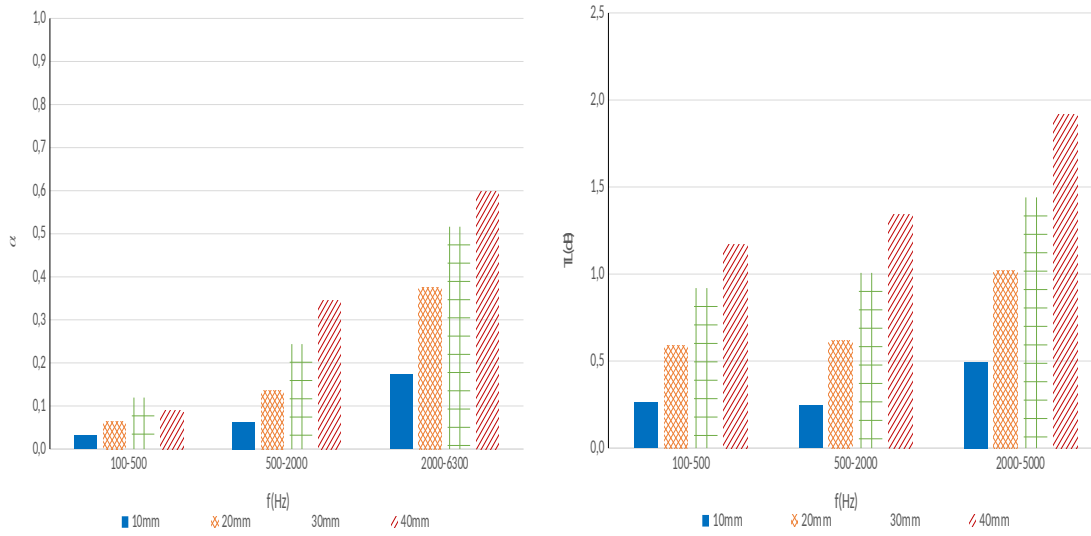
Şekil 4.9. Farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit LJL numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (LJL'nin yoğunluğu:  $178.0 \text{ kg/m}^3$ )

#### 4.1.4 Düşük, Orta ve Yüksek Frekanslar için Akustik Özelliklerin Kalınlığa Bağlı Analizi

Düşük (100-500 Hz), orta (500-2000 Hz) ve yüksek ( $\alpha$  için 2000-6300 Hz ve TL için 2000-5000 Hz) frekanslar ve farklı kalınlıklar için reçinesiz homojen jüt ve luffa lif numunelerinin ortalama ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri Şekil 4.10 ve 4.11'de verilmiştir. Jüt için ses yutma katsayılarının düşük frekanslarda numune kalınlığı arttıkça arttığı görülmektedir. Orta frekanslarda jüt ses yutma katsayıları, numune kalınlığı 10 mm'den 20 mm'ye çıktıkça artmakla birlikte, orta frekans aralığında 20, 30 ve 40 mm kalınlığındaki jüt numunelerinin ses yutma katsayıları birbirine yakındır. Yüksek frekans aralığında 10, 20, 30 ve 40 mm jüt numunelerinin ses yutma katsayılarının birbirine yakın olduğu, dolayısıyla daha yüksek ses yutumu için yüksek frekanslarda numune kalınlığının artırılmasına gerek olmadığı görülmüştür. Öte yandan, luffa lifinin ses yutma katsayıları, tüm frekans aralıklarında numune kalınlığı arttıkça artmaktadır. Görüldüğü gibi homojen jüt ve luffa lif numunelerinin iletim kaybı değerleri, düşük, orta ve yüksek frekanslar için numune kalınlığı arttıkça kararlı şekilde artmaktadır.

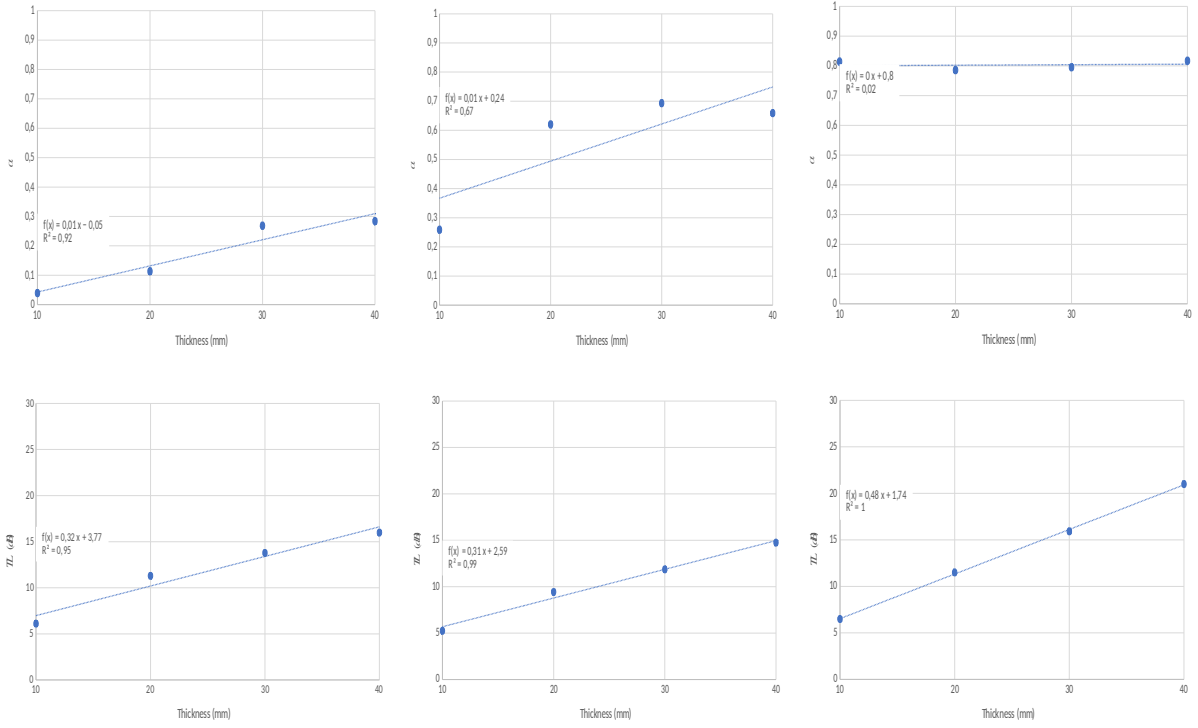


Şekil 4.10. Farklı frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz homojen jüt numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 419.8 kg/m<sup>3</sup>)

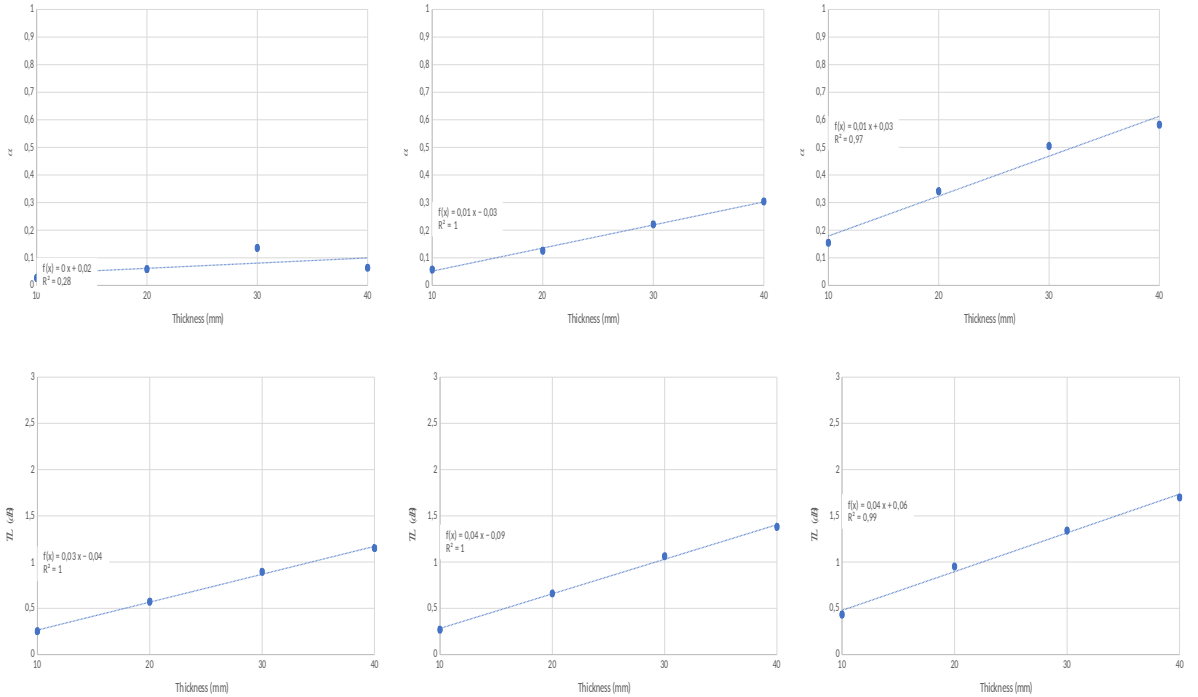


Şekil 4.11. Farklı frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz homojen luffa numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu:  $73.6 \text{ kg/m}^3$ )

Farklı frekans aralıkları için reçinesiz jüt ve luffa lif malzemelerinin ses yutma ve iletim kaybının kalınlığa bağlı eğilimlerini belirlemek için, homojen jüt ve luffa lif numunelerinin farklı kalınlıklar ve düşük (100-500 Hz), orta (500-2000 Hz) ve yüksek ( $\alpha$  için 2000-6300 Hz ve TL için 2000-5000 Hz) frekans aralıkları için ortalama ses yutma katsayıları ve ses iletim kayıpları, ölçüm verilen uydurulan birinci dereceden eğriler ve  $R$  korelasyon katsayıları Şekil 4.12 ve 14.13'te verilmiştir. Homojen jüt lif numunelerinin ses yutma katsayılarının düşük frekans aralığı için frekansla doğrusal olarak arttığı (Şekil 4.12a), orta frekans aralığı için belirli bir kalınlık değerine kadar yükseldiği (Şekil 4.12b) ve yüksek frekans aralığında kalınlık artışının etkisi olmadığı görülmektedir (Şekil 4.12c). Öte yandan, homojen jüt lif numunelerinin iletim kaybı seviyeleri, düşük (Şekil 4.12d), orta (Şekil 4.12e) ve yüksek (Şekil 4.12f) frekans aralıkları için neredeyse doğrusal olarak artmaktadır. Homojen luffa lif numuneleri için, hem ses yutma katsayıları hem de iletim kaybı seviyeleri, hemen hemen tüm frekans aralıkları için kalınlıkla doğrusal olarak artma eğilimindedir (Şekil 4.13).

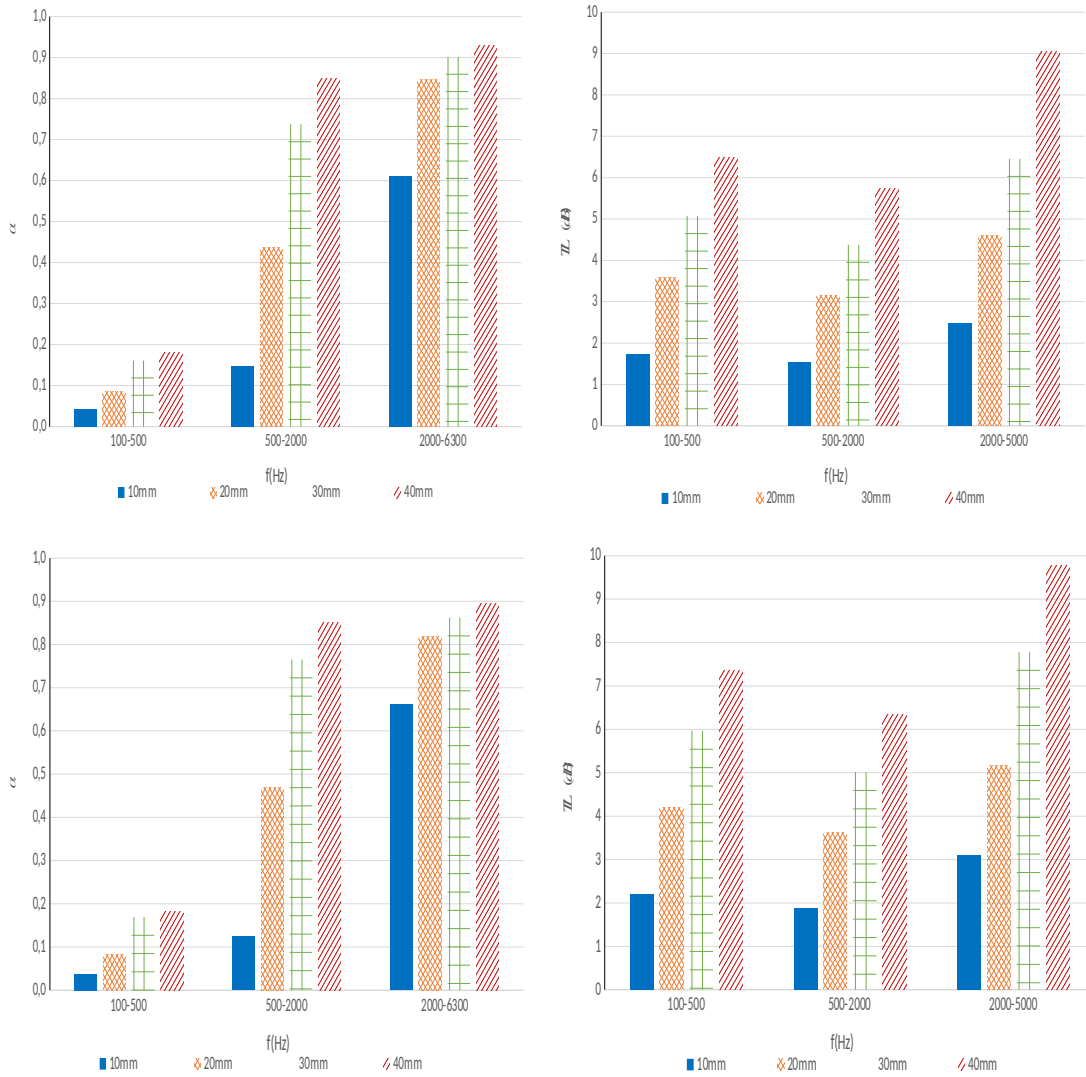


Şekil 4.12. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz homojen jüt numunelerinin ortalama  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 419.8 kg/m<sup>3</sup>)



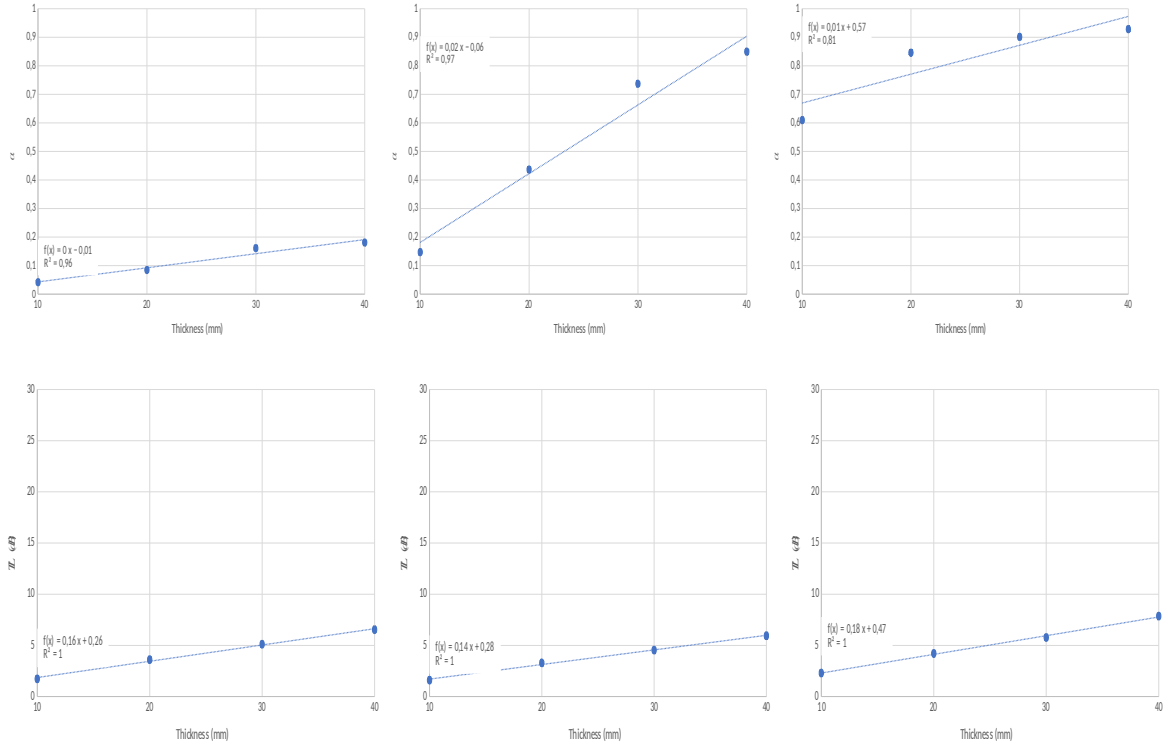
Şekil 4.13. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz homojen luffa numunelerinin ortalama  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu: 73.6 kg/m<sup>3</sup>)

Benzer şekilde, düşük, orta ve yüksek frekans aralıkları ve farklı kalınlıklar için reçinesiz hibrit JLJ ve LJJ numunelerinin ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Hibrit JLJ ve LJJ numunelerinin akustik özelliklerinin tüm frekans aralıkları ve kalınlıklar için birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Düşük, orta ve yüksek frekans aralıkları için hibrit JLJ ve LJJ numunelerinin ortalama ses yutma katsayıları ve ses iletim kayıpları, ölçüm verilen uydurulan birinci dereceden eğriler ve  $R$  korelasyon katsayısı değerleri Şekil 4.15 ve 4.16'da verilmiştir. Görüldüğü gibi, hibrit JLJ ve LJJ numunelerinin ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyelerinin, düşük, orta ve yüksek frekans aralıkları için kalınlıkla doğrusal olarak artma eğilimindedir.

