

BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASARLI KOMPOZİT PLAKLARDA VİBROAKUSTİK BİR ÇALIŞMA

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UTKU UZUN

HAZİRAN 2017

BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HASARLI KOMPOZİT PLAKALARDA VİBROAKUSTİK BİR ÇALIŞMA

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Utku UZUN

DANIŞMAN : Yrd.Doç.Dr. Fatmagül KOLTUK

İKİNCİ DANIŞMAN : Doç.Dr. Mehmet YETMEZ

ZONGULDAK

Haziran 2017

KABUL:

Utku Uzun tarafından hazırlanan “Hasarlı Kompozit Plakalarda Vibroakustik Bir Çalışma” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 29/06/2017

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Fatmagül KOLTUK

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



İkinci Danışman: Doç.Dr. Mehmet YETMEZ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



Üye: Yrd.Doç.Dr. Nazım KUNDURACI

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü



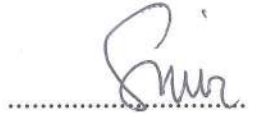
Üye: Doç.Dr. Hamdi Alper ÖZYİĞİT

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü



Üye: Doç. Dr. Senih GÜRSES

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Bölümü



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

03.07/2017



Doç. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Utku UZUN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HASARLI KOMPOZİT PLAKALARDA VİBROAKUSTİK BİR ÇALIŞMA

Utku UZUN

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr Fatmagül KOLTUK

İkinci Danışman: Doç.Dr. Mehmet YETMEZ

Haziran 2017, 85 sayfa

Kompozit malzemeler, yüksek rijitlik/ağırlık oranları ve diğer avantajlarından dolayı havacılık ve denizcilik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım süreleri boyunca pek çok çevresel etkiye maruz kalan kompozit malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri bu durumdan etkilenmektedir. Havacılıkta kullanılan örgülü kompozit malzemeler için ise en büyük ilgi alanı gürültü ve sıcaklığın bu malzemelerin mekanik özelliklerine olan etkisidir. Sıcaklığın değişimiye birlikte kompozit malzemelerdeki matris faz olan reçinenin fiziksel yapısı değişmektedir. Fiziksel formu değişen reçinenin rijitliği düşmekte ve bu durum kompozit malzemenin yapısında dinamik kararsızlığa yol açabilmektedir. Sıcaklığın kompozit plakalarda yarattığı etkiyi anlayabilmek için ısıl ortamdaki titreşim analiziyle birlikte, titreşim yapılarının ses özelliklerinin de aynı anda incelenmesi daha doğru bir analiz yapılması açısından önemlidir. Bu çalışmada farklı tipte kompozit plakalar (tek yönlü elyaf takviyeli, örgülü) gözönüne alınarak, hasar analizi deneysel olarak belirlenecektir. Çalışmanın önemi, dinamik analizle, plakaların 20-50 °C aralığındaki vibroakustik karakteristikleri ortaya konularak, servis kullanımıyla ilgili değerlendirmenin belirginleştirmesini sağlamaktır.

ÖZET (devam ediyor)

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzemeler, Dinamik analiz, Vibro-akustik, Sıcaklık etkisi, Hasar etkisi

Bilim Kodu: 625.01.04.



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

A VIBROACOUSTIC STUDY ON DAMAGED COMPOSITE PLATES

Utku UZUN

Bülent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Fatmagül KOLTUK

Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet YETMEZ

June 2017, 85 pages

Composite materials are widely used in aviation and maritime industries due to their high rigidity / weight ratios and other advantages. The mechanical and chemical properties of composite materials exposed to many environmental influences during their use are affected by this situation. For woven composite materials used in aviation, the most important concern is the effect of noise and temperature on the mechanical properties of these materials. The physical structure of the resin, which is the matrix phase in the composite materials, changes with the change of temperature. The rigidity of the resin changing physical form is decreasing and this can lead to dynamic instability in the structure of the composite material. In order to understand the effect of temperature on the composite plates, it is important to analyze the sound properties of the vibration structures together with the vibration analysis in the thermal environment in order to make a more accurate analysis. In this study, damage analysis will be experimentally determined by considering different types of composite plates (unidirectional fiber reinforced, woven). The importance of this work is to make a methodological evaluation for the further service usage with respect to vibroacoustic testing approach in the range of 20-50 °C.

ABSTRACT (continued)

Keywords: Composites, Dynamic Analyses, Vibro-acoustics, Thermal Effect, Damage Effect

Science Code: 625.01.04.



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında bilgi ve birikimleri ile bana yol gösteren, yardımları ve desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen hocalarım Yrd.Doç.Dr. Fatmagül KOLTUK ve Doç.Dr. Mehmet YETMEZ'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında daima beni motive eden arkadaşlarım Alper Tuna KAVLAK ve Osman AYCAN başta olmak üzere tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak beni bugünlere getiren maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme başta annem Fatma UZUN'a olmak üzere sırasıyla Anıl UZUN ÖZCAN, Gözde UZUN, Nihat ÖZCAN ve Aras ÖZCAN'a teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 KOMPOZİT MALZEMELER	5
2.1 GENEL BİLGİLER.....	5
2.2 KOMPOZİT MALZEMELERİN TARİHÇESİ	8
2.3 MATRİS MALZEMELERİNE GÖRE KOMPOZİTLER	9
2.3.1 Metal Matrisli Kompozitler	10
2.3.2 Seramik Matrisli Kompozitler	10
2.3.3 Polimer Matrisli Kompozitler	10
2.3.3.1 Karbon Fiber Takviyeli Kompozitler (CFRP)	11
2.2.3.2 Cam Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler(GFRP).....	13
2.2.3.3 Aramid Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler	15
2.4 İLERİ HAVACILIK KOMPOZİTLERİ	16
2.4.1 İki Boyutlu(2D) Fiber Takviyeli Örgülü Kompozitler	17
2.4.2 Üç Boyutlu(3D) Fiber Takviyeli Örgülü Kompozitler	20
2.4.3 Sandviç Kompozitler	21

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 3 ÖRGÜLÜ KOMPOZİTLERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU	23
3.1 ÇEKME MUKAVEMETİ.....	23
3.2 DİNAMİK KARAKTERİZASYON	25
3.2.1 Titreşim ve Ses Analizi	25
3.2.1.1 Temel Eşitlikler	25
3.2.1.2 Modal Analiz.....	26
3.2.1.3 Ses Bağlantıları	28
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
4.1 DENEY DÜZENİĞİ VE KULLANILAN MALZEMELER.....	31
4.1.1 Deney Düzenegi.....	31
4.1.2 Çalışmada Kullanılan Numuneler.....	36
4.2. DENEYLERİN YÜRÜTÜLMESİ	39
4.2.1 Çekme Deneyi.....	39
4.2.1 Sıcaklıkların Ölçülmesi.....	45
4.2.2 Frekans Ölçümleri ve Modların Belirlenmesi.....	50
BÖLÜM 5 DENEY SONUÇLARI.....	51
BÖLÜM 6 YORUMLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	77
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Kompozit malzemelerin sektörlere göre küresel pazar hacmi	1
Şekil 2.1 Mühendislik malzemelerinin yoğunluk-çekme mukavemeti ilişkisi	6
Şekil 2.2 Fiber dizilim yönlerinin çekme mukavemetine etkisi.....	7
Şekil 2.3 Mühendislik malzemelerinin tarihi gelişimi	8
Şekil 2.4 Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan farklı fiber malzemelerin gerilme- gerinim eğrileri	11
Şekil 2.5 Boeing 757-200’de kullanılan kompozit parçalar.....	17
Şekil 2.6 Yaygın olarak kullanılan 2D örgü çeşitleri	18
Şekil 2.8 Honeycomb yapısı ve çekirdek çeşitleri; a) Köpük, b) Honeycomb, c) Dalgalı	21
Şekil 3.1 Çekme deneyi için hasarsız örgülü kompozit numunesi	23
Şekil 3.2 Çekme deneyi için hasar kodları/tipik modlar	24
Şekil 3.3 Tipik Ses Aktarımı	28
Şekil 4.1 Deney Düzenegi	32
Şekil 4.2 Dizüstü Bilgisayar ve Veri Toplama Cihazı	33
Şekil 4.3 Isıtıcı Fan.....	33
Şekil 4.4 Termometre ve Termokaplılar	34
Şekil 4.5 Mikrofon	34
Şekil 4.6 İvmeölçer	35
Şekil 4.7 Tahrik Unsuru	35
Şekil 4.8 Veri toplanan bölmedeki ivme ölçer ve termokaplılar yapıştırılmış numune.....	36
Şekil 4.9 0.5 mm kalınlığında örgülü kompozit plaka	37
Şekil 4.10 1 mm kalınlığında örgülü kompozit plaka	37
Şekil 4.11 1.5 mm kalınlığında örgülü kompozit plaka	38
Şekil 4.12 Çekme Cihazı ve Çeneler.....	39
Şekil 4.13 Darbe deney düzenegi	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.14 45° tepe açısına sahip 150 g ve 500 g'lık kurşunlar.....	41
Şekil 4.15 0.5 mm kalınlıkta 1.84 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.....	42
Şekil 4.16 1 mm kalınlıkta 1.84 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.....	42
Şekil 4.17 1.5 mm kalınlıkta 1.84 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.....	43
Şekil 4.18 0.5 mm kalınlıkta 6.13 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.....	43
Şekil 4.19 1 mm kalınlıkta 6.13 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.....	44
Şekil 4.20 1.5 mm kalınlıkta 6.13 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.....	44
Şekil 4.20 Termokaplıların numune üzerindeki kodlanması.....	45
Şekil 5.1 0.5 mm kalınlıkta hasarsız numunenin frekans oranları	52
Şekil 5.2 0.5 mm kalınlıkta hasarsız numunenin sönüm oranları	52
Şekil 5.3 0.5 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları	53
Şekil 5.4 0.5 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.....	54
Şekil 5.5 0.5 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları	55
Şekil 5.6 0.5 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.....	55
Şekil 5.7 1 mm kalınlıkta hasarsız numunenin frekans oranları	56
Şekil 5.8 1 mm kalınlıkta hasarsız numunenin sönüm oranları	56
Şekil 5.9 1 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları	57
Şekil 5.10 1 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.....	58
Şekil 5.11 1 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları	59
Şekil 5.12 1 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.....	59
Şekil 5.13 1.5 mm kalınlıkta hasarsız numunenin frekans oranları	60
Şekil 5.14 1.5 mm kalınlıkta hasarsız numunenin sönüm oranları	60
Şekil 5.15 1.5 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları	61
Şekil 5.16 1.5 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.....	62
Şekil 5.17 1.5 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları	63
Şekil 5.18 1.5 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.....	63
Şekil 5.19 25°C'de frekansların modlara göre değişimi (t=0.5 mm).....	64
Şekil 5.20 25°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=0.5 mm)	64
Şekil 5.21 35°C'de frekansların modlara göre değişimi (t=0.5 mm).....	65
Şekil 5.22 35°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=0.5 mm)	65

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.23 50°C'de frekanslarının modlara göre değişimi ($t=0.5$ mm)	66
Şekil 5.24 50°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi ($t=0.5$ mm)	66
Şekil 5.25 25°C'de frekansların modlara göre değişimi ($t=1$ mm).....	67
Şekil 5.26 25°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi ($t=1$ mm)	67
Şekil 5.27 35°C'de frekansların modlara göre değişimi ($t=1$ mm).....	68
Şekil 5.28 35°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi ($t=1$ mm).....	68
Şekil 5.28 50°C'de frekansların modlara göre değişimi ($t=1$ mm).....	69
Şekil 5.29 50°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi ($t=1$ mm)	69
Şekil 5.30 25°C'de frekansların modlara göre değişimi ($t=1.5$ mm).....	70
Şekil 5.31 25°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi ($t=1.5$ mm)	70
Şekil 5.32 35°C'de frekansların modlara göre değişimi ($t=1.5$ mm).....	71
Şekil 5.33 35°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi ($t=1.5$ mm)	71
Şekil 5.34 50°C'de frekansların modlara göre değişimi ($t=1.5$ mm).....	72
Şekil 5.35 50°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi ($t=1.5$ mm)	72
Şekil 5.36 Hasarsız durum	74
Şekil 5.37 1.84 J ile hasara uğratılmış durum	74
Şekil 5.38 6.13 J ile hasara uğratılmış durum	75



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 CFRP’lerde kullanılan epoksi ve polyester malzemelerin özellikleri	12
Çizelge 2.2 Cam fiberler tipleri ve bu tipleri oluşturan katkı malzemelerinin kompozisyonları	14
Çizelge 2.3 Farklı takviye malzemelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırması	15
Çizelge 4.2 Çekme Deneyi Sonuçları ve Malzemelerin Yoğunlukları	40
Çizelge 4.1 Darbe deneyinde kullanılan kurşun çeşitleri ve özellikleri	41
Çizelge 4.2 Termokaplardan okunan sıcaklık değerleri.....	46
Çizelge 5.1 0.5 mm'lik hasarsız numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları.....	51
Çizelge 5.2 1.84 J'lük darbeye maruz bırakılan 0.5 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları	53
Çizelge 5.3 6.13 J'lük darbeye maruz bırakılan 0.5 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları	54
Çizelge 5.4 1 mm'lik hasarsız numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları...	56
Çizelge 5.5 1.84 J'lük darbeye maruz bırakılan 1 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları	57
Çizelge 5.6 6.13 J'lük darbeye maruz bırakılan 1 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları	58
Çizelge 5.7 1.5 mm'lik hasarsız numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları	60
Çizelge 5.8 1.84 J'lük darbeye maruz bırakılan 1.5 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları	61
Çizelge 5.9 6.13 J'lük darbeye maruz bırakılan 1.5 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları	62
Çizelge 5.11 Farklı sıcaklık, kalınlık ve hasar durumlarında elde edilen ses basıncı değerleri	73



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

C	: Santigrat
cm	: Santimetre
cm ³	: Santimetreküp
cos	: Cosinüs
dB	: Desibel
F	: Fahrenayt
f	: Frekans
g	: Gram
GPa	: Gigapascal
Hz	: Hertz
i	: İmajiner
in.	: İnç
J	: Joule
k	: Rijitlik matrisi
Kg	: Kilogram
kW	: Kilowatt
L	: Uzunluk
log	: Logaritma
m	: Kütle
m	: Metre
m ³	: Metreküp