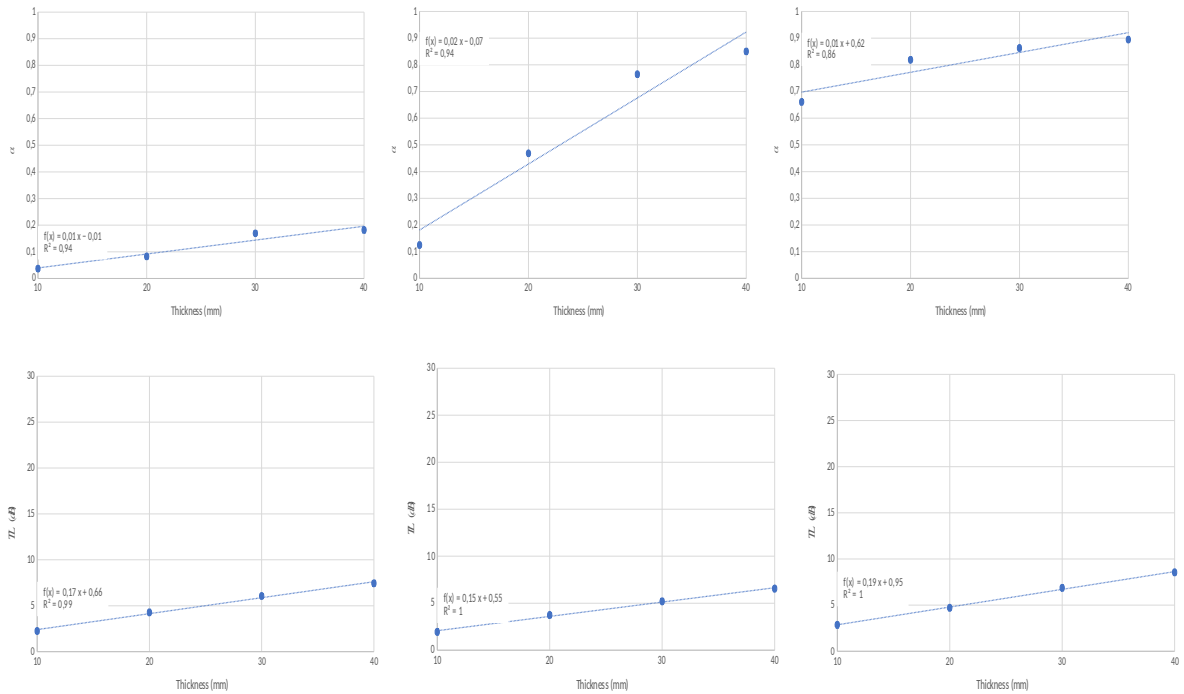


Şekil 4.14. Farklı frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit JLJ (a ve b) ve LJJ (c ve d) numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (JLJ'nin yoğunluğu: 187.4 kg/m<sup>3</sup>, LJJ'nin yoğunluğu: 178.0 kg/m<sup>3</sup>)





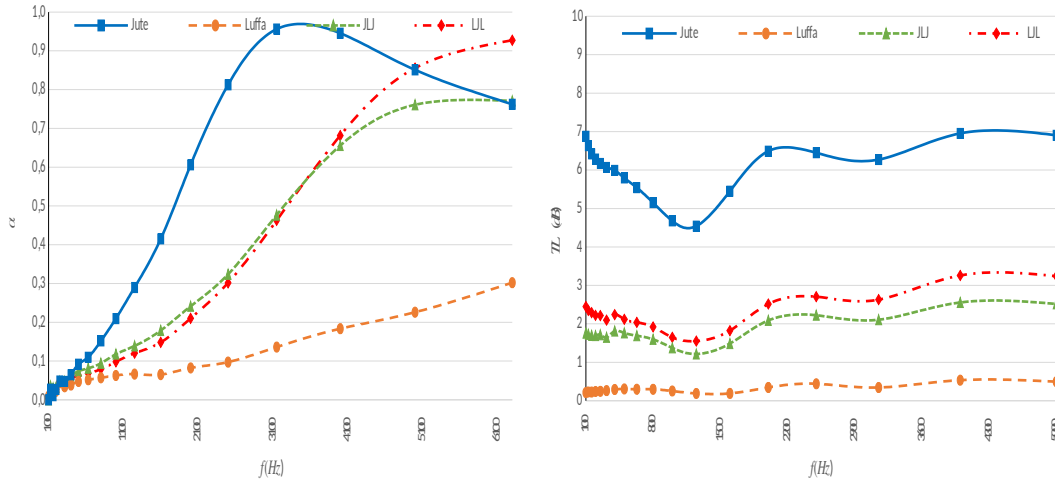
Şekil 4.15. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit JLJ numunelerinin ortalama  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (JLJ'nin yoğunluğu: 187.4 kg/m<sup>3</sup>)



Şekil 4.16. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçinesiz hibrit LJJ numunelerinin ortalama  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı seviyeleri (LJJ'nin yoğunluğu: 178.0 kg/m<sup>3</sup>)

#### 4.1.5 Homojen ve Hibrit Numunelerin Akustik Özelliklerin Karşılaştırılması

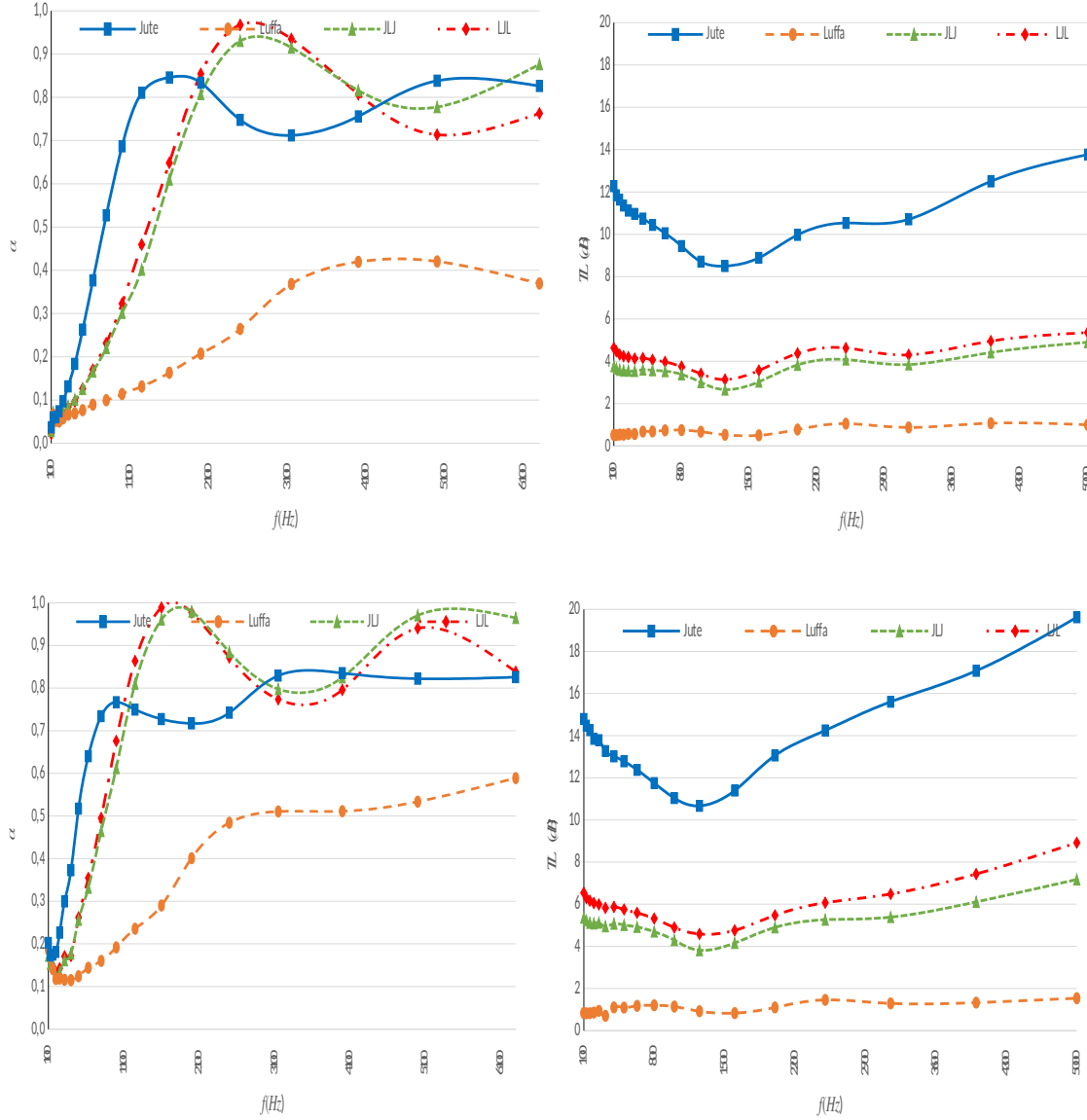
Kalınlığı 10 mm olan homojen ve hibrit jüt ve luffa lif numunelerinin ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri Şekil 4.17'de karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi aynı kalınlıktaki numuneler için jüt numunesinin akustik performansı luffa numunesinin akustik performansından daha iyidir. Bununla birlikte, jüt numunelerinin (numune yoğunluğu: 419.8 kg/m<sup>3</sup>) luffa numunelerinden (numune yoğunluğu: 73.6 kg/m<sup>3</sup>) çok daha ağır olduğu unutulmamalıdır. Her iki tip hibrit numunenin ses yutma katsayıları frekansla artmaktadır. Diğer bir gözlem ise, hibrit LJL ve JLJ numunelerinin ses yutma katsayıları ve ses iletim kaybı seviyelerinin birbirine oldukça yakın olmasıdır. Katmanların dizilişinin akustik özellikleri önemli ölçüde etkilemediği söylenebilir. Genel olarak, hibrit numuneler homojen luffa numunelerine göre daha iyi ses yutum özellikleri göstermektedir. Tahmin edilebileceği gibi, hibrit numunelerin akustik özelliklerinin seviyeleri, homojen luffa ve jüt numunelerinin akustik özelliklerinin seviyeleri arasındadır. Bu iki doğal lif malzemenin reçinesiz hibrit kompozitleri, luffa elyafının nispeten düşük yoğunluğu nedeniyle, düşük ağırlıklı yapılara ihtiyaç duyulduğunda tercih edilebilir.



Şekil 4.17. Reçinesiz homojen ve hibrit jüt (jüte) ve luffa numunelerinin  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı düzeyleri (kalınlık: 10 mm, jüt numunesinin yoğunluğu = 419.8 kg/m<sup>3</sup>, luffa numunesinin yoğunluğu = 73.6 kg/m<sup>3</sup>, JLJ'nin yoğunluğu = 187.4 kg/m<sup>3</sup>, LJL'nin yoğunluğu = 178.0 kg/m<sup>3</sup>)

Şekil 4.18'de 20 ve 30 mm kalınlığındaki numuneler için sunulan sonuçlar Şekil 4.17'deki 10 mm kalınlığındaki numunelerin sonuçlarıyla benzer eğilimler göstermektedir. Örneğin, 20 ve 30 mm kalınlıklarındaki hibrit LJL ve JLJ numunelerinin ses yutma katsayıları ve ses iletim kaybı seviyeleri birbirine çok yakındır. Beklendiği gibi, ses yutma katsayısı

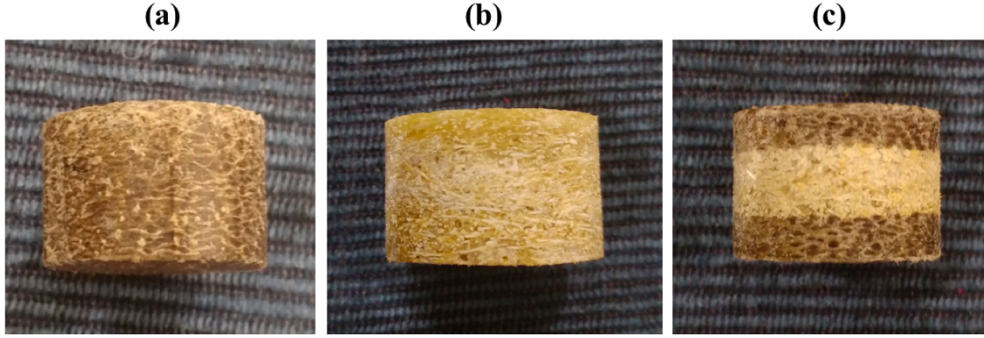
eğrilerindeki ilk tepe noktasının frekansı, tüm kalınlık değerleri için yoğunluk artışlarından dolayı azalmaktadır. Homojen jüt lif numunelerinin diğer numunelere göre daha yüksek iletim kaybı düzeylerine sahip olduğu, hibrit numunelerinin iletim kaybı düzeylerinin ise dikkate değer olduğu bir kez daha görülmektedir.



Şekil 4.18. Reçinesiz homojen ve hibrit jüt (jüte) ve luffa numunelerinin 20 mm (a ve b) ve 30 mm (c ve d) kalınlıkları için  $\alpha$  ses yutma katsayıları ve TL ses iletim kaybı düzeyleri (jüt numunesinin yoğunluğu =  $419.8 \text{ kg/m}^3$ , luffa numunesinin yoğunluğu =  $73.6 \text{ kg/m}^3$ , JLJ'nin yoğunluğu =  $187.4 \text{ kg/m}^3$ , LJL'nin yoğunluğu =  $178.0 \text{ kg/m}^3$ )

## 4.2 Reçineli Numunelerin Akustik Özellikleri

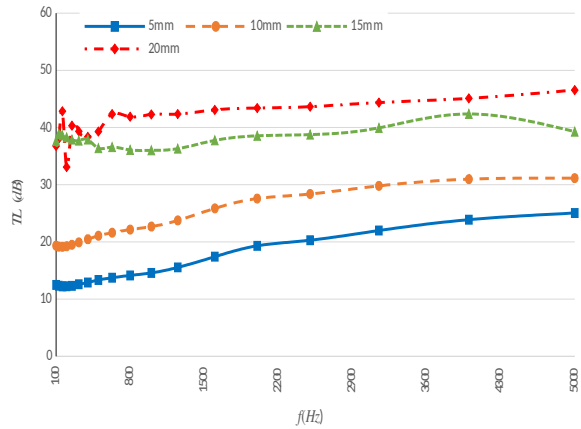
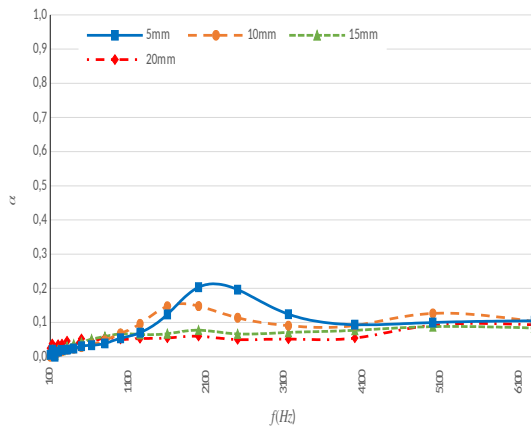
Üretilen örnek reçineli numuneler Şekil 4.19'da gösterilmiş olup, bu başlık altında farklı lif/reçine oranlarında ve kalınlıklarda üretilen numunelerin akustik özellikleri sunulmuştur.



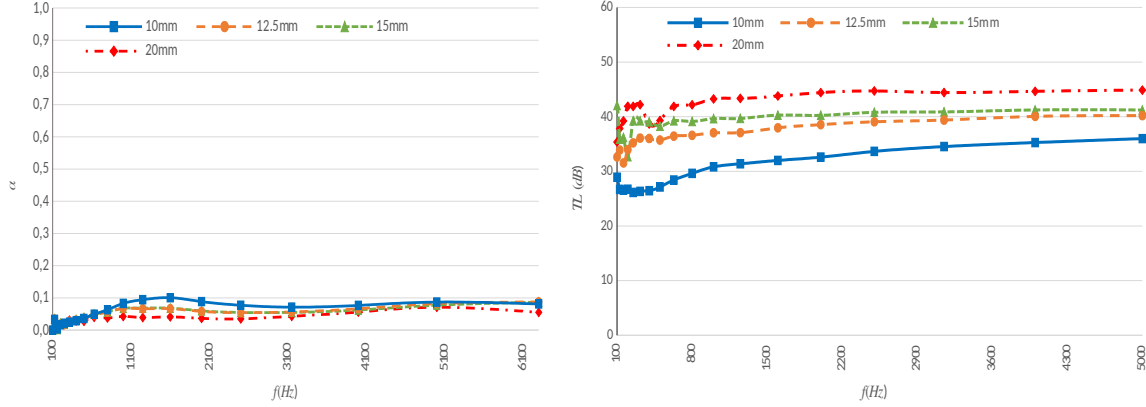
Şekil 4.19. Üretilen reçineli örnek numuneler: jüt (a), luffa (b) ve jüte-luffa-jüt veya JLJ (c)

### 4.2.1 Frekansa ve Kalınlığa Bağlı Değişen Akustik Özellikler

Farklı kalınlıklara sahip reçineli homojen jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitlerinin ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri Şekil 4.20 ve 4.21'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, bu jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitlerin ses yutma katsayıları görece düşüktür ve farklı kalınlıktaki numunelerin ses yutma katsayıları arasında önemli farklılıklar yoktur. Sonuçlar, bu numunelerdeki epoksi miktarının yüksek olduğunu, dolayısıyla oldukça yansıtıcı malzemeler elde edildiğini göstermektedir. Öte yandan, hem jüt hem de luffa lifi takviyeli kompozit numunelerinin iletim kaybı seviyeleri kalınlık ile artmaktadır. Genel olarak her iki kompozitin iletim kaybı seviyelerinin frekansla neredeyse doğrusal olarak arttığı görülmektedir.



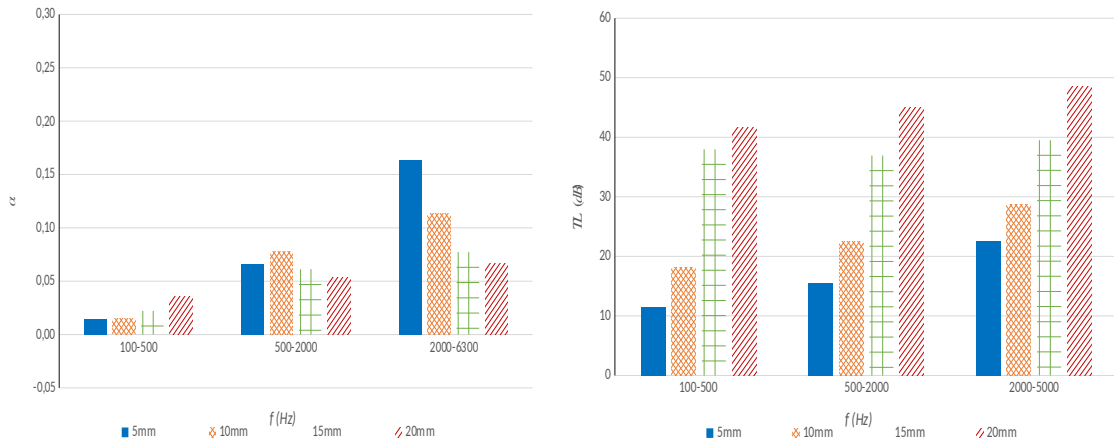
Şekil 4.20. Farklı kalınlıklara sahip reçineli jüt kompozit numunelerinin ses yutma katsayıları (sol) ve ses iletim kaybı seviyeleri (sağ) (numune yoğunluğu: 997.6 kg/m<sup>3</sup>, lif/epoksi oranı: 0.6)



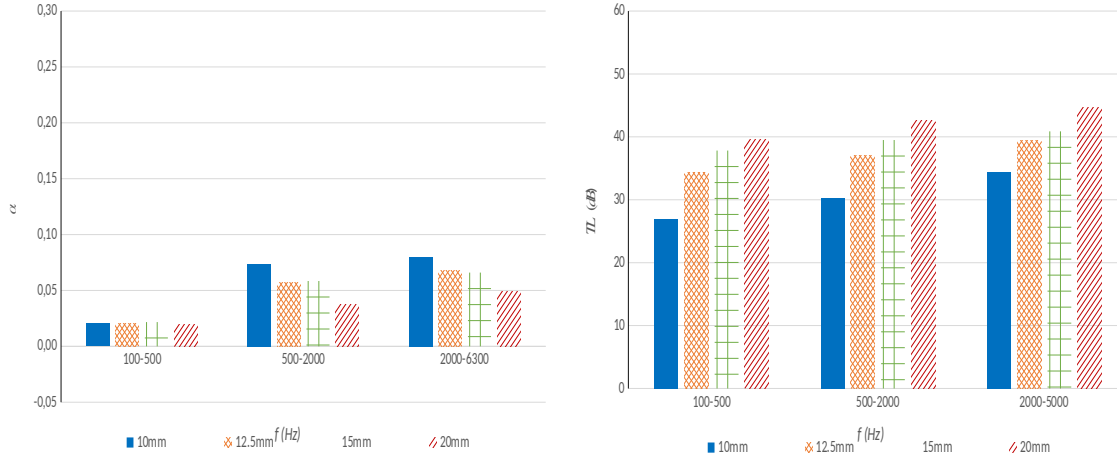
Şekil 4.21. Farklı kalınlıklara sahip reçineli luffa kompozit numunelerinin ses yutma katsayıları (sol) ve ses iletim kaybı seviyeleri (sağ) (numune yoğunluğu: 829.9 kg/m<sup>3</sup>, lif/epoksi oranı: 0.45)

#### 4.2.2 Düşük, Orta ve Yüksek Frekanslar için Akustik Özelliklerin Kalınlığa Bağlı Analizi

Düşük (100-500 Hz), orta (500-2000 Hz) ve yüksek (2000-5000 veya 2000-6300 Hz) frekanslar için farklı kalınlıklardaki reçineli jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitlerinin ortalama ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri Şekil 4.22 ve 4.23'te verilmiştir. İki malzemenin ses yutma katsayılarının frekansla artışı görülmekle birlikte, kalınlığın bu numunelerin ses yutma katsayıları üzerindeki etkisinin çok olmadığı görülmektedir. Öte yandan, ses iletim kaybı seviyeleri kalınlıkla artmakta olup, bunların frekansla artımı düşüktür.

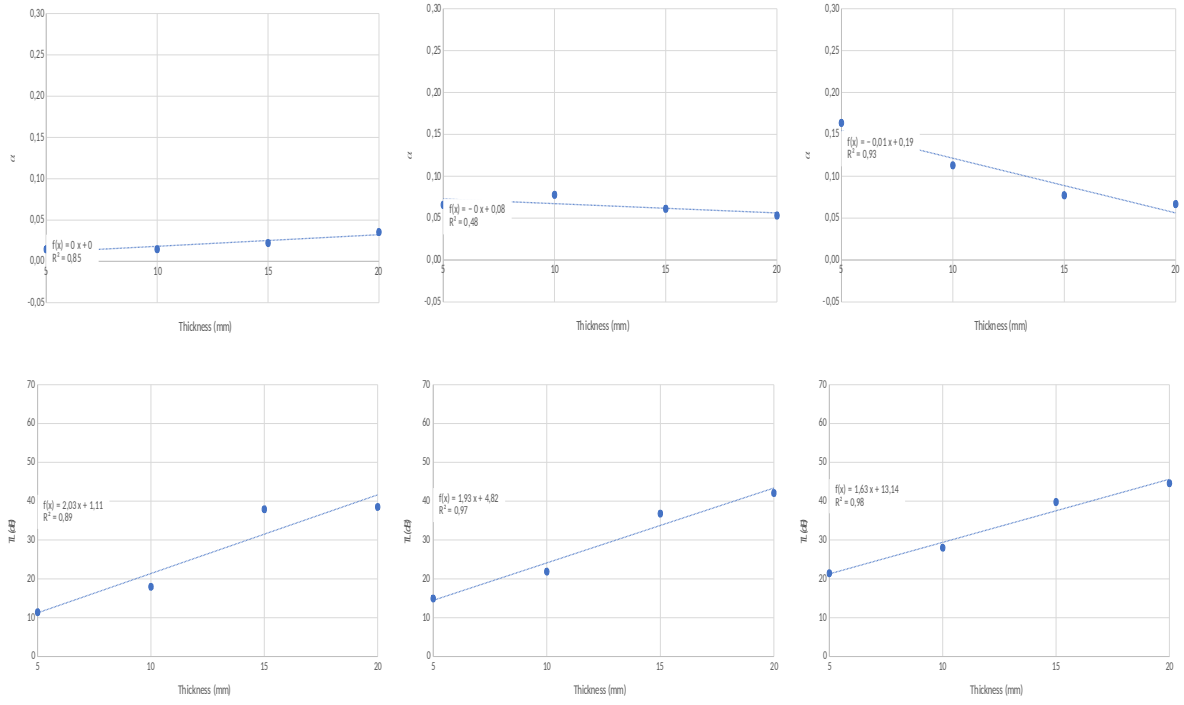


Şekil 4.22. Farklı kalınlıklara sahip reçineli jüt kompozit numunelerinin düşük, orta ve yüksek frekans aralıkları için ses yutma katsayıları (sol) ve ses iletim kaybı seviyeleri (sağ) (numune yoğunluğu: 997.6 kg/m<sup>3</sup>, lif/epoksi oranı: 0.6)

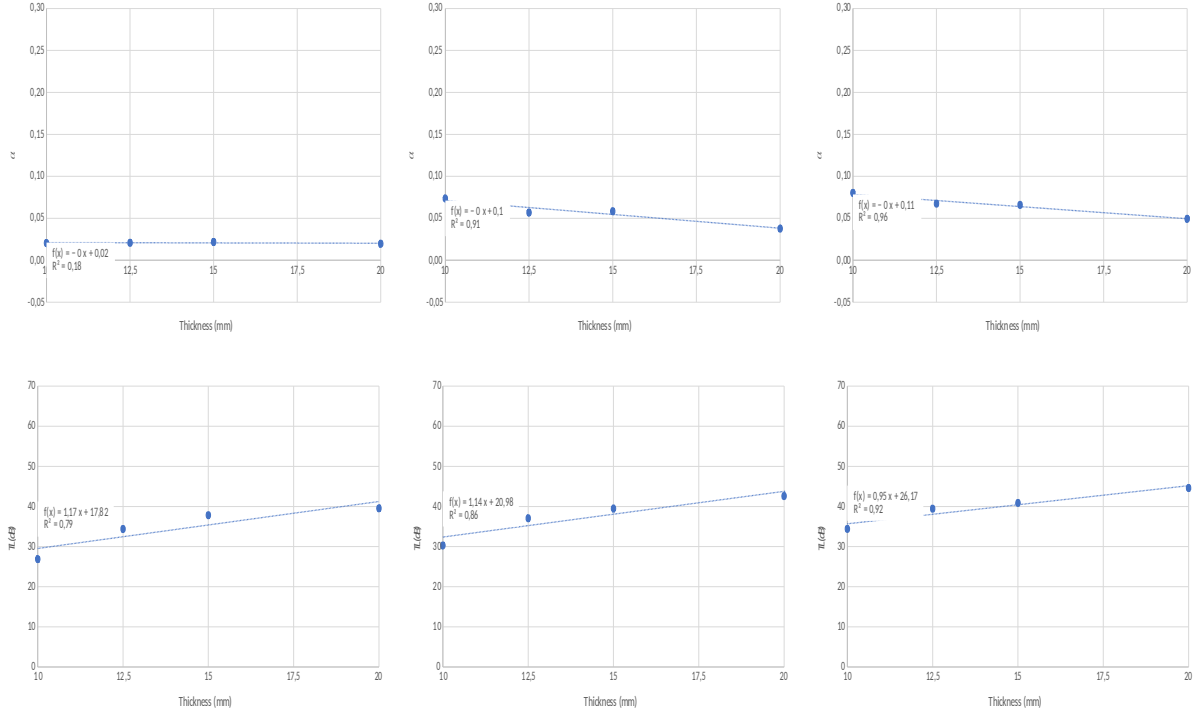


Şekil 4.23. Farklı kalınlıklara sahip reçineli luffa kompozit numunelerinin düşük, orta ve yüksek frekans aralıkları için ses yutma katsayıları (sol) ve ses iletim kaybı seviyeleri (sağ) (numune yoğunluğu: 829.9 kg/m<sup>3</sup>, lif/epoksi oranı: 0.45)

Farklı frekans aralıkları için reçineli jüt ve luffa lifi takviyeli malzemelerinin ses yutma ve iletim kaybının kalınlığa bağlı eğilimlerini net bir şekilde belirlemek için, farklı kalınlıklar için homojen jüt ve luffa lif malzemelerinin düşük (100-500 Hz), orta (500-2000 Hz) ve yüksek ( $\alpha$  için 2000-6300 Hz ve TL için 2000-5000 Hz) frekans aralıkları için ortalama sonuçları ve korelasyon katsayıları  $R$  ile birlikte ölçülen verilere uyan birinci dereceden eğriler Şekil 4.24 ve 4.25'te verilmiştir. İki kompozit için de, düşük frekans aralığında, kalınlık arttıkça ses yutma katsayılarının biraz arttığı veya değişmediği, orta frekans aralığında kalınlık ile değişmediği veya çok az azaldığı, yüksek frekans aralığında kalınlık ile biraz azaldığı görülmektedir. Öte yandan, iletim kaybı seviyeleri, tüm frekans aralıkları için kalınlıkla neredeyse doğrusal olarak artmaktadır. Sonuçlar, kalınlık artışı ile ses yutma katsayılarında bazı küçük farklılıklar olmasına rağmen, bu numunelerdeki epoksi miktarının yüksek olduğu, dolayısıyla oldukça yansıtıcı malzemelerin elde edildiğini ve ses yutma katsayılarının düşük olduğunu göstermektedir. Şekil 4.24 ve 4.25'teki birinci dereceden eğriler kullanılarak jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitlerin farklı kalınlıklardaki akustik özellikleri tahmin edilebilir.



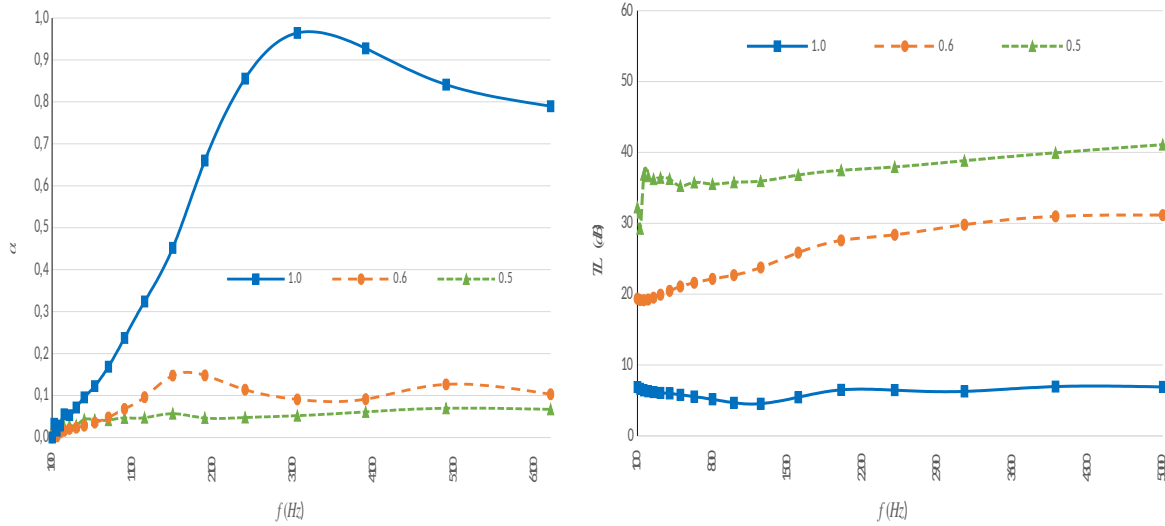
Şekil 4.24. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçineli homojen jüt kompozit numunelerinin ortalama ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu:  $997.6 \text{ kg/m}^3$ , lif/epoksi oranı: 0.6)



Şekil 4.25. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı kalınlıklara sahip reçineli homojen luffa kompozit numunelerinin ortalama ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri (numune yoğunluğu:  $829.9 \text{ kg/m}^3$ , lif/epoksi oranı: 0.45)

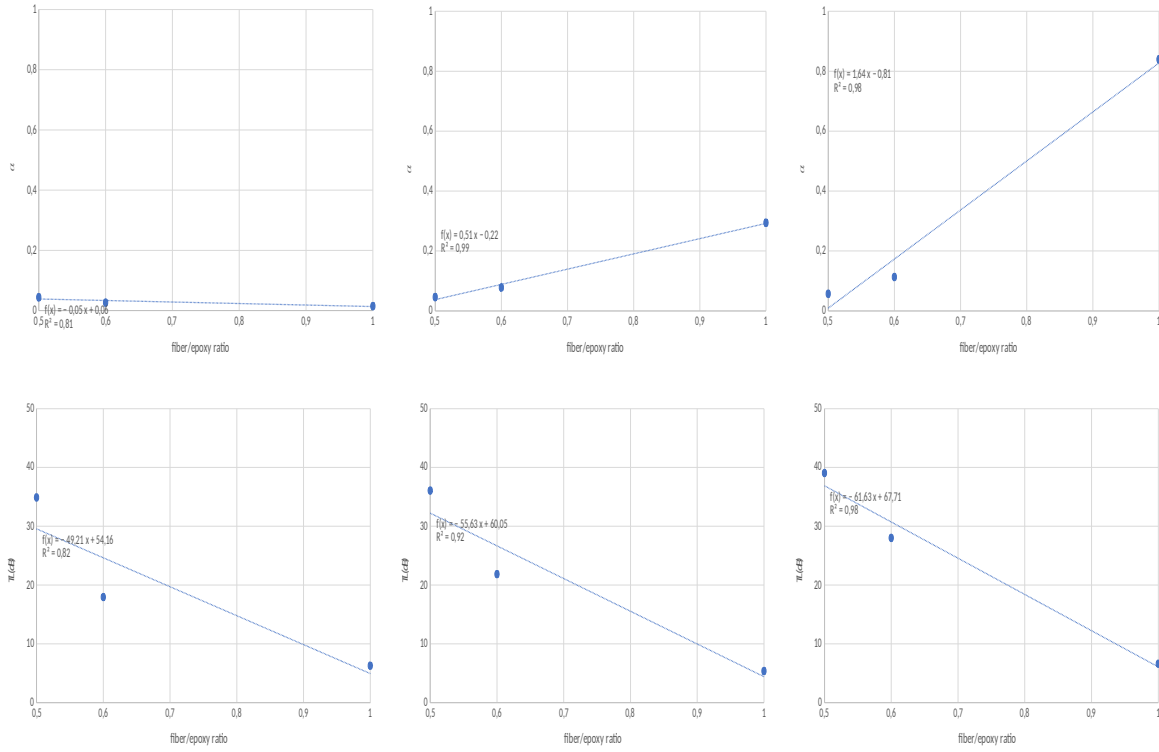
#### 4.2.3 Lif/Reçine Oranın Akustik Özelliklere Etkisi

Farklı lif/epoksi oranlarına (1.0, 0.6 ve 0.5) sahip jüt kompozit numunelerin akustik özellikleri Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Burada 1.0, 0.6 ve 0.5 lif/epoksi oranları için numune yoğunlukları sırasıyla 420, 998 ve 1020 kg/m<sup>3</sup>tür. Jüt lif takviyeli epoksi kompozit numunelerin epoksisiz jüt lif numunelerine göre çok daha düşük ses yutma katsayılarına sahip olduğu görülmektedir. Reçinesiz jüt lif numuneleri ise gözenekli yapıları nedeniyle en düşük iletim kayıplarına sahiptir. Düşük (100-500 Hz), orta (500-2000 Hz) ve yüksek ( $\alpha$  için 2000-6300 Hz ve TL için 2000-5000 Hz) frekanslar ve farklı lif/epoksi oranları için jüt numunelerinin ortalama akustik sonuçları ve korelasyon katsayıları  $R$  ile birlikte ölçülen verilere uyan birinci dereceden eğriler Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Artan lif/epoksi oranı ile ses yutma katsayılarının arttığı ve ses iletim kayıplarının hemen hemen tüm frekans aralıklarında azaldığı görülmektedir.