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

mm	: Milimetre
mm ²	: Milimetrekare
MPa	: Megapascal
N	: Newton
P	: Basınç
P	: Pascal
sin	: Sinüs
t	: Kalınlık
T	: Sıcaklık
T	: Periyod
u	: Deplasman
w	: Genişlik
ξ	: Sönüm oranı
ε	: Epsilon
σ	: Sigma
τ	: Ses iletim katsayısı
ω	: Açısal frekans
°	: Derece

KISALTMALAR

CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimerler
CMC	: Seramik Matrisli Kompozitler
Damp. Rat.	: Sönüm Oranı
DMA	: Dinamik Mekanik Analiz
F.A.A.	: Federal Aviation Administration

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

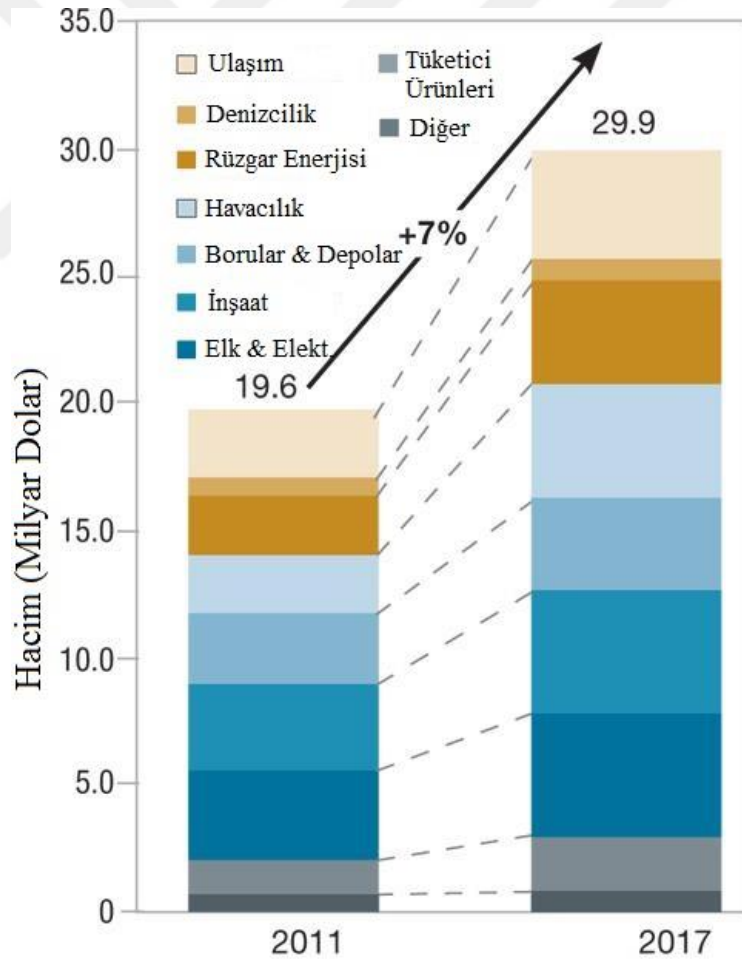
GFRP	: Cam Fiber Takviyeli Polimerler
HM	: Yüksek Modüllü
HT	: Düşük Modüllü ve Yüksek Mukavemetli
HTT	: Yüksek Sıcaklıkta Isıl İşleme Tabi Tutulmuş
IHT	: Orta dereceli sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş
IM	: Orta Dereceli Modüllü
MMC	: Metal Matrisli kompozitler
PAN	: Poliakrilonitril
PMC	: Polimer Matrisli Kompozitler
SDOF	: Tek Serbestlik Dereceli
SPL	: Ses Basınç Seviyesi
STL	: Ses İletim Kaybı
UD	: Hasarsız
2D	: İki Boyutlu
3D	: Üç Boyutlu



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kompozit malzemeler günümüzde denizcilik, savunma, inşaat ve havacılık gibi pek çok sektörde geniş kullanım alanlarına sahiptir. Kompozit malzemelerin eşsiz mekanik özellikleri son yıllarda üretim teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte üretim maliyetlerinin görece düşmesi, bu malzemelerin geleneksel metalik malzemelere göre tercih edilebilirliğini arttırmıştır. Bu konuya ilişkin veriler Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Kompozit malzemelerin sektörlere göre küresel pazar hacmi (url-1).

Kompozit malzemelerin yoğun olarak kullanıldığı havacılık sektöründe kullanılan örgülü kompozitler servis süreleri boyunca pek çok çevresel faktörden etkilenmektedir. Nem, sıcaklık, ultraviyole ışınları ve ısı oksidasyon kompozit malzemelerin özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Sıcaklık kompozit malzemelerin mukavemetini düşürebilmekte ve fiber/matris ara yüzeyini bozulmasına sebep olabilmektedir. Yüksek sıcaklıklara bağlı oluşan negatif etkiler genel olarak kompozit malzemenin matris fazını veya fiber/matris ara yüzeyini etkilemektedir, takviye malzemeler olan fiberler ise matris malzemelere göre sıcaklıktan daha az etkilenmektedir. Çevresel faktörlerin, özellikle sıcaklığın kompozit malzemeler üzerindeki etkisi üzerine pek çok akademik çalışma yapılmıştır.

Bisht ve Cauhan, sıcaklığın doymamış ortoftalik polyester reçine ile e-cam kompozisyonunun çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini araştırmıştır. 25°C ile 85°C arasında yapılan çalışmalarda sıcaklığın yükselmesi ile birlikte çekme mukavemetinin düştüğü gözlemlenmiştir (Bisht and Cauhan 2014).

Benli ve Sayman, cam/epoksi lamine kompozitlerde sıcaklık ve termal streslerin darbe hasarına etkilerini araştırmıştır. Laminatların termal stres analizleri 20 °C, 90 °C ve -50 °C sıcaklık altında gerçekleştirilmiştir. Hem termal analizler hem de darbe testlerinden elde edilen sonuçlar, termal streslerin darbe hasarına etkisinin sıcaklığı düşürdükçe arttığını ve bu nedenle düşük sıcaklıktaki streslerin tek yönlü lamine kompozitlerin darbe hasarı ve darbe parametreleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Benli and Sayman 2011).

Li et al., sıcaklığın kenetlenmiş kompozit plakaların burulma ve vibro-akustik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada 0°C ile 80°C arasındaki termal ortamda tamamen sıkıştırılmış kompozit laminasyonlu plaka için burkulma ve titreşim-akustik tepkilerinin analitik çözümü hesaplanmış ve sonuçlar MSC Nastran yardımıyla numerik çözüm ile desteklenmiştir. Sıcaklığın artması ile birlikte elde edilen ilk altı doğal frekansın tamamında düşüş görülmüştür, bu düşüşler sırasıyla, %66.19, %26.55, %29.54, %22.82, %12.76, ve %14.06 olarak gözlemlenmiştir. Buradan, ilk doğal frekansın sıcaklığa karşı diğer doğal frekanslara göre daha hassas olduğu anlaşılmıştır (Li et al. 2016).

Vangipuram ve Ganesan, sert kompozit katmanlardan ve izotropik viskoelastik çekirdekten oluşan sandviç panellerde serbest titreşim ve sönümleme özelliklerini termal yükler altında

sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelemişlerdir. Çalışmada ilk önce plakadaki sıcaklık alanının değerlendirildiği ve daha sonra bu sıcaklıkların sonraki hesaplamalarda kullanıldığı, birleştirilmiş bir termomekanik formülasyon kullanılmıştır. Fiber dağılımının ve sıcaklığının sandviç panellerin titreşim özelliklerine etkilerinin araştırıldığı çalışmada doğal frekansın sıcaklığın artması ile birlikte düştüğü gözlemlenmiştir (Vangipuram and Ganesan 2005).

Chen et al., çeşitli parametrelerin sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerine sahip lamine plakaların çökme ve titreşim davranışlarına etkisini araştırmıştır. Çalışmada 0°C ile 40°C arasında yapılan deneylerde tabaka sayısı, başlangıç gerilmesi ve sıcaklık artışının doğal frekansa etkisi araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre sıcaklık artış eğrisi titreşim frekansını hafifçe etkilemiştir ve sıcaklık artmasıyla doğal frekans düşmüştür (Chen et al. 2013).

Singha et al. öncesinde ve sonrasında termal gerilmelere sahip paralelkenar kompozit plakaların titreşim özelliklerini analiz etmiştir. Paralelkenarın kenar açısının farklı sıcaklıklarda (0°C-200°C) tek noktadan desteklenmiş ve tamamen sıkıştırılmış durumlarda kompozit plakanın titreşim özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sıcaklık yükseldikçe birinci doğal frekansın sonraki doğal frekanslara göre daha fazla değişim gösterdiği ve sıcaklığın artmasıyla doğal frekansın başlangıçta düştüğü ancak sonradan yükseldiği gözlemlenmiştir. (Singha et al. 2006).

Jeyaraj et al. ANSYS ve SYSNOISE sonlu elemanlar yazılımlarını kullanarak termal ortamda izotropik bir dikdörtgen plakanın titreşim ve akustik tepki özellikleri üzerine sayısal simülasyon çalışmaları yürütmüştür. Farklı sıcaklıklarda (0°C-348°C) tek noktadan desteklenmiş ve tamamen sıkıştırılmış durumlardaki plakanın titreşim özellikleri araştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda, plakaya uygulanan homojen sıcaklığın artmasıyla birlikte plakanın titreşim tepkisinin arttığı ve plakaya uygulanan homojen sıcaklık tüm sınır koşulları için kritik burkulma sıcaklığına çok yakın olduğu esnada ise titreşim değerlerinin maksimum seviyeye ulaştığı gözlenmiştir (Jeyaraj et al. 2008).

Geng et al. sıkıştırılmış dikdörtgen plakanın termal ortamlarda titreşim karakteristiği üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Malzemenin doğal frekansındaki değişimi incelemek için modal testler yapılarak, akustik ve mekanik uyarılar altında dinamik ve akustik tepkiler de

incelenmiştir. Çalışmada oda sıcaklığından başlanılarak plakanın 10°C ve 20°C'lik sıcaklık değişimleri altındaki doğal frekans değerleri ve sönüm oranları incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda, termal etkinin düzlemdeki iki farklı boyutta dikdörtgen plaka üzerinde eşit olmayan etkilere sahip olduğu görülmüştür. İlk beş mod için, modların modal sönümleme oranları sıcaklık arttıkça artmıştır, sonraki diğer modların frekans değerlerinde ise sıcaklık artışıyla birlikte dalgalanma görülmüştür (Geng et al. 2014).

Dinamik mekanik analiz (DMA) polimerik malzemeleri karakterize etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak DMA, mekanik karakterizasyon çalışmalarını destekleyici olarak makroskopik ve mikroskopik malzeme özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmak için uygulanmaktadır. Kompozitler için ise fiber birleşmelerindeki elastisite modülünün değişiminin çeşitliliğini anlamak için DMA'dan faydalanılmaktadır. Bu çalışmada, sıcaklığın farklı tipteki örgülü karbon epoksi hibrit kompozitlerinin dinamik özellikleri üzerine etkileri araştırılacaktır. Üç farklı tipteki örgülü kompozitin farklı sıcaklıklardaki doğal frekansları ve sönüm oranları incelenecektir.

BÖLÜM 2

KOMPOZİT MALZEMELER

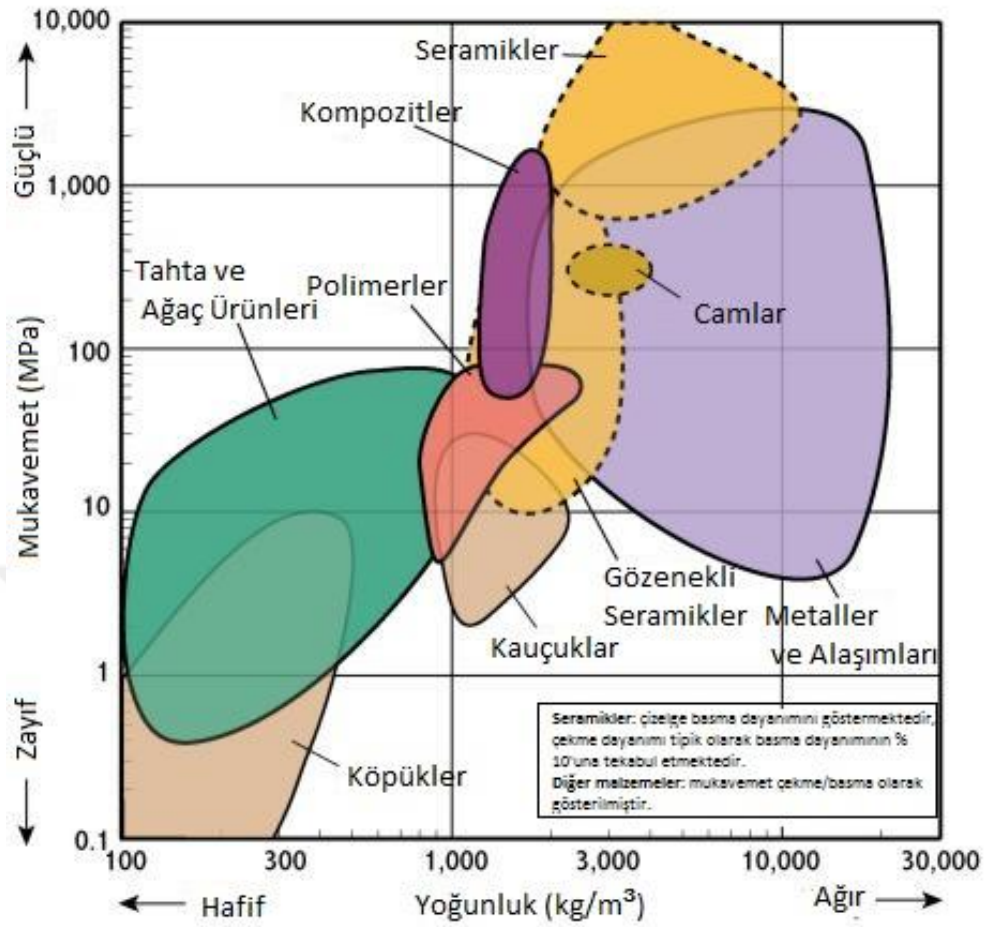
2.1 GENEL BİLGİLER

Kompozit malzemeler, kendini oluşturan malzemelerin birbirlerinden bağımsız olarak kullanıldıklarında sahip oldukları mekanik performans ve özelliklerinden daha üstün olması amacıyla tasarlanmış makroskopik düzeyde iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzeme sistemleridir (Daniel and Ishai 2006).