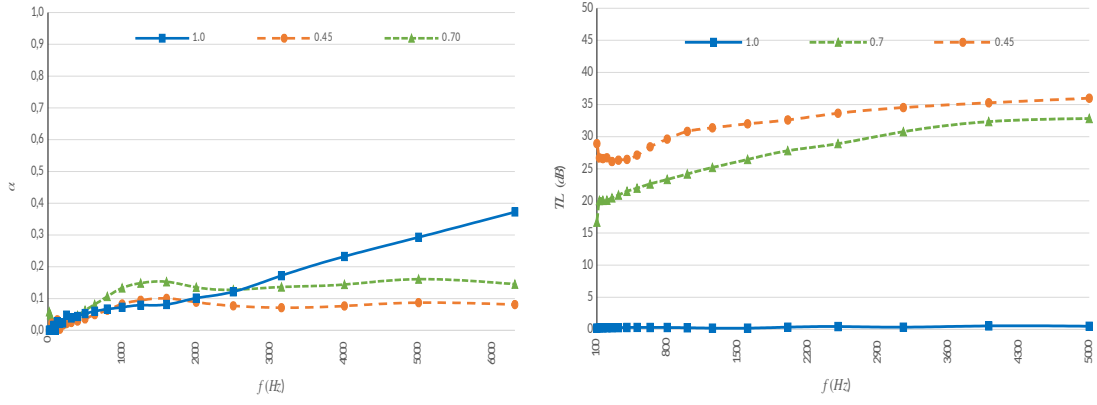
Şekil 4.26. Farklı lif/epoksi oranlarına sahip homojen jüt kompozit numunelerinin ses yutma katsayıları (sol) ve iletim kaybı seviyeleri (sağ)



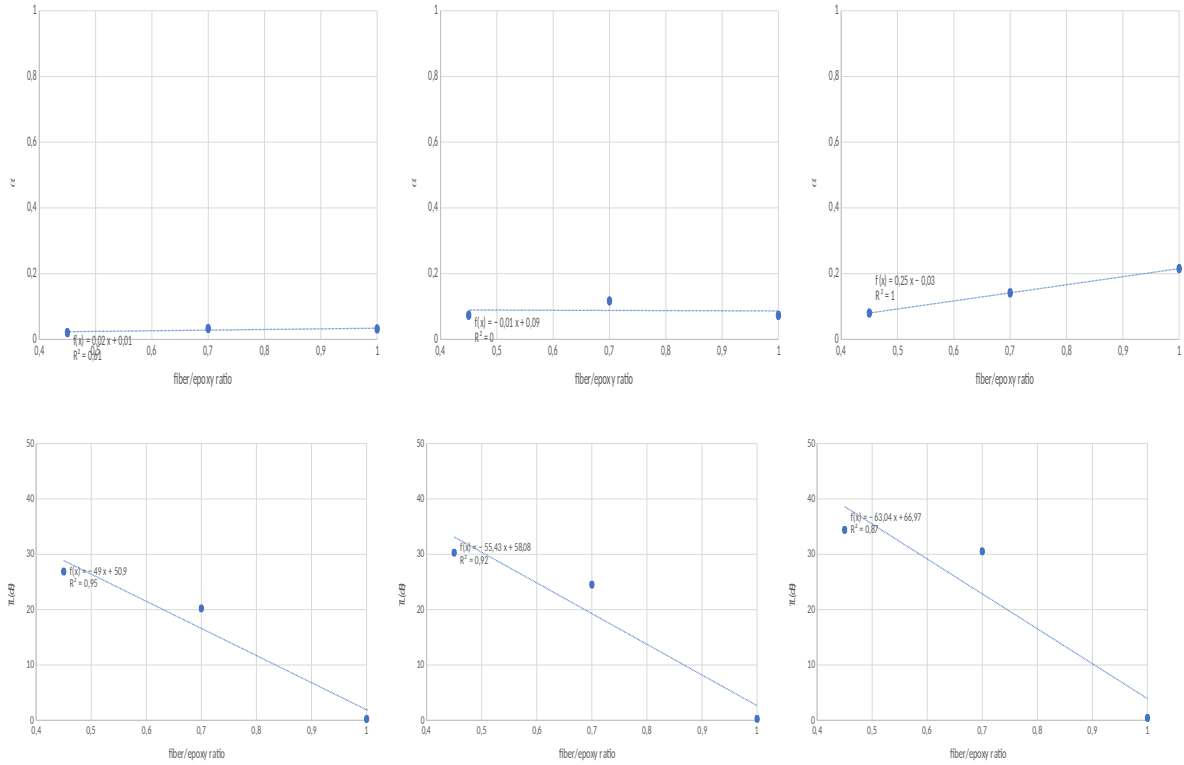


Şekil 4.27. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı lif/epoksi oranlarına sahip jüt kompozit numunelerinin ortalama ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri

Farklı lif/epoksi oranlarına (1.0, 0.7 ve 0.45) sahip luffa lifi takviyeli kompozit numunelerin ses yutma katsayıları ve ses iletim kayıpları Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Numunelerin kalınlığı yaklaşık 10 mm'dir. 1.0, 0.7 ve 0.45 için numune yoğunlukları sırasıyla 74, 830 ve 670 kg/m<sup>3</sup>'tür. Farklı lif/epoksi oranları için jüt numunelerinin düşük (100-500 Hz), orta (500-2000 Hz) ve yüksek ( $\alpha$  için 2000-6300 Hz ve TL için 2000-5000 Hz) frekans aralıklarındaki ortalama akustik sonuçları ve korelasyon katsayıları  $R$  ile birlikte ölçülen verilere uyan birinci dereceden eğriler Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Artan fiber/epoksi oranı ile hemen hemen tüm frekans aralıklarında ses yutma katsayılarının arttığı ve ses iletim kayıplarının azaldığı görülmektedir. Şekil 4.27 ve 4.29'daki birinci dereceden eğriler kullanılarak jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitlerin farklı lif/epoksi oranlarındaki akustik özellikleri tahmin edilebilir.



Şekil 4.28. Farklı lif/epoksi oranlarına sahip homojen luffa kompozit numunelerinin ses yutma katsayıları (sol) ve iletim kaybı seviyeleri (sağ)

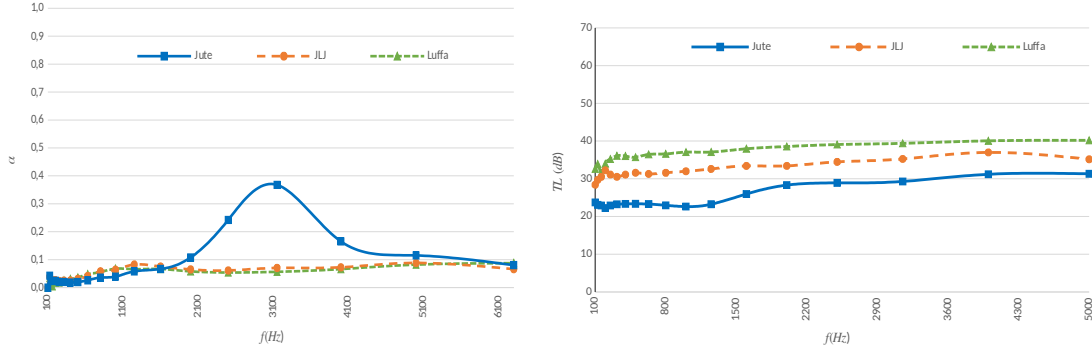


Şekil 4.29. Düşük (a ve d), orta (b ve e) ve yüksek (c ve f) frekans aralıkları için farklı lif/epoksi oranlarına sahip luffa kompozit numunelerinin ortalama ses yutma katsayıları ve iletim kaybı seviyeleri

#### 4.2.4 Homojen ve Hibrit Numunelerin Akustik Özelliklerin Karşılaştırılması

Reçineli homojen jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitlerinin ve hibrit JLJ numunelerinin akustik özellikleri Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Burada numunelerin lif/epoksi oranı ve kalınlıkları sırasıyla 0.5 ve 12.5 mm civarındadır. Jüt, luffa ve hibrit numunelerin yoğunlukları

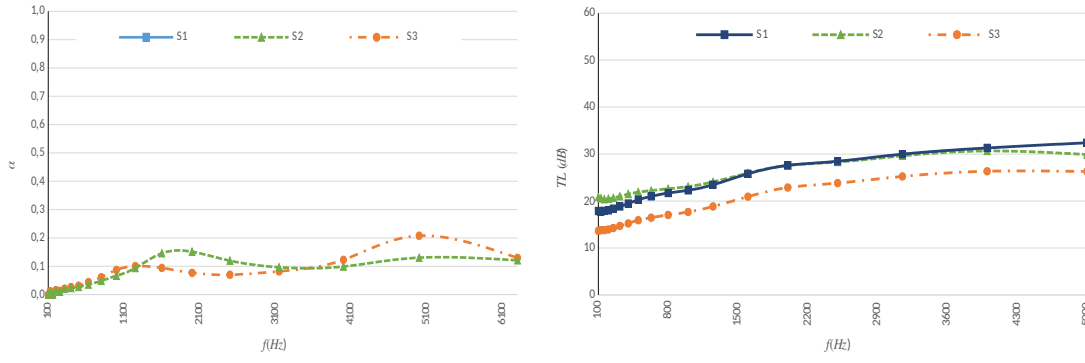
sırasıyla 1040, 830 ve 890 kg/m<sup>3</sup> civarındadır. Jüt kompozit numunesinin, yakalanan rezonans tepesi nedeniyle, 2000-5000 Hz arasında görece daha yüksek ses yutma katsayılarına sahip olduğu görülmektedir. Diğer frekans aralıklarında bu üç tip kompozitin ses yutma katsayısı değerleri birbirine oldukça yakındır. İletim kaybı seviyeleri, her üç yapı için de, frekansla artmaktadır. JLJ'nin iletim kaybı seviyelerinin, beklendiği gibi, jüt ve luffa numunelerinin iletim kaybı seviyeleri arasında olduğu görülmektedir.



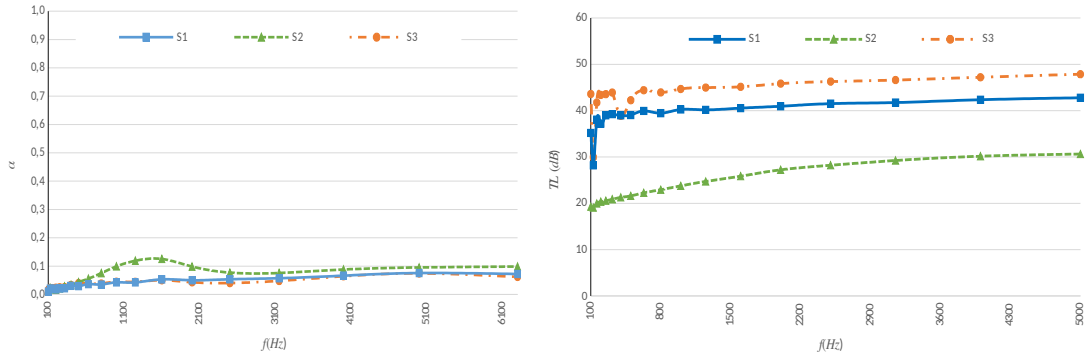
Şekil 4.30. Reçineli jüt, luffa ve hibrit jüt-luffa-jüt numunelerinin ses yutma katsayıları (sol) ve iletim kaybı seviyeleri (sağ)

#### 4.2.5 Biyokompozitlerin Üretimi ve Test Edilmeleriyle İlgili Zorluklar

Aynı doğal malzemeden yapılmış nominal olarak özdeş doğal lif takviyeli kompozit numunelerin bile akustik özellikleri oldukça farklı olabilir. İki durum için sonuçlar Şekil 4.31 ve 4.32'de gösterilmiştir. Sonuçlar, Şekil 4.31'deki üç numune için ses yutma katsayılarındaki ve ses iletim kayıplarındaki ortalama sapmaların sırasıyla yaklaşık 0.015 ve 3 dB olduğunu göstermektedir. Öte yandan, Şekil 4.32'deki üç numunenin ses yutma katsayılarındaki ve ses iletim kayıplarındaki ortalama sapmalar sırasıyla 0.017 ve 10 dB'dir. Şekil 4.31'deki nominal olarak özdeş üç numune için akustik sonuçların birbirine yakın olduğu ve Şekil 4.32'deki numunelerin ses iletim kayıplarındaki varyasyonların çok büyük olduğu açıktır. Burada, nominal özelliklerden çok büyük sapmalar gösterebilecek numuneler elde etmenin oldukça mümkün olduğu görülmektedir. Sapmaların üç ana nedeni, liflerin özelliklerinin değişkenliği, üretim sürecinin doğruluğu ve test numunelerinin çapı ile empedans tüpünün iç çapı arasındaki uyumsuzluk olarak düşünülmektedir. Bunlar aşağıda açıklanmıştır. Akustik özellikleri büyük değişkenlikler gösteren yapıların sonuçları bu raporda sunulmamıştır.



Şekil 4.31. Nominal olarak özdeş üç adet reçineli jüt kompozit numunesinin (fiber/epoksi oranı: 0.6, numune yoğunluğu: 997.6 kg/m<sup>3</sup>, kalınlık: 10 mm) ses yutma katsayıları (sol) ve iletim kaybı seviyeleri (sağ)



Şekil 4.32. Nominal olarak özdeş üç adet jüt kompozit numunesinin (fiber/epoksi oranı: 0.5, numune yoğunluğu: 1019.8 kg/m<sup>3</sup>, kalınlık: 13 mm) ses yutma katsayıları (sol) ve iletim kaybı seviyeleri (sağ)

Kimyasal bazlı liflerin aksine, bir gruptaki her doğal lifin farklı bireysel mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olabileceği bilinmektedir, bu nedenle doğal lif takviyeli kompozitlerin akustik özelliklerinde bazı varyasyonların beklenir. Dahası, doğal lif bazlı yapılar için üretim yöntemleri günümüzde çok büyük hassasiyete sahip değildir. Örneğin, epoksi, imalat sırasında kompozit plakanın bazı bölgelerinde birikebilir. Bu sorundan dolayı önceki bölümlerde sunulanlardan daha düşük epoksi oranlarına sahip numunelerin bu proje kapsamında üretilmediği belirtilmelidir. Ayrıca, imalat sırasında numunenin çeşitli bölgelerinde bazı boşluklar olabilir. Bu nedenle, nominal olarak özdeş numunelerin ölçülen akustik özellikleri, epoksi birikimi ve üretilen kompozit plakaların farklı bölümlerinde oluşan boşluklar nedeniyle, farklılıklar gösterebilir.

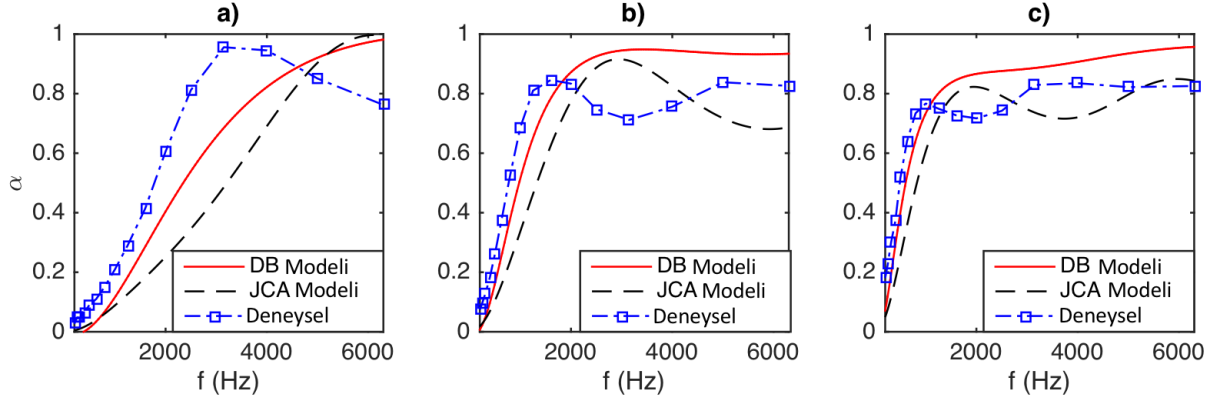
Bir diğer önemli nokta da, güvenilir akustik özellikleri ölçmek için test numunesinin empedans tüpüne uygun şekilde oturması gerektiğidir (ASTM E1050-12, 2012; ASTM

E2611-17, 2017). Ancak pratikte test numunesinin çapı tüpün iç çapından biraz daha düşük ve daha yüksek olabilir. Daha düşük bir numune çapı, daha yüksek ses yutma katsayıları ve daha düşük ses iletim kayıpları ile sonuçlanır. Daha yüksek çaplı bir numune sıkıştırılacak ve tüpe sığması için itilecektir, dolayısıyla akustik özellikleri değişecek ve çoğunlukla ölçülen verilerde bazı istenmeyen tepeler meydana gelecektir. Bu nedenle, tüpün çapından daha küçük çaplı numuneler hazırlanır ve standartlarda önerildiği gibi numunelerin etrafına vazelin gibi malzemeler sürülür (ASTM E1050-12, 2012; ASTM E2611-17, 2017). Bu çalışmada aynı prosedür uygulanmıştır. Bununla birlikte, beklenebileceği gibi, mükemmel bir uyum her zaman mümkün değildir, bu nedenle bu durum ölçülen akustik özelliklerde bir miktar belirsizliğe yol açar. Bu bölümde bahsedilen üç sorunun, doğal lif takviyeli kompozitlere özgü olduğu ve pratikte hemen hemen her zaman karşılaşıldığı belirtilmelidir.

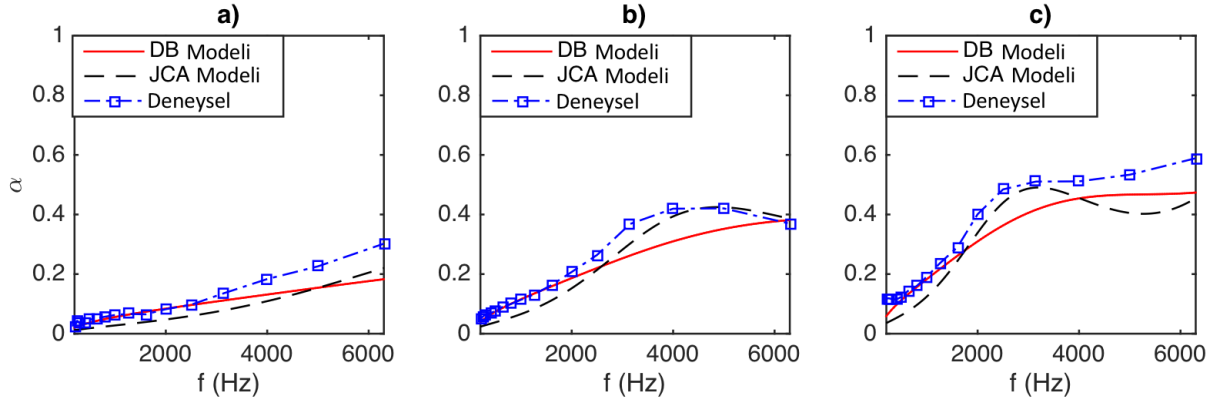
#### 4.3 Akustik Özelliklerin Teorik Olarak Tahmin Edilmesi

Deneyel verilere uydurulan eğriler (ampirik modeller) kullanılarak, farklı bir kalınlık ve lif/epoksi oranı için jüt ve luffa (kabak lifi) kompozitlerinin akustik özellikleri tahmin edilebilir. Burada, bu basit ampirik modellere ek olarak, jüt ve luffa liflerine dayalı yapıların akustik özellikleri, daha önce 3. Bölüm'de açıklanan teorik modeller kullanılarak tahmin edilmiştir.