Kompozit malzemeler, doğal olarak meydana gelenlerin aksine yapay olarak üretilmiş çok fazlı bir malzemedir. Ayrıca yapıyı oluşturan fazlar kimyasal olarak birbirinden farklı ve belirgin bir arayüzle ayrılmıştır (Callister 2014).

Kompozit malzemeler genel olarak iki bileşenden oluşur, bileşenler matris ve takviye malzeme olarak ikiye ayrılır. Kompozit malzemelerin özellikleri; bileşenlerin özelliklerine, geometrilerine ve dağılımına bağlıdır. Kaba malzemeler ile kıyaslandığında kompozitlerin avantajları genel olarak; düşük yoğunluk ile kombine edilmiş yüksek mukavemet ve ağırlığın azaltılması olarak gösterilebilir (Campbell 2010).

Şekil 2.1’de çeşitli malzemelerin mukavemet-yoğunluk ilişkisi gösterilmiştir, şekilden de anlaşılacağı üzere kompozit malzemeler diğer malzemeler ile kıyaslandığında düşük yoğunluğa sahip olmalarına rağmen mukavemetleri düşük değildir.

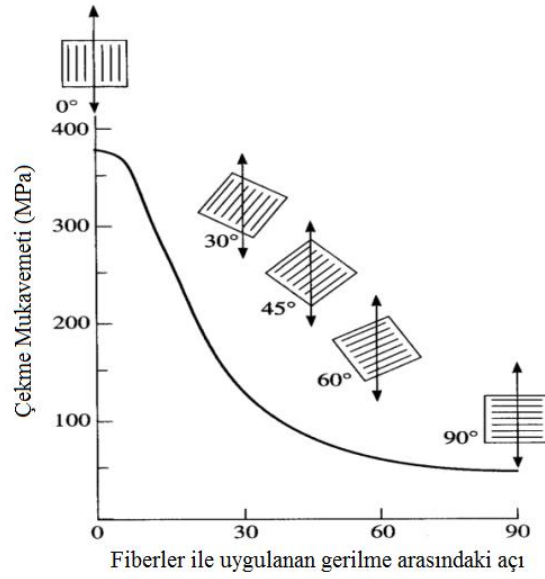


Şekil 2.1 Mühendislik malzemelerinin yoğunluk-çekme mukavemeti ilişkisi (url-2)

Genel olarak matris malzemedan daha daha sert, sağlam ve dayanıklı olan takviye malzeme kompozite sertlik ve mukavemet kazandırır. Takviye malzemeler çoğunlukla partikül veya fiber yapıdadır. Partikül takviyeli kompozitlerde, bağlayıcı bir matrisin içerisine bir veya daha fazla parçacık malzeme eklenir. Matris malzeme içerisine eklenen parçacık takviyelerinin dağılımı rastgele veya tercih edilen oryantasyonda olabilir. Genel olarak parçacık takviyeli kompozit malzemeler fiber takviyeli kompozit malzemelere göre daha düşük kırılma direncine sahiptir. Patiküller, kompozit malzemenin sertliğini artırma eğilimindedirler ancak mukavemeti üzerinde çok etkili olmazlar. Partikül takviyeli kompozitler çoğu zaman yüksek sıcaklıklar altında mekanik performansı arttırmak amacı ile kullanılırken aynı zamanda elektriksel ve ısı özellikleri arttırmak için de kullanılırlar.

Fiberler, kompozit malzemedeki birincil yük taşıyıcı ögelerdir. Süreksiz fiber takviyeli kompozitlerde fiberler matris içerisinde rastgele dağılırken, sürekli fiber takviyeli kompozitlerde fiberler istenilen yönde dizilir. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde, istenilen

sertlik ve mukavemet özelliklerini elde etmek için genel olarak %60-70 hacimsel orandaki sürekli fiberler farklı dağılımlarda tabakaların içerisine istiflenir. Fiberlerin çapı küçüldükçe mukavemeti artar ancak çap küçüldükçe maliyet de artış gösterir ayrıca küçük çaplı yüksek mukavemetli fiberler yüksek elastikiyete sahiptir ve fabrikasyona uygundur. Kompozit malzemeler sadece fiberlerin dizildiği yönde kullanıldığında yüksek dayanıma sahiptir. Şekil 2.2’de polimer matrisli bir kompozit malzemede fiberlerin dizilim yönüne göre uygulanan gerilmeye bağlı olarak malzemenin mukavemetine olan etkileri gösterilmiştir.



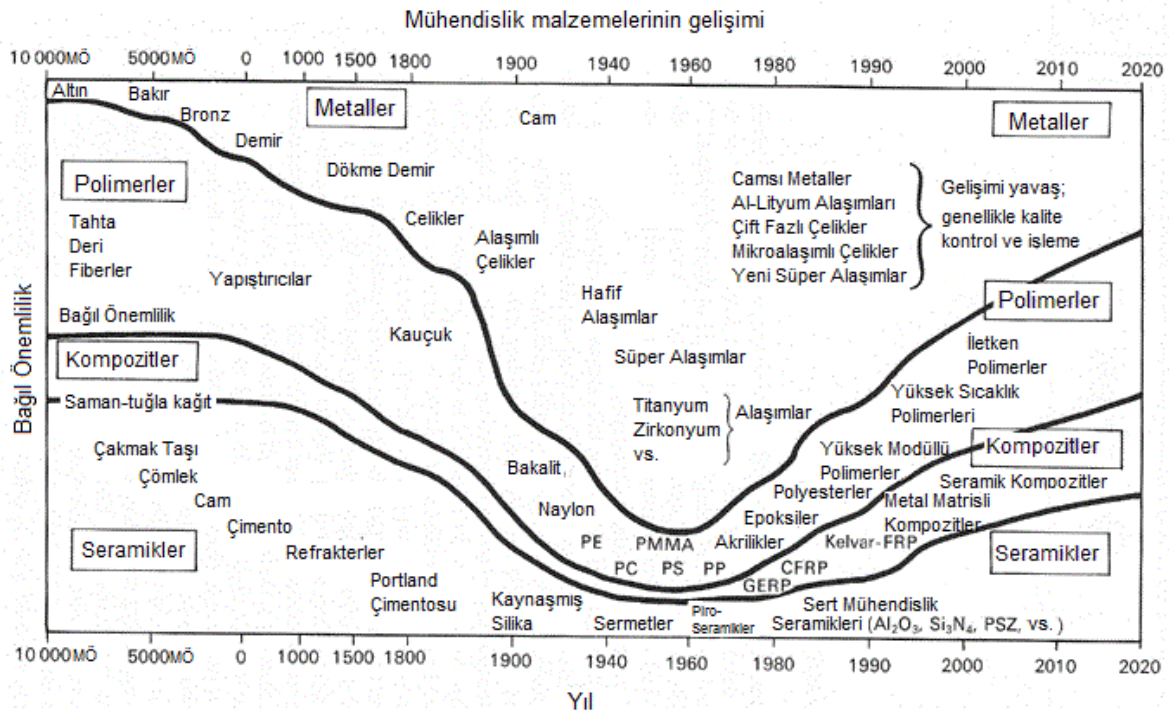
Şekil 2.2 Fiber dizilim yönlerinin çekme mukavemetine etkisi (Bagherpour 2012).

Kompozit malzemelerdeki sürekli faz olan matrisler polimer, metal veya seramik olabilir. Matris malzemenin çeşidine göre kompozitin mekanik özellikleri de değişir, örneğin metal matrisli kompozitler orta derecede mukavemet ve sertlik sağlarken yüksek derecede süneklik sağlarlar. Ancak malzemenin çeşidinden bağımsız olarak matris malzemenin sahip olması gereken temel özellikler vardır, bunlar arasında takviye malzemeyi uygun dizilim veya dağılımda tutmak, aşınmadan ve çevresel etkilerden korumak gösterilebilir.

2.2 KOMPOZİT MALZEMELERİN TARİHÇESİ

İnsanoğlu tarih boyunca çeşitli ihtiyaçlarına çözüm olabilecek malzemelerin kullanımını ve özelliklerini araştırmıştır. Şekil 2.3’de mühendislik malzemelerinin tarihi gelişimi gösterilmektedir. Yaygın kullanılan seramik ve metalik malzemelere göre endüstriyel anlamda kullanılan polimerlerin keşfedilmesi nispeten daha yenidir.

Kompozit malzemelerin en erken imalatı ve kullanımı ilkel olarak nitelendirilebilecek yöntemlerle yapılmaktaydı, barınak oluşturmak için doğal malzemeler olan saman ve çamur karıştırılarak basit kompozitler üretilmekteydi. Fiber biçimli olan saman malzemeye çekme mukavemeti kazandırırken çamur ise basma mukavemeti kazandırıyordu. Böylece çamur içerisine samanların istiflenmesi ile birlikte sağlam bir yapı malzemesi elde ediliyordu. (Palucka, Bensusade and Vincent 2002).



Şekil 2.3 Mühendislik malzemelerinin tarihi gelişimi (Ashby 2005).

Kompozit malzemeler tarih boyunca bilinmesine rağmen endüstriyel anlamda kullanılan modern kompozitlerin ilk ortaya çıkışı 1930'lu yılların sonlarına doğru başlamıştır. Owens-Illionis Glass Şirketi tarafından camı fiberlere dönüştüren yeni bir sistem geliştirmiş ve bu

cam fiberler tekstil kumaşlarının içerisinde dokunmaya başlanmıştır. Aynı dönemde kimya şirketlerinin de yeni polimerler malzemeler bulmak için araştırmalar yürütmesi, kompozit alanını domine edecek olan ve 1936 yılında patenti alınan doymamış polyester reçine ile birlikte fenolik, üre ve anilin-formaldehit reçineler geliştirilmesini sağlamıştı. Başlangıçta bu termoplastik ve termoset reçineler sadece paketleme, yapıştırıcılar ve düşük maliyetli plastiklerin dökümünde tek başlarına kullanılmak amacı ile araştırılmaktaydı. Ancak polimerik malzemelerin fiberleri bir arada tutacak matris bir malzeme olarak düşünölmeye başlanması çok uzun zaman almamıştır. Bu alanda çalışan mühendis ve uzmanlar bu iki malzemeyi bir arada kullanmanın en iyi yolunu araştırmaya başlamışlardır. Başlangıçta reçineleri kürleştirmek için kompozitlere yüksek basınç uygulanmış ancak uygulanan yüksek basınç cam fiberlere zarar vermiştir. Bu sorunu çözmek için düşük basınçlı alil polyesterler geliştirilmiş ve 1942 yılında PPG CR-38 ve CR 39 reçineleri kullanılarak ilk camfiber takviyeli levhalar üretilmiştir. Cam fiber takviyeli kompozitler ilk olarak denizcilik endüstrisinde kullanılmış, örneğin II. Dünya Savaşı sırasında Normandiyaya çıkarma yapan gemiler cam fiberden takviyeli kompozit parçalardan imal edilmişti. Takip eden yıllarda kompozit malzemeler havacılık sektöründe kullanılan yapısal parçalarda denenmiş ve ilk kez 1943 senesinde cam fiber takviyeli kompozitten imal edilmiş göet al.eye sahip uçaklar A.B.D.'nin Ohio eyaletinde Wright-Patterson Askeri Havalimanı'ndan uçurulmuştur. Kompozit malzemeler alanında kısa sürede elde edilen gelişmeler ile birlikte yeni takviye malzemeler de araştırılmaya başlanmıştır. 1960'lı yıllara karbon (grafit) ve bor takviye malzemesi olarak kullanılmaya başlanmış ve aynı dönemde geliştirilmelerine rağmen düşük maliyeti ve işleme kolaylığı sebebiyle karbon daha yaygın olarak kullanılmıştır. 1964 yılında Stephanie Kwolek tarafından aramid fiber takviyesi kullanılarak geliştirilen Kevlar ile birlikte kompozitler koruyucu ekipmanların imalatında kullanılmaya başlanmıştır. 1970'li yıllarda karbon fiber takviyeli kompozitler spor malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştı. Tahta tenis racketlerinin ve çelik golf sopalarının yerini daha hafif ve dayanıklı olan karbon fiber takviyeli kompozit racket ve sopalar almıştı. 90'lı yıllardan itibaren hem akademik hem de endüstriyel alanda çalışan araştırmacılar kompozit malzemeleri daha küçük ölçekte incelemeye başlamışlardır. Makroskopik düzeyden moleküler düzeye inen hibrit kompozitler ile bileşenleri nanoölçöğe kadar küçölen nanokompozitler bu araştırmaların iki temel konusu olmuştur. Günümüzde kompozit malzemeler ile ilgili çalışmalar hem nano ölçekte hemde makro ölçekte güncelliğini korumaktadır (Palucka, Bensuade and Vincent 2002).

2.3 MATRİS MALZEMELERİNE GÖRE KOMPOZİTLER

2.3.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMC) adından da anlaşılacağı üzere metal bir fazın içerisine başka bir metal veya farklı tür bir malzemenin eklenmesi ile oluşturulur. Metal matrisli kompozit malzemeler tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere, bir metal matris içinde sürekli veya kısa fiber, whisker veya partikül şeklinde takviye fazı içerir. Metal matrise eklenen başlıca takviye elemanları bor, karbon, silica ve alümina'dır. Bu takviye malzemeler kompozitin çekme dayanımı ve elastisite modülünü yükseltir. Metal matrisli kompozitlerde düşük yoğunluk ile yüksek mukavemet elde etmek mümkün olabilmektedir. Ayrıca yorulma direnci, ısı kararlılık, aşınma direnci MMC'lerin avantajları arasında sayılabilir (Eker 2008a).