Akustik deneyler sırasında sıcaklık ve hava basıncı sırasıyla 20-25 °C ve 101 kPa idi ve evrensel gaz sabiti  $287 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$  olarak alındı. Burada belirtmek gerekir ki jüt numunelerinin lif ve numune yoğunlukları sırasıyla 920 ve 420  $\text{kg/m}^3$ , jüt liflerinin ortalama çapları 70-100  $\mu\text{m}$  dir (Bansod vd., 2016; Bevitori vd., 2010). Luffa numunelerinin lif ve numune yoğunlukları sırasıyla 485 ve 74  $\text{kg/m}^3$  olup, luffa liflerinin ortalama çapı 200-250  $\mu\text{m}$  civarındadır (Demir ve Deveci, 2018; Kaewtatip ve Thongmee, 2012). Bu sayısal değerler kullanılarak, Delany-Bazley (DB) ve Johnson-Champoux-Allard (JCA) modelleri için gerekli akış direnci gibi parametreler, Bölüm 3.2.3'teki ve (Hosseini Fouladi vd., 2011; Johnson vd., 1987; Kino, 2015; Kino ve Ueno, 2008) kaynaklarındaki ifadeler kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçta, 10, 20 ve 30 mm kalınlık değerlerine sahip jüt ve luffa numuneleri için deneysel ve DB ve JCA modelleri kullanılarak tahmin edilen ses yutma katsayıları Şekil 4.33 ve 4.34'te verilmiştir. En basit DB modelinin bile, özellikle luffa lif bazlı yapılar için, genel olarak ses yutma seviyelerini başarılı bir şekilde tahmin edebildiği görülmektedir. Hesaplamalarda daha doğru akış direnci (veya fiber çapı) değerleri kullanılarak ses yutma katsayıları tahminlerinin iyileştirilebileceği unutulmamalıdır. Genel olarak, bu sonuçlar hem DB modelimin hem de JCA modelinin jüt ve luffa yapılarını üretmeden önce tasarım amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir.



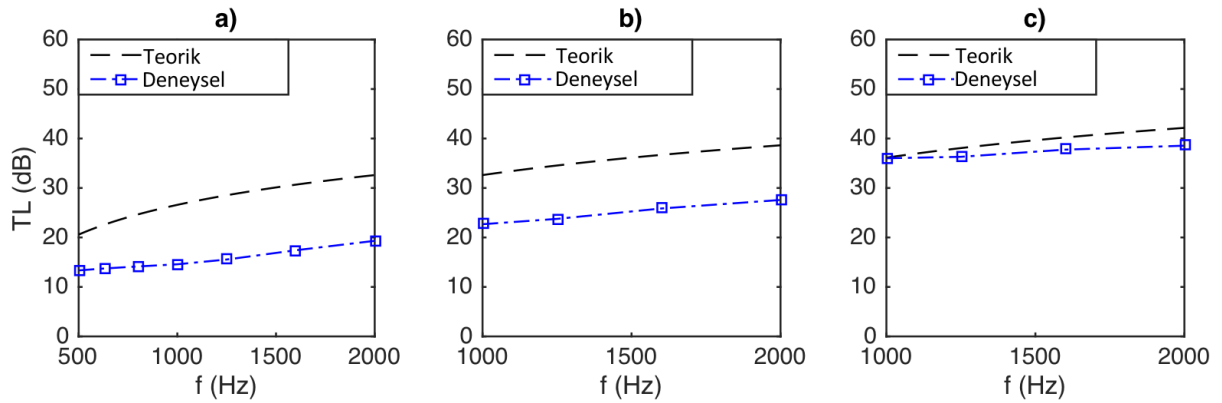
Şekil 4.33. (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm kalınlıktaki jüt numuneleri için deneysel ve Delany-Bazley (DB) ve Johnson-Champoux-Allard (JCA) modelleri kullanılarak tahmin edilen ses yutma katsayıları



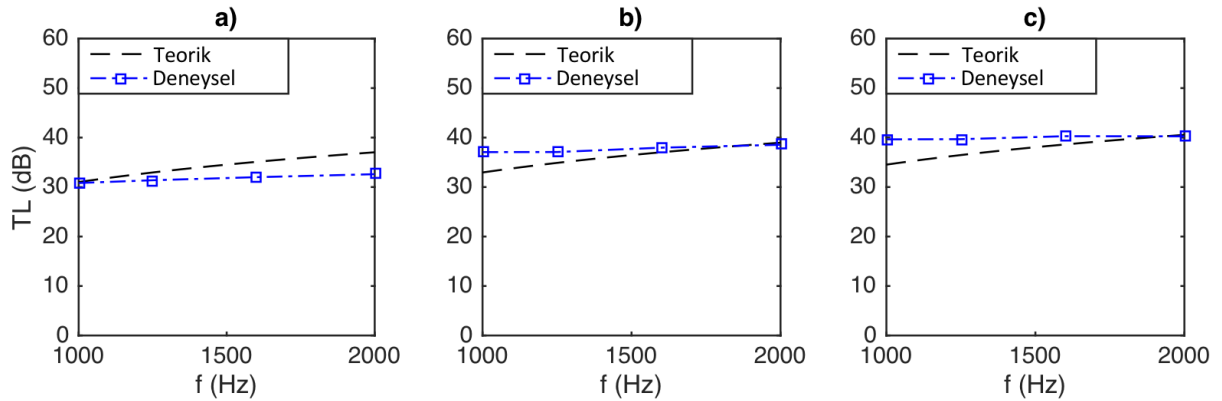
Şekil 4.34. (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm kalınlıktaki luffa (kabak lifi) numuneleri için deneysel ve Delany-Bazley (DB) ve Johnson-Champoux-Allard (JCA) modelleri kullanılarak tahmin edilen ses yutma katsayıları

Buradaki jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit plakaların elastisite modülleri bir sonraki bölümde sunulduğu gibi sırasıyla yaklaşık 5 ve 3 GPa'dır. Bu nedenle, daha önce Bölüm 3.2.3'te verilen denklemler kullanılarak 5-15 mm kalınlığındaki jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit plakalar için kritik frekansların yaklaşık 5500-2000 Hz olduğu hesaplanabilir. Daha önce sunulan deneysel ses iletim kaybı eğrilerinde, rezonanslarla ilgili dalgalanmaların jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitler için 1000 Hz'den daha az olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, Bölüm 3.2.3'teki ses iletim kaybı denklemi kullanılarak 5-15 mm kalınlığındaki jüt (lif/epoksi oranı: 0.60, numune yoğunluğu: 997.6 kg/m<sup>3</sup>) ve luffa (lif/epoksi oranı: 0.45, numune yoğunluğu: 829.9 kg/m<sup>3</sup>) kompozit numunelerin 1000-2000 Hz için tahmin edilen ses iletim kaybı değerleri Şekil 4.35 ve 436'da verilmiştir. Görüldüğü gibi, 5 ve 10 mm kalınlığındaki jüt kompozit numuneler için, deneysel olarak belirlenen iletim kaybı seviyeleri teorik olarak

tahmin edilen değerlerden daha düşüktür (yaklaşık 10 dB kadar), ancak 15 mm kalınlığındaki numunelerin deneysel ve teorik sonuçları birbirine oldukça yakındır. Luffa lifi takviyeli kompozit numunelerin deneysel ve teorik iletim kaybı seviyeleri, üç kalınlık değeri için birbirine yakındır. Doğal lif takviyeli kompozit yapıların, çelik plakalar gibi tipik malzemelerden farklı olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle burada kullanılan temel matematiksel modelin biyokompozit numunelerin iletim kaybı seviyelerini yüksek doğrulukla tahmin etmesi beklenmemektedir. Sonuç olarak, burada kullanılan model, özellikle ön tasarım aşamasında, doğal lif takviyeli yapıların ses iletim kayıplarını tahmin etmek için kullanılabilir.



Şekil 4.35. (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 mm kalınlıktaki jüt numuneleri için deneysel ve teorik olarak tahmin edilen ses iletim kayıpları



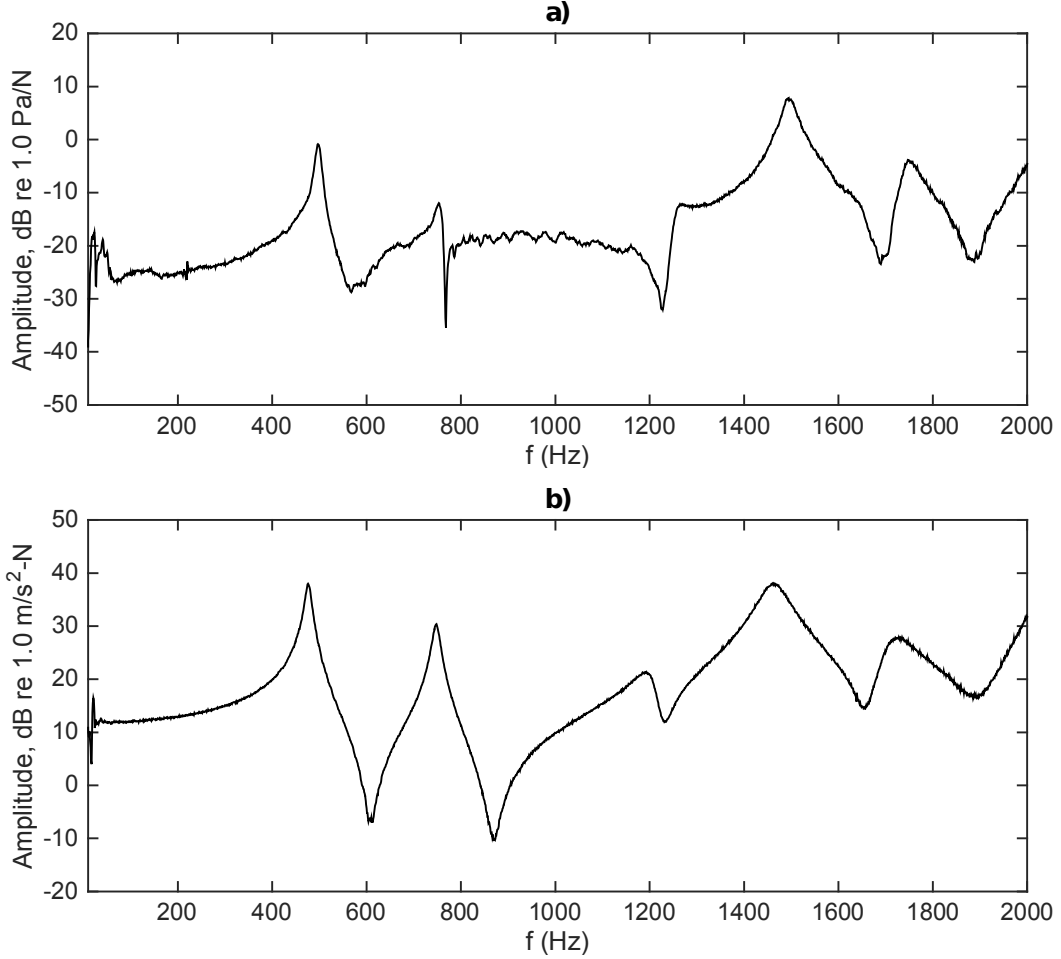
Şekil 4.36. (a) 10, (b) 12.5 ve (c) 15 mm kalınlıktaki luffa lifi takviyeli kompozit numuneleri için deneysel ve teorik olarak tahmin edilen ses iletim kayıpları

## 4.3 Mekanik Özellikler

### 4.3.1 Modal Parametrelerin Belirlenmesi

Daha önce belirtildiği gibi kompozit plakaların modal parametreleri ölçülen FTF'ler ve daire-uydurma yöntemi kullanılarak belirtilmiştir. Doğal frekanslar ölçülen akustik FTF'ler ve

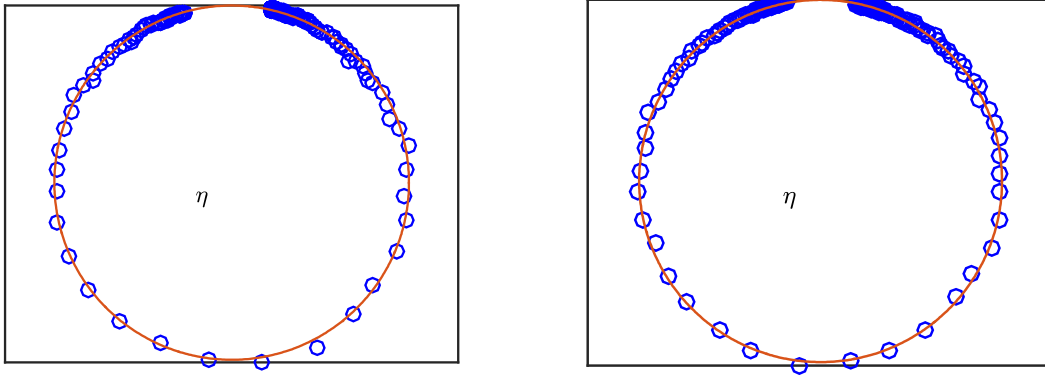
sönüm oranları ölçülen yapısal FTF'ler kullanılarak belirlenmiştir. Homojen bir jüt plaka (burada J2, Tablo 3.1'e bakınız) üzerinde ölçülen örnek akustik ve yapısal FTF'ler Şekil 4.37'de gösterilmiştir. İlgili frekans aralığında beş mod olduğu ve Şekil 4.37'deki akustik ve yapısal FTF'ler ile aynı modların yakalandığı görülmektedir.



Şekil 4.37. Homojen kompozit bir jüt plaka (burada J2, Tablo 3.1'e bakınız) üzerinde ölçülen örnek (a) akustik ve (b) yapısal FTF'lerin frekansa bağlı genlik (amplitude) değerleri

Daire-uydurma yöntemi kullanımına ilişkin olarak, Şekil 4.38'de homojen bir jüt kompozit plakanın (burada J2, Tablo 3.1'e bakınız) iki modu için elde edilen daireler verilmiştir. Verilerin çok temiz (gürültüsüz vb.) olduğu ve ham verilere mükemmel bir uyum sağladığı görülmektedir.





Şekil 4.38. Homojen kompozit bir jüt plakanın (burada J2, Tablo 3.1'e bakınız) birinci (a) ve ikinci (b) modları için daire-uydurma prosedürü

Sonuçta, ölçülen akustik FTF'ler ve daire-uydurma yöntemi kullanılarak belirlenen on iki kompozit plakanın doğal veya modal frekansları Tablo 4.1'de listelenmiştir. Daha sonra, malzemelerin elastik özellikleri Tablo 4.1'deki doğal frekanslar kullanılarak belirlenecektir.

Tablo 4.1. Ölçülen akustik FTF'ler ve daire-uydurma yöntemi kullanılarak belirlenen on iki kompozit plakanın doğal veya modal frekansları

Numune No	Numune İsmi	Mod Numarası				
		1	2	3	4	5
Doğal Frekans (Hz)						
1	J1	185.3	211.2	469.8	514.1	824.2
2	L1	117.1	163.1	320.9	352.4	585.3
3	JLJ1	142.3	158.8	354.8	395.3	627.3
4	LJL1	121.8	167.2	332.4	357.3	598.6
5	J2	500.5	759.3	1256.4	1498.2	1747.4
6	L2	757.7	929.9	1689.7	1700.1	2102.3
7	JLJ2	584.3	923.1	1458.3	1663.2	1940.1
8	J3	966.3	1505.3	2309.8	2781.6	3142.5
9	L3	515.6	619.7	1180.7	1214.9	1489.9
10	J4	541.2	837.1	1342.2	1620.5	1876.3
11	J5	901.2	1220.8	2117.5	3066.9	3129.4
12	L4	785.8	792.5	1721.9	2082.7	2143.2

#### 4.3.2 Sönüm Değerleri

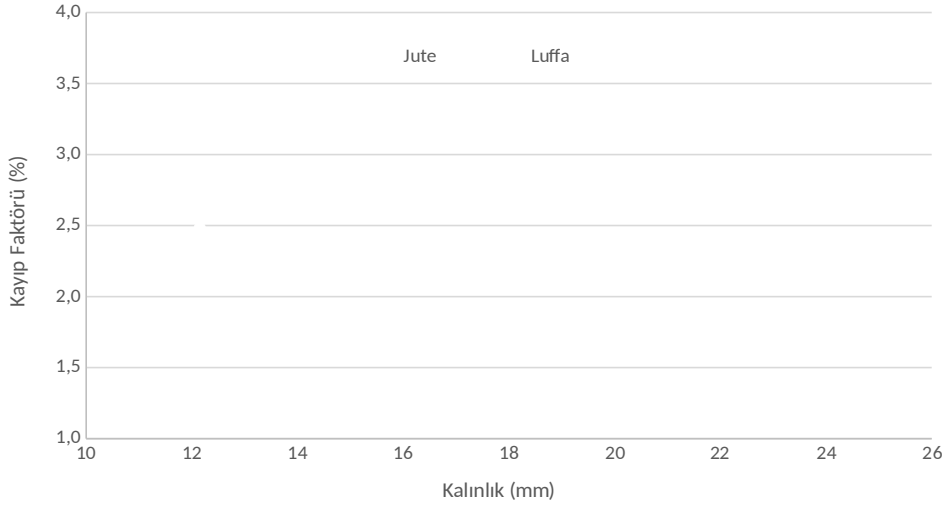
Ölçülen yapısal FTF'ler ve daire-uydurma yöntemi kullanılarak on iki kompozit plakanın belirlenen kayıp faktörleri veya modal sönüm değerleri Tablo 4.2'de listelenmiştir. İkiyden yüksek modların kayıp faktörleri iyi bir hassasiyet ile belirlenemediği için sadece ilk iki

mod için kayıp faktörleri Tablo 4.2'de listelenmiştir. Birinci ve ikinci modların kayıp faktörleri arasında çok fazla fark olmadığı görülmektedir. İlk iki modun frekansları birbirine yakın olduğu için, bu iki modun kayıp faktörleri arasında çok fazla fark olması beklenmemektedir.