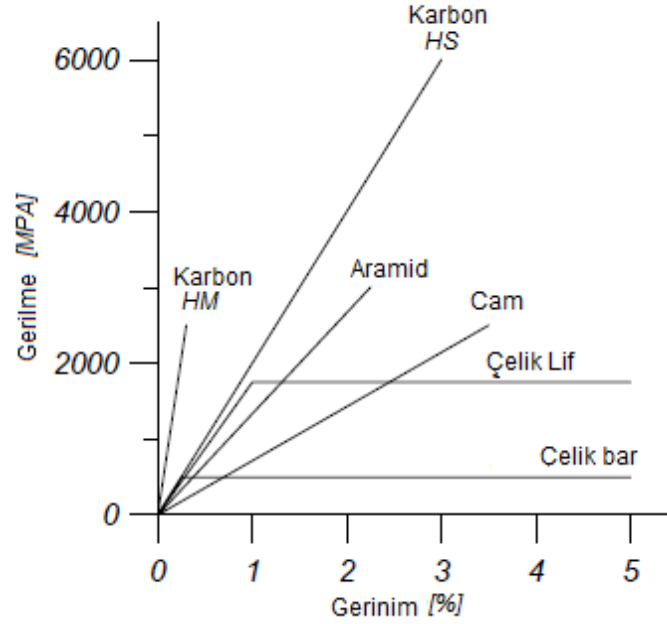
2.3.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozitler (CMC), seramik matrise takviye edilen metalik/metalik olmayan takviyeleri içeren ileri sınıf yapı malzemeleridir. CMC'ler sert ve kırılgan malzemeler olmalarından dolayı, çok düşük kopma uzaması gösterirler, düşük tokluğa sahiptirler ve termal şoklara karşı dayanıksızdırlar. Bu nedenle karbon, seramik ve cam fiberler özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilirken, seramik malzemelerin seramik fiberler ile takviye edilmesi durumunda, mukavemet yükselmekte ve tokluk da artmaktadır. Seramik matrisli kompozit malzemelerde; matris malzemesi olarak Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 ve B_4C yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye malzeme olarak ise genellikle fiber formuna getirilmiş Al_2O_3 ve SiC kullanılır (Eker 2008b).

2.3.3 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler (PMC), organik bir polimer matris ile birbirine bağlı çeşitli kısa veya sürekli elyaflardan oluşur. Takviye malzemenin esas olarak kırılma tokluğunu iyileştirmek için kullanıldığı seramik matrisli kompozitlerin aksine, PMC'deki takviye, yüksek mukavemet ve sertlik sağlar. Polimer matrisli kompozitler ve fiber takviyeli polimerler genel olarak takviyeli plastikler olarak adlandırılır. PMC'lerde kullanılan

fiberlerler genel olarak cam (GFRP), grafit (CFRP) ve aramid (Kevlar)'dır. Bu fiberler yüksek özgül mukavemet ve özgül sertlik(sertlik/ağırlık oranı) değerlerine sahiptir. Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan farklı fiber malzemelerin gerilme-gerinim eğrileri Şekil 2.4'de görülmektedir. Matris malzemeler genel olarak polyester, epoksi(takviyeli plastiklerin %80'i), florokarbon, silikon gibi termoset ve termoplastik polimerlerdir (Eker 2008c).



Şekil 2.4 Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan farklı fiber malzemelerin gerilme-gerinim eğrileri (Carolyn 2003).

2.3.3.1 Karbon Fiber Takviyeli Kompozitler (CFRP)

Karbon fiber takviyeli kompozitler (CFRP), yüksek mukavemete sahip düşük yoğunluklu kompozit malzemelerdir. Epoksi ve polyester reçineler CFRP'lerde kullanılan matrisler içerisinde en etkileyici özelliklere sahip olmalarına rağmen diğer pek çok reçine de bu kompozitlerde kullanılabilir. Çizelge 2.1'de polyester ve epoksinin malzeme özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 CFRP’lerde kullanılan epoksi ve polyester malzemelerin özellikleri (Carolin 2003).

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Gerilme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kırılma Şekil Değiştirmesi (Zorlanma) (%)
Polyester	1000-1450	20-100	2.1-4.1	1.0-6.5
Epoksi	1100-1300	55-130	2.5-4.1	1.5-9.0

Takviye malzemesi olarak kullanılan karbon fiberler ise yeni nesil yüksek mukavemetli malzemelerdir. Karbon fiberler elastisite modülü, mukavemet ve son ısıl işlem sıcaklığına göre birkaç gruba ayrılır.

Karbon fiberin özelliklerine göre;

- Yüksek modüllü, HM tipi karbon fiberler (350-450 GPa)
- Orta düzey modüllü, IM tipi karbon fiberler (200-350 GPa)
- Düşük modüllü ve yüksek gerilme mukavemetine sahip, HT tipi karbon fiberler (elastisite modülü<100GPa, Gerilme mukavemeti>3.0 GPa)
- Süper yüksek gerilme mukavemetine sahip, SHT tip karbon fiberler (Gerilme mukavemeti>4.5 GPa)

Karbon fiberlerin elde edildiği malzemelere göre;

- Poliakrilonitril (PAN) bazlı karbon fiberler
- Zift bazlı karbon fiberler
- Suni ipek bazlı karbon fiberler

Son ısıl işlem sıcaklığına göre;

- I.Tip, son ısıl işlem sıcaklığı 2000 °C’den yüksek olan ve HM tipi fiberler ile ilişkilendirilebilen yüksek sıcaklıklı ısıl işleme tabi tutulmuş karbon fiberler (HTT)
- II.Tip, son ısıl işlem sıcaklığı 1500 °C’den yüksek olan ve yüksek mukavemetli fiberler ile ilişkilendirilebilen orta dereceli sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş karbon fiberler (IHT)

- III.Tip, son ısıt işlemler sıcaklığı 1000 °C'nin altında olan düşük modüllü ve düşük gerilme mukavemetine sahip karbon fiberlerdir.

Yüksek mukavemetli, hafif CFRP kompozitleri uzun yıllardır savunma ve havacılık sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta ve yakın zaman önce lüks otomobiller, rüzgar türbinleri ve sıkıştırılmış gaz depolama tanklarında kullanılmaya başlanmışlardır. Hafif, yüksek mukavemetli ve sert malzemeler olan CFRP'ler, farklı malzemelerin cazip özelliklerinin bir kombinasyonu niteliğindedir. Hafif malzemeler ulaşım sektöründe önemli tasarruflar sağlamakta ve "hafifleştirme" işlemi ulusal enerji hedeflerine ulaşmakta kilit bir stratejidir bu CFRP'lerin kullanımında artışa sebep olmaktadır.

Karbon fiber takviyeli kompozitler, ağırlık tasarrufu, hassas mühendislik ve hem operasyonda hem de üretimde parçaların basitleştirilmesini gerektiren her tasarım sistemi için uygun malzemelerdir (Masuelli 2013).

2.2.3.2 Cam Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler (GFRP)

Cam fiber takviyeli polimer kompozitler (GFRP), cam fiber ile matris reçinenin birleştirilmesi ile elde edilir. GFRP malzemeler ortam koşullarına dayanıklı elastisitesi yüksek ancak yeterli mukavemete sahip olmayan reçine ile yüksek mukavemete sahip cam fiberin birleştirilmesiyle elde edilen malzemelerdir (Afşar 2017).