Tablo 4.2. Ölçülen yapısal FTF'ler ve daire-uydurma yöntemi kullanılarak on iki kompozit plakanın belirlenen kayıp faktörleri veya modal sönüm değerleri

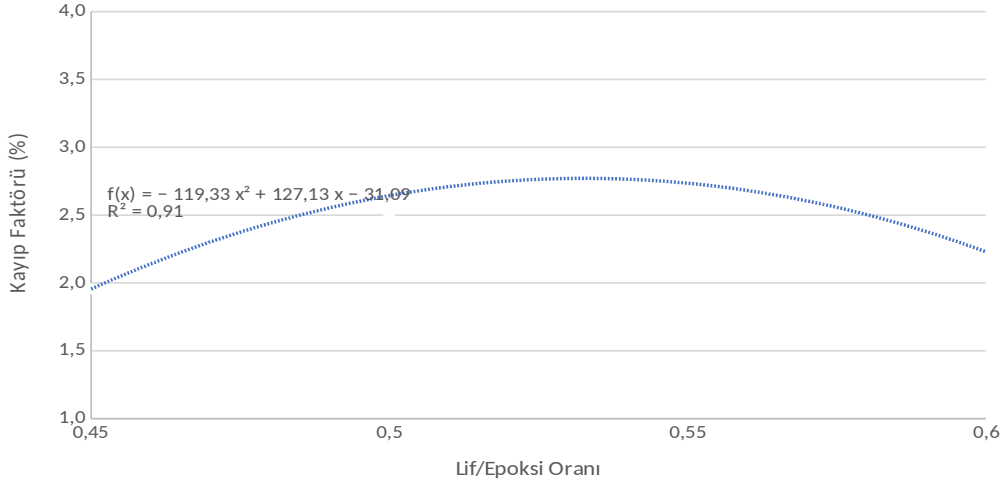
Numune No	Numune İsmi	Mod Numarası	
		1	2
		Kayıp Faktörü (%)	
1	J1	1.88	2.03
2	L1	2.74	2.67
3	JLJ1	2.44	2.17
4	LJL1	2.79	2.51
5	J2	2.73	2.24
6	L2	2.80	2.78
7	JLJ2	2.82	2.45
8	J3	2.83	2.60
9	L3	2.76	2.56
10	J4	2.36	2.10
11	J5	2.96	2.50
12	L4	3.29	3.05

Jüt ve luffa (kabak lifi) kompozitlerinin sönüm seviyelerine kalınlığın bir etkisinin olup olmadığını görmek için, homojen jüt (lif/epoksi oranı: 0.50) ve luffa (lif/epoksi oranı: 0.6) numunelerinin ortalama kayıp faktörü değerleri farklı kalınlıktaki plakalar için Şekil 4.39'da karşılaştırılmıştır. İnce ve kalın numuneler için sönüm seviyeleri birbirine yakın olmakla birlikte, kalın numuneler için sönümlenme seviyeleri biraz daha yüksektir. Bunun sebebi, kalın numuneler için kayma etkisinin daha fazla olması olabilir. Sonuç olarak, en azından buradaki test numuneleri için, farklı kalınlığa sahip plakaların sönüm seviyelerinde ciddi bir azalma veya artış olmadığı söylenebilir.

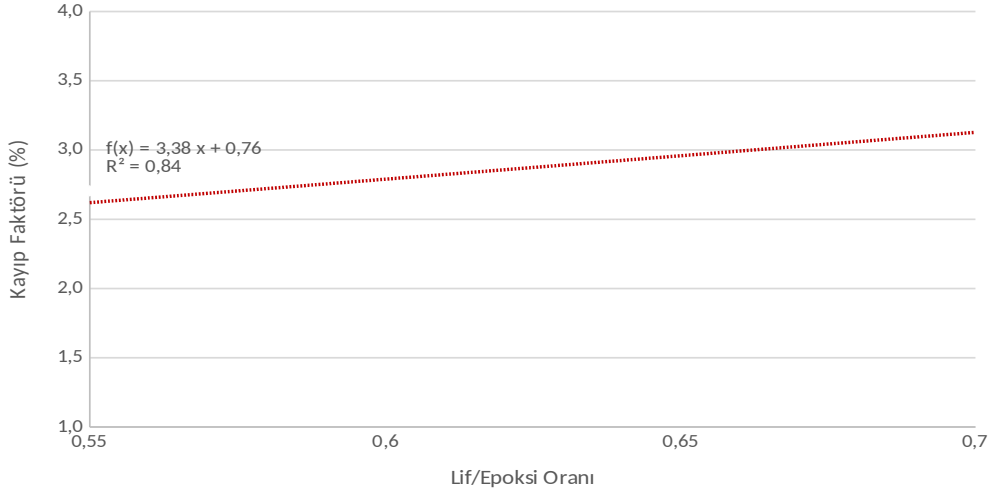


Şekil 4.39. Kalınlığın bir fonksiyonu olarak homojen jüt (lif/epoksi oranı: 0.50) ve luffa (lif/epoksi oranı: 0.6) numunelerinin ortalama kayıp faktörleri

Lif/epoksi oranının jüt malzemesinin sönüm seviyelerine etkisini ortaya çıkarmak için, farklı lif/epoksi oranlarına sahip homojen jüt numunelerinin ortalama kayıp faktörleri Şekil 4.40'de sunulmuştur. Verilen lif/epoksi oranları için, jüt numunelerinin sönüm değerleri ile lif/epoksi oranını arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu görülmektedir. Ölçülen verilere uydurulan ikinci dereceden polinom  $-119.33x^2 + 127.13x - 31.09$  şeklinde olup, korelasyon katsayısının karesi  $R^2 = 0.9142$  olarak çıkmaktadır. Farklı lif epoksi oranlarına sahip homojen luffa lifi takviyeli kompozit numunelerin ortalama kayıp faktörleri Şekil 4.41'de gösterilmiştir. Verilen lif/epoksi oranları için, luffa lifi takviyeli kompozit plakaların sönüm seviyeleri, lif/epoksi oranı ile hemen hemen doğrusal bir artış göstermektedir. Ölçülen verilere uydurulan birinci dereceden eğri  $3.3842x + 0.7584$  şeklinde olup, korelasyon katsayısının karesi  $R^2 = 0.841$  olarak çıkmaktadır. Luffa lifi takviyeli kompozitlerin sönüm seviyeleri, jüt kompozitlerinin sönüm seviyelerinden biraz daha yüksektir. Farklı lif/epoksi oranları için jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitlerin sönüm seviyelerini tahmin etmek için Şekil 4.40 ve 4.41'deki eğriler (ampirik modeller) kullanılabilir.



Şekil 4.40. Lif/epoksi oranına bağlı homojen jüt plakaların ortalama kayıp faktörü değerleri ve ölçülen verilere uydurulan eğri



Şekil 4.41. Lif/epoksi oranına bağlı homojen luffa plakaların ortalama kayıp faktörü değerleri ve ölçülen verilere uydurulan eğri

#### 4.3.2 Elastik Özellikler

Daha önce de belirtildiği gibi, homojen kompozit plakaların modal parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesinden sonra, aynı yapılar Abaqus yazılımında (Dassault Systems, Fransa) sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiş ve bu yapıların modal frekansları tahmin edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde ihtiyaç duyulan her bir malzemenin yoğunluğu, her plakanın ölçülen boyutları ve kütlesi kullanılarak belirlenmiştir.

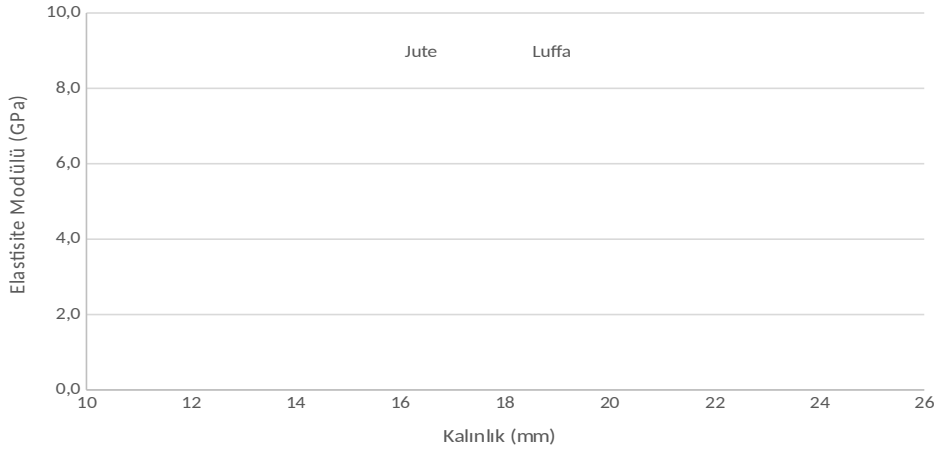
İlk olarak, homojen jüt ve luffa (kabak lifi) plakalarının izotropik olduğu varsayılmıştır. Her bir malzemenin elastisite modülü, deneysel olarak belirlenen modal frekanslar ile sonlu eleman modelinde malzemenin elastisite modülünün değerini değiştirerek tahmin edilen modal frekanslar arasındaki hata en aza indirilerek belirlenmiştir. Sonuçta homojen jüt ve luffa

lifi takviyeli kompozit plakaların belirlenen elastisite modülleri Tablo 4.3'te listelenmiştir. Homojen jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit plakalarının elastisite modüllerinin sırasıyla yaklaşık olarak 2-3 ve 5-6 GPa olduğu görülmektedir.

Tablo 4.3. Homojen jüt ve luffa kompozit plakaların elastisite modülleri (plakaların izotropik olduğu varsayılmıştır)

Numune No	Numune İsmi	E (GPa)
1	J1	5.82
2	L1	2.45
5	J2	5.71
6	L2	2.85
8	J3	5.45
9	L3	2.77
10	J4	5.25
11	J5	5.39
12	L4	1.95

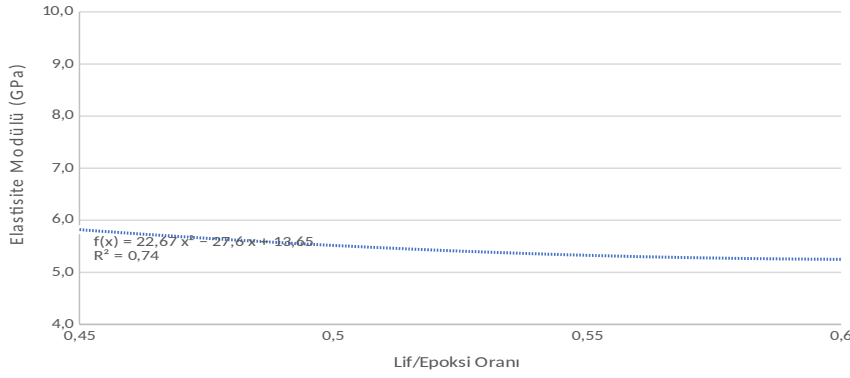
Kalınlığın elastisite modülü üzerinde bir etkisinin olup olmadığını görmek için, homojen jüt (lif/epoksi oranı: 0.5) ve luffa (lif/epoksi oranı: 0.6) yapılarının iki farklı kalınlık için belirlenen elastisite modülleri Şekil 4.42'de sunulmuştur. En azından buradaki test numuneleri için, kalınlıkla elastisite modüllerinde belirli bir azalma veya artış olmadığı görülmüştür.



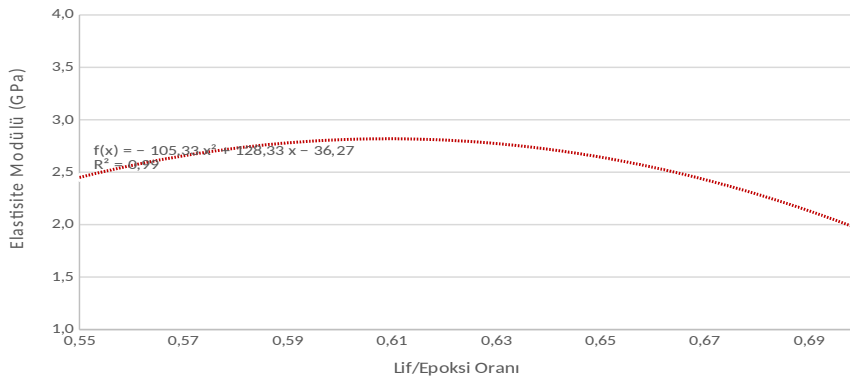
Şekil 4.42. Homojen jüt (lif/epoksi oranı: 0.5) ve luffa (lif/epoksi oranı: 0.6) yapılarının iki farklı kalınlık için belirlenen elastisite modülleri (plakaların izotropik olduğu varsayılmıştır)

Lif/epoksi oranının elastisite modülü üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için, farklı lif/epoksi oranlarına sahip homojen jüt ve luffa numunelerinin elastisite modülleri Şekil 4.43

ve 4.44'te verilmiştir. Lif/epoksi oranı ile jüt plakaların elastisite modülünde küçük bir azalma olduğu görülmektedir. Ölçülen verilere uydurulan ikinci dereceden polinom jüt kompozitleri için  $-22.667x^2 - 27.6x + 13.65$  şeklinde olup, korelasyon katsayısının karesi  $R^2 = 0.7378$  olarak çıkmaktadır. Lif/epoksi oranı ile sönüm değerleri arasındaki doğrusal artışından farklı olarak, luffa için elastisite modülünün lif/epoksi oranı doğrusal olmayan bir değişim gösterdiği görülmektedir. Ölçülen verilere uydurulan ikinci dereceden polinom luffa kompozitleri için  $-105.33x^2 + 128.33x - 36.27$  şeklinde olup, korelasyon katsayısının karesi  $R^2 = 0.9936$  olarak çıkmaktadır. Verilen lif/epoksi oranları için, en yüksek elastisite modülünü üreten optimal bir lif/epoksi oranının olduğu görülmektedir. Şekil 4.43 ve 4.44'teki eğriler (ampirik modeller) kullanılarak, farklı bir lif/epoksi oranı için jüt ve lifi takviyeli kompozitlerin elastisite modülleri tahmin edilebilir.



Şekil 4.43. Lif/epoksi oranına bağlı homojen jüt plakaların elastisite modülleri ve ölçülen verilere uydurulan eğri (plakaların izotropik olduğu varsayılmıştır)



Şekil 4.44. Lif/epoksi oranına bağlı homojen luffa kompozit plakaların elastisite modülleri ve ölçülen verilere uydurulan eğri (plakaların izotropik olduğu varsayılmıştır)

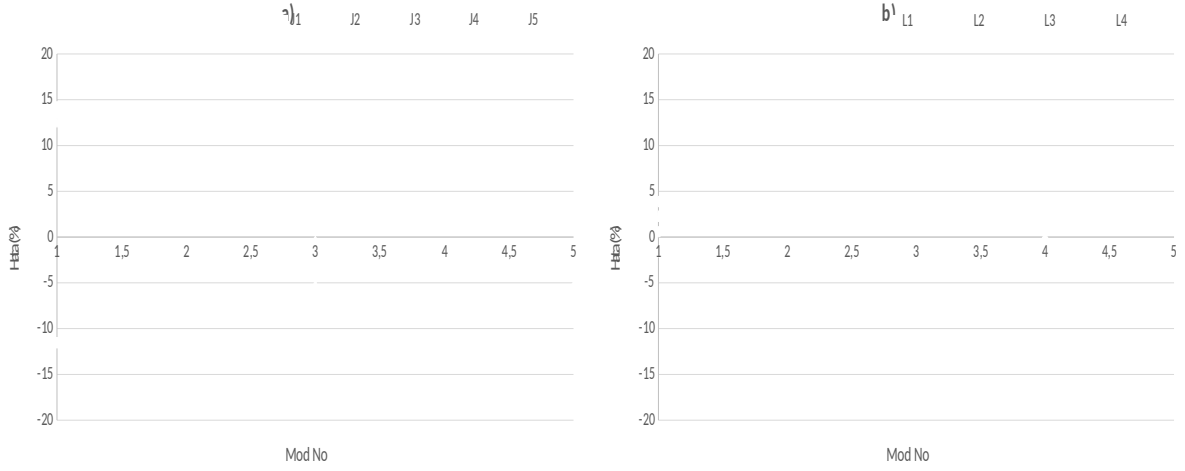
Homojen jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit plakalarının izotropik olduğu varsayımının yanı sıra, aynı plakalar yöne bağlı elastik özellikler dikkate alınarak da modellenmiştir. Her bir

plakanın ilgili elastik özellikleri, deneysel olarak belirlenen modal frekanslar ile sonlu eleman modellerinde bu plakaların elastik özellikleri değiştirilerek tahmin edilen modal frekanslar arasındaki hata en aza indirilerek belirlenmiştir. Sonuçta, homojen jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit plakaların belirlenen ilgili elastik özellikleri Tablo 4.4'te listelenmiştir.  $E_1$  ve  $E_2$  değerlerinin, özellikle luffa için, hem birbirlerine yakın hem de izotropik varsayım için belirlenen  $E$  değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Bu, amaç çok yüksek bir doğruluk değilse, özellikle luffa lifi takviyeli kompozit plakalarının, ilgililenen frekans aralığında izotropik kabul edilebileceğini gösterir.

Tablo 4.4. Homojen jüt ve luffa kompozit plakaların elastik özellikleri

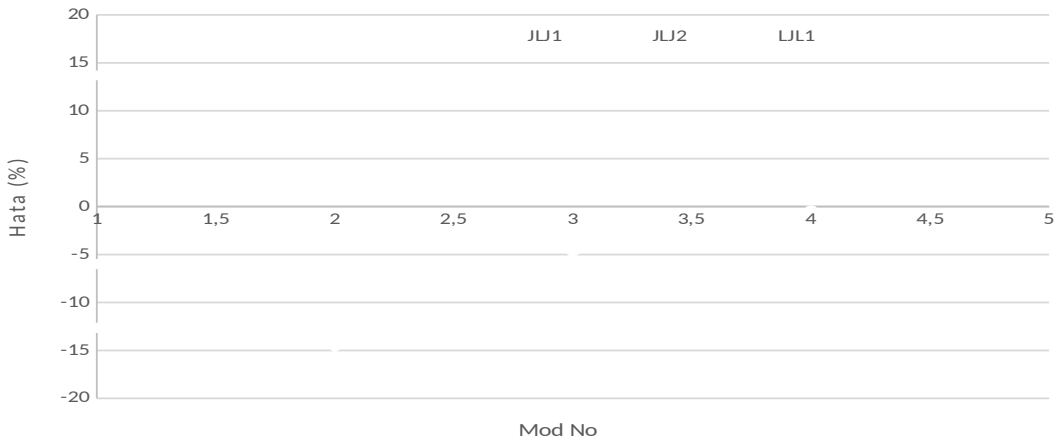
Numune No	Numune İsmi	$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)
1	J1	7.49	8.01	1.89	1.86	1.85
2	L1	2.51	2.35	0.97	1.11	1.05
5	J2	7.50	9.20	1.85	1.85	1.85
6	L2	2.89	3.05	1.14	0.88	0.95
8	J3	7.7	8.5	1.80	1.02	1.51
9	L3	2.66	2.99	1.07	1.09	1.01
10	J4	7.10	8.30	1.65	1.35	1.50
11	J5	7.69	7.62	1.64	1.20	1.50
12	L4	1.91	2.10	0.77	0.81	1.01

Homojen jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit plakaların, izotropik varsayıma dayalı olarak belirlenen malzeme özelliklerinin (Tablo 4.3) sonu elemanlar modellerinde kullanımlarıyla belirlenen teorik doğal frekansları ile deneysel doğal frekansları arasındaki farklar Şekil 4.45'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitler için sırasıyla %15 ve %5'e varan hatalar oluşmaktadır. Burada plakaların sunulan ilk beş modu için mutlak ortalama hatalar jüt ve luffa için sırasıyla %9.6 ve %0.4'tür. Bu sonuçlar, luffa lifi takviyeli kompozitlerin izotropik kabul edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.45. Homojen jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit plakaların, izotropik varsayıma dayalı olarak belirlenen malzeme özelliklerinin (Tablo 4.3) sonu elemanlar modellerinde kullanımlarıyla belirlenen teorik doğal frekansları ile deneysel doğal frekansları arasındaki farklar

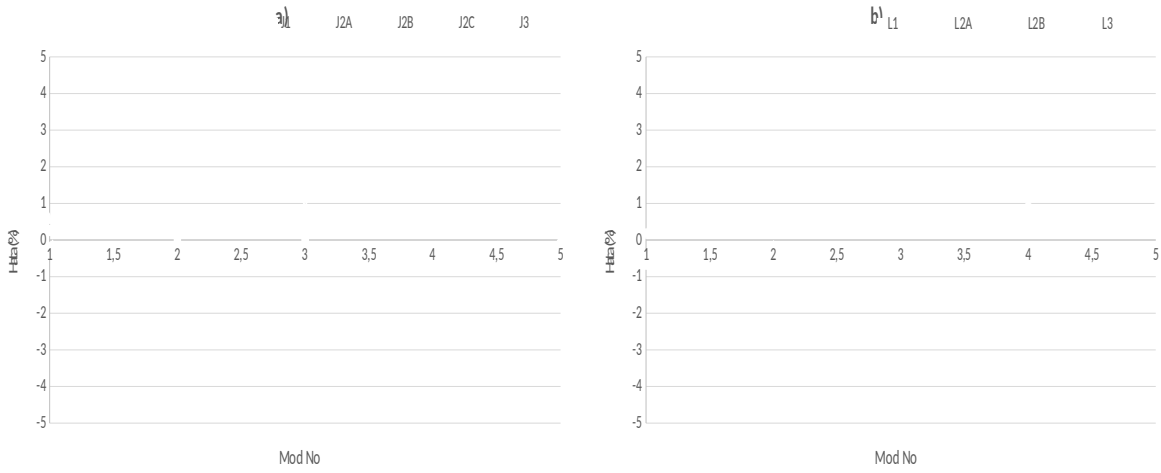
İzotropik varsayıma dayalı olarak belirlenen malzeme özelliklerini değerlendirmek için, Tablo 4.3'te verilen malzeme özellikleri hibrit JLJ ve LJL plakalarında kullanılmış ve doğal frekansları tahmin edilerek Şekil 4.46'da deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi izotropik malzeme kabulüne dayalı olarak belirlenen malzeme özellikleri hibrit plakalar için %15'e varan hatalar üretmekte ve ortalama mutlak hatalar hibrit JLJ1, JLJ2 ve LJL1 plakalar için sırasıyla %6.6, 8.9 ve 2.7'dir. Daha çok jüt malzemesinin bulunduğu tasarımların daha büyük hatalar ürettiği görülmektedir.



Şekil 4.46. Hibrit JLJ ve LJL plakaların, izotropik varsayıma dayalı olarak belirlenen malzeme özelliklerinin (Tablo 4.3) sonu elemanlar modellerinde kullanımlarıyla belirlenen teorik doğal frekansları ile deneysel doğal frekansları arasındaki farklar

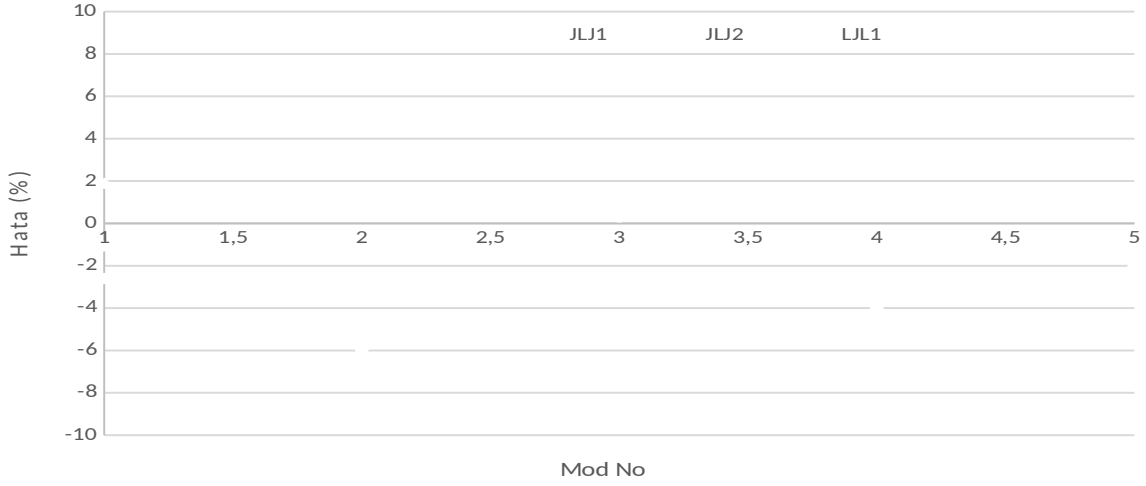


Homojen jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit plakaların yöne bağlı elastik malzeme özellikleri kullanarak (Tablo 4.4) sonlu eleman modelleri ile tahmin edilen doğal frekansları ile deneysel olarak belirlenen doğal frekansları arasındaki farklar Şekil 4.47'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, bu malzeme özellikleri %5'den az hatalar üretmekte ve jüt ve luffa lifi takviyeli kompozitler için ortalama mutlak hatalar sırasıyla %0.28 ve %0.65 olmaktadır. Bu sonuçlar, jüt kompozitlerinin yönlü elastik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan, luffa kompozitleri için yönlü ve izotropik kabulüyle bulunan elastik özellikler ile benzer hatalar elde edilmektedir.



Şekil 4.47. Homojen jüt ve luffa lifi takviyeli kompozit plakaların yöne bağlı elastik malzeme özellikleri kullanarak (Tablo 4.4) sonlu eleman modelleri ile tahmin edilen doğal frekansları ile deneysel olarak belirlenen doğal frekansları arasındaki farklar

Jüt ve luffa için belirlenen yöne bağlı elastik özellikler (Tablo 5.4), hibrit JLJ ve LJL plakalarının sonlu elemanlar modellerinde kullanılmış ve doğal frekansları tahmin edilerek Şekil 4.48'de deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi, bu malzeme özellikleri %5'ten az hatalar üretmekte ve ortalama mutlak hatalar hibrit JLJ1, JLJ2 ve LJL1 plakaları için sırasıyla %2.1, 2.8 ve 2.7 olmaktadır. Bu sonuçlarda, jüt kompozitlerinin yöne bağlı elastik özelliklere sahip olduğunu ve luffa lifi takviyeli kompozitlerin ise izotropik kabul edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.48. Jüt ve luffa için belirlenen yöne bağlı elastik özelliklerin (Tablo 5.4) hibrit JIJ ve LJI plakalarının sonlu elemanlar modellerinde kullanılması ile tahmin edilen doğal frekanslar ile deneysel doğal frekanslar arasındaki farklar

#### 4.4 Doğal Liflerin Güncel Uygulamaları ve Potansiyel Kullanım Alanları

Doğal lifler şu anda paketlenme, tarım, elektronik, tekstil ve tıp endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar (Lalit vd., 2018). Mükemmel akustik özellikleri ve önemli mekanik özellikleri, düşük maliyetleri, çevre dostu olmaları ve sürdürülebilirlikleri nedeniyle doğal liflerin gelecekte daha fazla kullanılacakları düşünülmektedir (Lalit vd., 2018; Steffens vd., 2017). Özellikle otomotiv sektöründe doğal lifler yerini almaya başlamıştır. Birçok firma bu lifleri otomobillerin iç ve dış bileşenlerini üretmek için kullanmaya başladılar. Kapı panelleri, gösterge panelleri, bagaj paneli, koltuk iç motor kapağı, motor yalıtım parçaları, güneşlik, tampon, tekerlek kutusu ve çatı örtüsü doğal lifler kullanılarak üretilebilmektedir (Bledzki vd., 2006; Karthi vd., 2020; Norhidayag vd., 2014). Biyomalzemeler mimari alanda da kullanılmaktadırlar. Literatürde, doğal liflerin dış cephe kaplama malzemesi, güçlendirici yapı bileşenleri ve buhar difüzyonu için çatı ve duvar kaplaması için kullanıldığı bildirilmektedir (Steffens vd., 2017). Spor malzemeleri endüstrisinde de kompozit malzemelerin yoğun olarak kullanılmaktadır. Örneğin, tenis raketleri, bisiklet çerçeveleri ve snowboard gibi yapılar için doğal lifler kullanılmaktadır (Mahir vd., 2019). Ayrıca, literatürde doğal liflerin akustik ve ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceğini (Santhanam vd., 2019; Steffens vd., 2017) ve elektronik PCB kartları olarak kullanılabileceğini (Genc vd., 2020) öne süren bazı çalışmalar da mevcuttur.

## 5. SONUÇ

Bu proje kapsamında, jüt lifleri ve çeşitli luffa (kabak) lifleri kullanılarak, farklı kalınlıklarda reçinesiz (hiçbir reçine kullanılmayan) homojen ve hibrit jüt ve luffa yapılar ve yine farklı kalınlıklarda ve farklı lif/reçine oranlarında reçineli homojen ve hibrit jüt ve luffa lif takviyeli kompozit yapılar üretilerek, bu yapıların akustik ve mekanik özellikleri ile ilgili kapsamlı bir resim ortaya konulmuştur. Aşağıda, önce proje kapsamında elde edilen bazı sonuçlar listelenmiş ve sonra da projenin genel bir değerlendirilmesi yapılarak bazı önerilerde bulunulmuştur.

### 5.1 Proje Kapsamında Elde Edilen Bazı Sonuçlar

- Lif değişkenliği ile ilgili olarak, numuneler arasında bazı farklılıklar olsa da, genel olarak, reçinesiz homojen ve hibrit jüt ve luffa lif numuneleri için hem ses yutma katsayısı hem de iletim kaybı deneylerinin tekrarlanabilir olarak değerlendirilebileceği görülmüştür. Benzer şekilde, luffa bitkisinin yetiştiği bölgenin luffa numunelerinin akustik özellikleri üzerinde ihmal edilebilir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Öte tandan, doğal malzemelerin nominal olarak özdeş bazı reçineli kompozit numunelerinin akustik özellikleri oldukça farklı olabilmektedir. Sapmaların ana nedenleri üretim sürecindeki hatalar ve test numunelerinin çapı ile empedans tüpünün iç çapı arasındaki uyumsuzluktur.
- Reçinesiz jüt ve luffa numunelerinin ses yutma katsayıları genel olarak kalınlıkla doğrusal olarak artmaktadır. Öte tandan, 0.5-0.6'dan daha düşük bir lif/epoksi oranı için, ses yutma katsayılarının düşük olduğu yansıtıcı jüt ve luffa kompozit numuneleri ortaya çıkmakta ve ses yutma katsayıları kalınlıkla dikkate değer bir değişiklik göstermemektedir.
- Hem reçineli hem de reçinesiz jüt ve luffa numuneleri için ses iletim kayıpları bütün frekans aralıkları için kalınlıkla neredeyse doğrusal olarak artmaktadır.
- Hem jüt hem de luffa kompozitleri için hemen hemen tüm frekans aralıklarında, artan lif/epoksi oranı ile ses yutma katsayılarının arttığı ve ses iletim kayıplarının azaldığı görülmektedir.
- Reçinesiz jüt ve luffa hibrit numunelerinin, genel olarak, homojen luffa numunelerine göre daha iyi ses yutma özelliklerine sahip olduğu görülmüştür. Reçinesiz hibrit numunelerin akustik özellikleri, homojen luffa ve jüt numunelerinin akustik özellikleri arasındadır. Reçinesiz homojen jüt numuneler diğer numunelere göre daha yüksek ses iletim kaybı seviyelerine sahipken, reçinesiz hibrit numunelerin ses iletim kaybı seviyeleri de dikkate değer düzeyde yüksektir. Bu iki doğal liflerin kombinasyonu, luffa lifinin nispeten düşük yoğunluğu nedeniyle, düşük ağırlıklı yapılara ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilir.
- Delany-Bazley ve Johnson-Champoux-Allard modellerinin jüt ve luffa lif numunelerinin ses yutma özelliklerini başarılı bir şekilde tahmin edebildiği görülmüştür. Bazı numuneler

için deneysel ve teorik ses iletim kayıpları arasında bazı farklar olsa da, ses iletim kayıplarının tahmini için verilen teorik modeller ön tasarım aşamasında kullanılabilirler.

- Çeşitli kalınlıklarda ve lif/epoksi oranlarında üretilen jüt ve luffa kompozitlerinin ölçülen akustik özellikleri, ölçülen akustik verilere kalınlık ve lif/epoksi oranlarının bir fonksiyonu olarak farklı frekans aralıkları için uydurulan eğriler ve bu proje kapsamında yararlanılan teorik modeller birçok mühendislik uygulamalarında jüt ve luffa kompozit yapılarının akustik özelliklerini değerlendirmek için kullanılabilirler.
- Jüt ve luffa kompozit numunelerinin elastik özelliklerinin ve sönüm seviyelerinin kalınlıkla önemli bir azalma veya artış göstermediği görülmüştür.
- Verilen lif/epoksi oranları için, jüt kompozitlerin sönüm seviyeleri ile lif/epoksi oranı arasında doğrusal olmayan bir ilişki olup, luffa kompozitleri için lif/epoksi oranı ile sönüm seviyesi arasında neredeyse doğrusal bir ilişki vardır (lif/epoksi oranı arttıkça sönüm artmaktadır). Luffa kompozitlerinin sönüm seviyeleri, jüt kompozitlerinin sönüm seviyelerinden biraz daha yüksektir.
- Verilen lif/epoksi oranları için, lif/epoksi oranı artışı ile jüt kompozitlerinin elastisite modülünde küçük bir azalma olup, lif/epoksi oranı ile luffa kompozitlerinin elastisite modülü arasındaki değişim doğrusal değildir. Verilen lif/epoksi oranları için, luffa kompozitleri için, en yüksek elastisite modülü değerini üreten optimal bir lif/epoksi oranı vardır.
- Yapılan modelleme çalışmalarında, luffa kompozit plakalarının izotropik varsayılabileceği, jüt kompozit plakaların ise yönlü elastik özelliklere sahip olduğu görülmüştür.
- Çeşitli kalınlıklarda ve lif/epoksi oranlarında üretilen jüt ve luffa kompozitlerinin ölçülen mekanik özellikleri ve ölçülen mekanik özelliklere lif/epoksi oranlarının bir fonksiyonu olarak uydurulan eğriler, çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımlarına ilişkin olarak, jüt ve luffa kompozit yapılarının mekanik özelliklerini anlamak için kullanılabilirler.

## 5.2 Projenin Genel Değerlendirilmesi ve Öneriler

Bu projenin önerisinde şunlar hedeflenmişti: jüt ve luffa gibi doğal lif takviyeli biyokompozit test numunelerinin üretilmesi (i), akustik ve modal (titreşim veya yapısal) testlerin gerçekleştirilmesi (ii), deneysel verilerin analiz edilmesi ve malzemelerin akustik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi (iii) ve deneysel veriler ışığında malzemelerin özellikle akustik özelliklerinin tahmin edilmesine yönelik modellerin kullanılması (iv). Proje kapsamında, jüt lifleri ve çeşitli luffa lifleri kullanılarak farklı kalınlıklarda ve lif/reçine oranlarında yapılar üretilerek, bu yapıların ses yutma ve ses iletim kaybı gibi akustik özellikleri ve elastik ve sönüm gibi mekanik özellikleri belirlenmiş olup, proje önerisinde hedeflenen tüm iş paketlerinin başarıyla gerçekleştirildiğini belirtmek gerekir.



Bu proje kapsamında yapılan ilk çalışmalar, proje yürütücüsü H. Körük ile birlikte bu projede araştırmacı olan G. Genç'in, projenin ilk günlerinde deneysel çalışmaları gerçekleştiren proje bursiyeri Y. Saygılı'nın ve bu çalışmalara katkı veren Y. Saygılı'nın danışmanı olan K.Y. Şanlıtürk'ün yazarları olduğu bir uluslararası dergi makalesi (Investigation of the Acoustic and Mechanical Properties of Homogenous and Hybrid Jute and Luffa Bio Composites, Journal of Natural Fibers, 2020) yayımlanmıştır. Proje ekibi tarafından yapılan diğer çalışmalar ile ilgili 2 uluslararası kitap bölümü ve 2 uluslararası dergi makalesi yazım aşamasındadır. Proje kapsamında üç yüksek lisans öğrencisi (B. Efendi, B. Koç, A.C. Özcan) ve bir doktora öğrencisi (Y. Saygılı) bursiyer olarak çalışmıştır. A.C. Özcan, proje kapsamında yaptığı çalışmaları Şubat veya Haziran 2021'de yüksek lisans tezi (danışmanlar: H. Körük ve K.Y. Şanlıtürk) olarak sunacaktır. Covid19 salgını sebebiyle, proje önerisinde belirtilmesine rağmen, ulusal bir konferansa katılım durumu olmamıştır.

Doğal lifler şu anda paketleme, tarım, elektronik, tekstil ve tıp endüstrisi gibi bazı alanlarda kullanılmaktadır. Ancak, bu malzemeler daha çok anlaşıldıkça ve yeni tasarımları ortaya konuldukça, gelecekte çok daha fazla uygulama alanlarına sahip olabileceği düşünülmektedir. Bitki bazlı lifler kullanılarak kompozit yapıları imal etmeden önce, bu yapıların akustik, mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen parametrelerin dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır. Bu proje kapsamında ortaya konulan çalışmalarla, jüt ve luffa gibi önemli doğal liflerin ve kompozitlerinin akustik ve mekanik özelliklerinin anlaşılması sağlanmış ve benzer yapıların geliştirilmesinin ve çeşitli uygulamalarda kullanımlarının önü açılmıştır. Özellikle, ülkemizin Akdeniz kıyılarında yetişmekte olan luffa bitkisinin, sahip olduğu dikkate değer sönüm özellikleri nedeni ile endüstriyel uygulamalarda yerini alması beklenmektedir. Özellikle, luffa takviyeli yapıların çeşitli uygulamaları için özel çalışmalar gerçekleştirilebilir ve bunlar için patent başvuruları yapılabilir. Luffa lif takviyeli kompozitlerin, bilgisayarlardaki PCB kartlarında kullanımları için bazı çalışmaların proje ekibi tarafından gerçekleştirildiğini belirtmek gerekir. Daha tekrarlanabilir reçineli kompozit yapıların üretilmesi için, üretim tekniği üzerine çeşitli çalışmalar yapılabilir. Özellikle, üretim sırasında biyokompozit plakaların iç kısımlarında boşluk oluşmasını ve reçine yığılmasını engelleyecek pratik tekniklere ihtiyaç bulunmaktadır. Burada çalışılan biyokompozit yapıların akustik özelliklerini tahmin etmeye yönelik teorik modellerin daha doğru tahminler yapılabilmesi için çeşitli çalışmalar gerçekleştirilebilir. Örneğin, liflerin çapları mikroskop kullanılarak daha hassas olarak ölçülüp teorik modellerde bu değerler kullanılabilir.



## Kaynaklar

Allard, J. F., Champoux, Y. 1992. "New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(6), 3346-53. <https://doi.org/10.1121/1.402824>.

Alves, C., Ferrão, P. M. C., Silva, A. J., Reis, L. G., Freitas, M., Rodrigues, LB, Alves, D. E. 2010. "Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites", *Journal of Cleaner Production*, 18(4), 313-27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.022>.

Arulmurugan, M., Prabu, K., Rajamurugan, G., Selvakumar, A. S. 2019. "Viscoelastic behavior of aloevera/hemp/flax sandwich laminate composite reinforced with BaSO<sub>4</sub>: Dynamic mechanical analysis", *Journal of Industrial Textiles*. <https://doi.org/10.1177/1528083719852312>.

ASTM E1050–12, 2012. Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System. PA: ASTM International. [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM E2611-17. 2017. Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on The Transfer Matrix Method. PA: ASTM International. [www.astm.org](http://www.astm.org).

Bansod, P. V., Mittal, T., Mohanty, A. R. 2016. "Study on the acoustical properties of natural jute material by theoretical and experimental methods for building acoustics applications", *Acoustics Australia*, 44, 457-72. <https://doi.org/10.1007/s40857-016-0073-4>.

Berardi, U., Iannace, G. 2015. "Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications", *Building and Environment*, 94, 840-852.

Bevitori, A. B., Da Silva, I. L. A., Lopes, F. P. D., Monteiro, S. N. 2010. "Diameter dependence of tensile strength by Weibull analysis: Part II jute fiber", *Revista Matéria*, 15(2), 117-23. <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11205>.

Bledzki, A. K., Faruk, O., Sperber, V. E. 2006. "Cars from bio-fibres", *Macromolecular Materials and Engineering*, 291, 449-57.

Chung, D. D. L. 1994. *Carbon Fiber Composites*. MA: Butterworth-Heinemann.

Delany, M. E., Bazley, E. N. 1970. "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", *Applied Acoustics*, 3(2), 105-16. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9).

Demir, H., Deveci, M. A. 2018. "Comparison of ultrasound and conventional technique for removal of methyl orange by luffa cylindrica fibers", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43, 5881–9. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-3050-9>.

Drzal, L. T., Mohanty, A. K., Misra, M. 2001. "Bio-composite materials as alternatives to petroleum-based composites for automotive applications", *Magnesium*, 40(60), 1-3.

Dunn, J. P., Davern, W. A. 1986. "Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers", *Applied Acoustics*, 19(5), 321-34. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(86\)90044-7](https://doi.org/10.1016/0003-682X(86)90044-7).

Ewins, D. J. 2000. *Modal Testing: Theory, Practice and Application* (2. Basım). England: Research Studies Press.

Fatima, S., Mohanty, A. R. 2011. "Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials", *Applied Acoustics*, 72(2-3), 108-14. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.10.005>.

Fu, S. Y., Lauke, B., Mäder, E., Yue, C. Y., Hu, X. 2000. "Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites", *Composites Part A: Applied Sciences and Manufacturing*, 31(10), 1117-25. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00068-3).

Genc, G., Koruk, H. 2016. "Investigation of the vibro-acoustic behaviors of luffa bio composites and assessment of their use for practical applications", 23rd International Congress on Sound and Vibration. Athens, Greece.

Genc, G., Koruk, H. 2017. "Identification of the dynamic characteristics of luffa fiber reinforced bio-composite plates", *BioResources*, 12(3), 1558-68. <https://doi.org/10.15376/biores.12.3.5358-5368>.

Genc, G., Sarikas, A., Kesen, U., Aydin, S. 2020. "Luffa/epoxy composites: Electrical properties for PCP application", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 10, 933-40.

Hosseini Fouladi, M., Ayub, M., Jailani Mohd Nor, M. 2011. "Analysis of coir fiber acoustical characteristics", *Applied Acoustics*, 72(1), 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.09.007>.

ISO 10534-2. 2011. *Acoustics - Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes, Part 2: Transfer-Function Method*.

Johnson, D. L., Koplik, J., Dashen, R. 1987. "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid saturated porous media", *Journal of Fluid Mechanics*, 176, 379-402. <https://doi.org/10.1017/S0022112087000727>.

Joshi, S. V., Drzal, L. T., Mohanty, A. K., Arora, S. 2004. "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?", *Composites Part A: Applied Sciences and Manufacturing*, 35(3), 371-6. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>.

Jung, S. S., Kim, Y. T., Lee, Y. B., Cho, S. I., Lee, J. K. 2008. "Measurement of sound transmission loss by using impedance tubes" *Journal of the Korean Physical Society*, 53(2), 596-600. <https://doi.org/10.3938/jkps.53.596>.

Kaewtatip, K., Thongmee, J. 2012. "Studies on the structure and properties of thermoplastic starch/luffa fiber composites", *Materials & Design*, 40, 414-18. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.03.053>.

Karthi, N., Kumaresan, K., Sathish, S., Gokulkumar, S., Prabhu, L., Vigneshkumar, N. 2020. "An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas", *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.011>.

Kesharwani, A., Bedi, R., Kumar Bagha, A., Bahl, S. 2020. "Experimental study to measure the sound transmission loss of natural fibers at tonal excitations", *Materials Today: Proceedings*, 28(3), 1554-9. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.839>.

Kino, N., Ueno, T. 2008. "Comparisons between characteristic lengths and fibre equivalent diameters in glass fibre and melamine foam materials of similar flow resistivity", *Applied Acoustics*, 69(4), 325-31. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.11.008>

Kino, N. 2015. "Further investigations of empirical improvements to the Johnson–Champoux–Allard model", *Applied Acoustics*, 96, 153-70. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.03.024>.

Koruk, H. 2013. *Identification, Modelling and Optimisation of Structures with Passive Damping Treatments*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Koruk, H. 2014. "An assessment of the performance of impedance tube method", *Noise Control Engineering Journal*, 62(4), 264-74. <https://doi.org/10.3397/1/376226>.



- Koruk, H. 2014. "Quantification and minimization of sensor effects on modal parameters of lightweight structures", *Journal of Vibroengineering*, 16,(4), 1952-63.
- Koruk, H., Genc, G. 2015. "Investigation of the acoustic properties of bio luffa fiber and composite materials", *Materials Letters*, 157, 166-8.  
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.05.071>.
- Koruk, H., Genc, G. 2018. "Acoustic and mechanical properties of luffa fiber-reinforced biocomposites". *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-reinforced Composites and Hybrid Composites*. Editörler: Jawaid, M., Thariq, M., Saba, N. Duxford: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00017-5>.
- Lalit, R., Mayank, P., Ankur, K. 2018. "Natural fibers and biopolymers characterization: a future potential composite material", *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 68(1), 33-50.
- Le Guen, M.-J., Newman, R. H., Fernyhough, A., Staiger, M. P. 2014. "Tailoring the vibration damping behaviour of flax fibre-reinforced epoxy composite laminates via polyol additions" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 67, 37-43.
- Lim, Z. Y., Putra, A., Nor, M. J. M., Yaakob, M. Y. 2018. "Sound absorption performance of natural kenaf fibres", *Applied Acoustics*, 130, 107-14.  
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.09.012>.
- Liu, L., Yu, J., Cheng, L., Qu, W. 2009. "Mechanical properties of poly(butylene succinate) (PBS) biocomposites reinforced with surface modified jute fibre", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(5), 669-674.
- Mahir, F., Keya, K., Sarker, B., Nahion, K., Khan, R. 2019. "A brief review on natural fiber used as a replacement of synthetic fiber in polymer composites", *Materials Engineering Research*, 1, 86-97.
- Mat Tahir, M. F., Nawi, M. H., Zulkifli, R., Elwaleed, A. K., Mat Yunoh, S. M. 2018. "The effect of thickness and density on the acoustics properties of Ceiba pentandra natural fiber", *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(9), 3214-8.
- Miki, Y. 1990. "Acoustical properties of porous materials-Modifications of Delany-Bazley models-", *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 11(1), 19-24.  
<https://doi.org/10.1250/ast.11.19>.



Norhidayah, M. H., Hambali, A. A., bin Yaakob, M. Y., Zolkarnain, M., Taufik, & Saifuddin, H. Y. 2014. "A review of current development in natural fiber composites in automotive applications", *Applied Mechanics and Materials*, 564, 3–7. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.564.3>.

Norton, M. P., Karczub, D. G. 2003. *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers* (2. Basım). Cambridge: Cambridge University Press.

Or, K. H., Putra, A., Selamat, M. Z. 2017. "Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber", *Applied Acoustics*, 119, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.12.002>.

Papanicolaou, G. C., Psarra, E., Anastasiou, D. 2015. "Manufacturing and mechanical response optimization of epoxy resin/luffa cylindrica composite", *Journal of Applied Polymer Science*, 132(22), 41992. <https://doi.org/10.1002/app.41992>.

Perumal, C. I. 2018. "A review on characteristic of polymer composites with natural fiber used as a reinforcement material", *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 6(1), 1213–7. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.1184>.

Prascevic, M., Cvetkovic, D., Mihajlov, D. 2012. "Comparasion of prediction and measurement methods for sound insulation of lightweight partitions", *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*, 10(2), 155-67. <https://doi.org/10.2298/FUACE1202155P>.

Raj, M., Fatima, S., Tandon, N. 2020. "Recycled materials as a potential replacement to synthetic sound absorbers: A study on denim shoddy and waste jute fibers", *Applied Acoustics*, 159, 107070. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107070>.

Rajesh, M., Hameed Sultan, M. T., Uthayakumar, M., Jayakrishna, K., Md Shah, A. U. 2018. "Dynamic behaviour of woven bio fiber composite", *BioResources*, 13(1), 1951-60.

Ramesh, M., Palanikumar, K., Reddy, K. H. 2013. "Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites", *Composites Part B: Engineering*, 48, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.12.004>.

Sanliturk, K. Y., Koruk, H. 2013. "Development and validation of a composite finite element with damping capability", *Composite Structures*, 97, 136-46.

Sanliturk, K. Y., Koruk, H. 2014. "A new triangular composite shell element with damping capability", *Composite Structures*, 118, 322-7.



Santhanam, S., Bharani, M., Temesgen, S., Atalie, D., Ashagre, G. 2019. "Recycling of cotton and polyester fibers to produce nonwoven fabric for functional sound absorption material", *Journal of Natural Fibers*, 16(2), 300-6.

Saw, S. K., Ghose, J., Sarkhel, G. 2017. "Potentiality of luffa fiber used as reinforcement in polymer composites". *Green Biocomposites: Manufacturing and Properties*. Editörler: Jawaid, M., Sapuan, S. M., Alothman, O. Y. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46610-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46610-1_13).

Sengupta, S., Basu, G., Datta, M., Debnath, S., Nath, D. 2020. "Noise control material using jute (*Corchorus olitorius*): effect of bulk density and thickness", *The Journal of The Textile Institute*. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1744222>.

Sgriccia, N., Hawley, M. C., Misra, M. 2008. "Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites", *Composites Part A: Applied Sciences and Manufacturing*, 39(10), 1632-7. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.07.007>.

Steffens, F., Steffens, H., Oliveira, F. R. 2017. "Applications of natural fibers on architecture", *Procedia Engineering*, 200, 317-24.

Suardana, N. P. G., Sugita, I. K. G., Wardana, I. G. N. 2020. "Hybrid acoustic panel: The effect of fiber volume fraction and panel thickness", *Materials Physics and Mechanics*, 44, 77-82. [https://doi.org/10.18720/MPM.4412020\\_9](https://doi.org/10.18720/MPM.4412020_9).

Tadeu, A. J. B., Mateus, D. M. R. 2001. "Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation", *Applied Acoustics*, 62(3), 307-25. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00032-3).

Tanobe, V. O. A., Sydenstricker, T. H. D, Munaro, M., Amico, S. C. 2005. "A comprehensive characterization of chemically treated Brazilian sponge-gourds (*Luffa cylindrica*)", *Polymer Testing*, 24(4), 474-82. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2004.12.004>.

Wang, X., You, F., Zhang, F. S., Li, J., Guo, S. 2011. "Experimental and theoretic studies on sound transmission loss of laminated mica-filled poly(vinyl chloride) composites", *Journal of Applied Polymer Scienc*, 122(2), 1427-33. <https://doi.org/10.1002/app.34047>.

Yang, W. D., Li, Y. 2012. "Sound absorption performance of natural fibers and their composites", *Science China-Technological Sciences*, 55, 2278-2283.

**TÜBİTAK  
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. HASAN KÖRÜK
Proje No:	119M115
Proje Başlığı:	Biyomalzemelerin Akustik ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	10
Araştırmacılar:	GARİP GENÇ
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	MEF Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2019 - 01/09/2020
Onaylanan Bütçe:	35000.0
Harcanan Bütçe:	33852.64
Öz:	<p>Bu proje kapsamında, jüt lifleri ve çeşitli luffa lifleri kullanılarak, farklı kalınlıklarda reçinesiz (hiçbir reçine kullanılmayan) homojen ve hibrit jüt ve luffa yapılar ve yine farklı kalınlıklarda ve farklı lif/reçine oranlarında reçineli homojen ve hibrit jüt ve luffa yapılar üretilerek, bu yapıların akustik ve mekanik özellikleri ile ilgili kapsamlı bir resmin ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu kapsamda kullanılan yöntemler/sonuçlar şu şekildedir: (i) Akustik testler için farklı kalınlıklarda hem reçinesiz hem de farklı lif/reçine oranlarına sahip reçineli homojen ve hibrit numuneler üretilmiştir. Empedans tüp yöntemi kullanılarak bu akustik numunelerin ses yutma ve ses iletim kaybı gibi akustik özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Homojen ve hibrit kompozit yapıların akustik performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçta, kalınlık ve lif/reçine oranının bu yapıların akustik özellikleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. (ii) Farklı frekans aralıkları için kalınlığın ve lif/reçine oranının bir fonksiyonu olarak ölçülen akustik verilere eğriler uydurularak, malzemelerin akustik özelliklerini belirlemeye yönelik basit ampirik modeller ortaya konulmuştur. Dahası, malzemelerin ses yutma katsayıları Delany-Bazley ve Johnson-Champoux-Allard gibi teorik modeller kullanılarak tahmin edilmiş ve sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde, numunelerin ses iletim kayıpları teorik olarak hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçta, bu yapıların tasarımında akustik amaçla kullanılacak ampirik ve teorik modeller ortaya konulmuştur. (iii) Titreşim testleri için farklı kalınlık ve lif/reçine oranlarına sahip reçineli homojen ve hibrit numuneler üretilmiş, üretilen bu yapılar üzerinde akustik ve yapısal frekans tepki fonksiyonları ölçülmüş ve aynı yapıların teorik modellerinden yararlanılarak malzemelerin elastik ve sönüm gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Homojen jüt ve luffa kompozit yapıları hem izotropik varsayılarak hem de bu yapıların yöne bağlı elastik özelliklerinin olması durumu dikkate alınarak modellenmişlerdir. Sonuçta, kalınlık ve lif/reçine oranının mekanik özellikler üzerindeki etkisi ortaya konulmuş ve pratikte bu yapıların tasarımı için kullanılacak bazı yaklaşımlar ortaya konulmuştur.</p>
Anahtar Kelimeler:	Biyomalzeme, biyokompozit, ses yutma katsayısı, ses iletim kaybı, sönüm, elastisite modülü.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Investigation of the Acoustic and Mechanical Properties of Homogenous and Hybrid Jute and Luffa Bio Composites (Makale - Diğer Hakemli Makale),