Cam fiberler günümüzde termoset ve termoplastik matrisler ile birlikte kullanılan takviye uygulamalarının %90'ına yakınında kullanılmaktadır. Cam fiberlerin en eski ve hala en çok kullanılan şekli E-camıdır. E-cam, alümina-kalsiyum-borosilikat camı olup en fazla %2 oranında alkali ve %7-10 seviyelerinde bor içerir, alkaliye dayanıklı ve elektriksel özellikleri iyi olan bir cam fiberidir. Daha farklı özelliklere ihtiyaç duyulduğunda, örneğin s-camı gibi yüksek mukavemete sahip fiber malzemeler kullanılabilir.

Cam fiber çeşitleri ve özellikleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Cam fiberler tipleri ve bu tipleri oluşturan katkı malzemelerinin kompozisyonları (Eker 2008c)

Özellikler	Cam Tipi			
	A	C	E	S
Özgül ağırlık (g/cm^3)	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastik modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti (MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl genleşme katsayısı ($\text{m/m/}^\circ\text{C} \cdot 10^6$)	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	727.0	749.0	841.0	970.0
Katkı malzemeleri (%)				
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na ₂ O ₃ , K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3

Çizelge’den anlaşılabacağı üzere cam fiberleri oluşturan ana katkı malzemesi SiO₂’tir. Yukarıda teknik özellikleri belirtilen cam fiberler içerisinde S-tipi cam fiberlerin mekanik özellikleri diğerlerine göre daha gelişmiş olmasına rağmen, maliyeti yüksektir. C-tipi cam fiberler ise korozyon dirençleri iyi olduğundan dolayı genellikle yüzey uygulamalarında kullanılırlar. (Gächter and Müller 1986).

Yüksek özgül mukavemet, hafiflik, tasarım esnekliği, boyutsal kararlılık, yüksek dielektrik direnci, korozyon dayanımı, kalıplama kolaylığı gibi önemli özellikler cam fiberlerin avantajları arasında gösterilebilir (Cam Elyaf San. A.Ş.).

GFRP malzeme ile üretilmiş kaset beton kalıpları, kiremit görünümlü çatı kaplamaları ve bina alınlıkları, inşaat sektöründe, komple veya kısmen yapılan otomobil göet al.e parçalarının yanısıra, GFRP’ den yapılmış frigorifik kamyon kasaları ve minibüslerin yükseltilmiş tavanları otomotiv sektöründe GFRP uygulamalarının başlıca örnekleridir (Afşar 2017).

2.2.3.3 Aramid Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

İleri kompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanılan, yeterli elastisite modülüne ve çekme mukavemetine sahip ilk organik fiberler aromatik poliamidler(aramidler)dir. Aramid fiberler yüksek mekanik özelliklerinin yanı sıra bu özellikleri yüksek sıcaklıklarda da muhafaza edebilir, ısı ve alev karşı mükemmel derecede dayanıklıdır (Jassal and Ghosh 2001).

Aramid fiberler çeliğe göre daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Bundan dolayı, havacılık gibi ağırlık hassasiyeti gerektiren uygulamalarda kullanıma uygundurlar. Ancak aramidin çekme mukavemeti karbon fiber ve cam fibere göre daha düşüktür, her üç malzeme değerlendirildiğinde hangisinin kullanılacağına malzemelerin farklı üstün özellikleri kıyaslanarak operasyon için optimum olan malzeme seçilebilir. Aramid, e-cam ve karbon fiber takviye malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırması Çizelge 2.3’de görülebilir.

Çizelge 2.3 Farklı takviye malzemelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırması (url-3).

Malzeme	Fiber Mukavemeti (MPa)	Tabaka haldeki mukavemet (MPa)	Tabaka haldeki yoğunluk (gr/cm ³)	Mukavemetin ağırlığa oranı
E-cam	3450	1500	2.66	564
Karbon fiber	4127	1600	1.58	1013
Kevlar	2757	1430	1.44	993

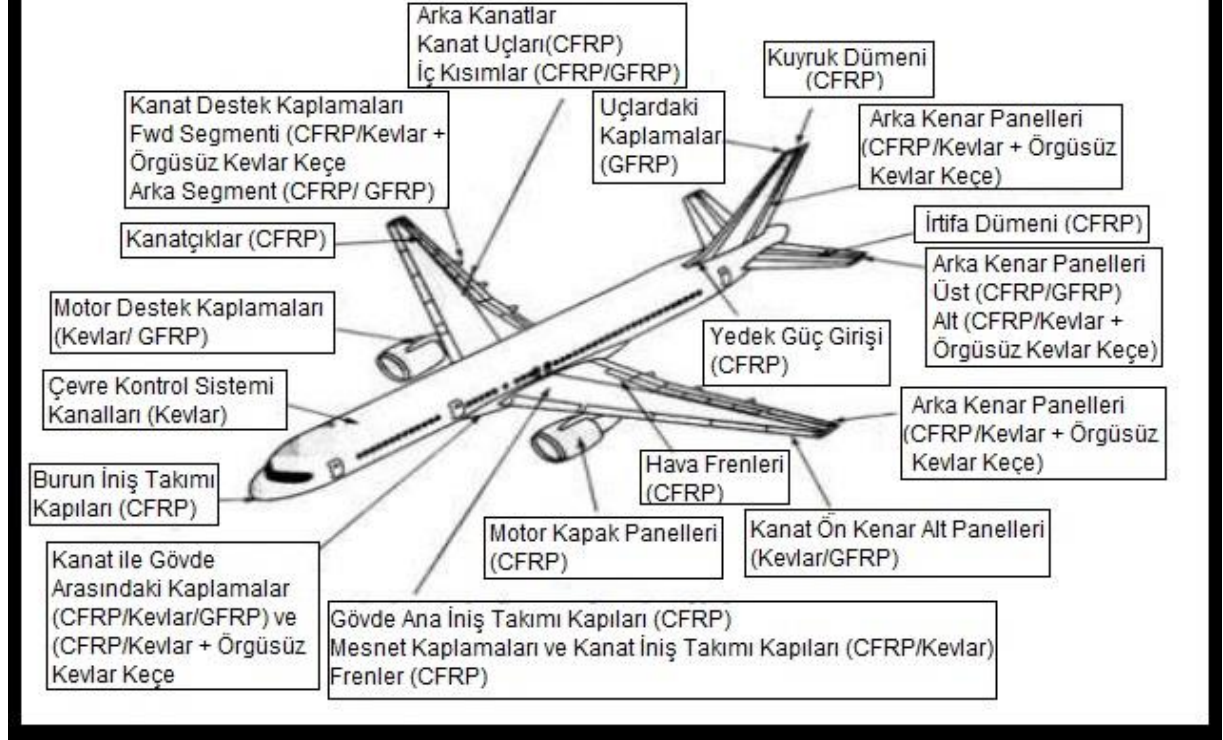
Aramid fiberler, havacılık ve savunma sanayiinde, balistik zırh plakalarında ve kaya yünününde kullanılır. Mükemmel alev ve ısı dayanımları olduğu için aramid fiberler normal oksijen seviyesinde erimez veya tutuşmaz. Aramid fiberler, koruyucu giysilerin üretiminde, hava filtrasyonunda ve kaya yünü olarak elektrik ve ısı izolasyonunda kullanılırlar (Sahu et al. 2014).

2.4 İLERİ HAVACILIK KOMPOZİTLERİ

Havacılık endüstrisinde çeşitli kompozitler yaygın olarak kullanılır. Uçaklarda yaygın olarak kullanılan kompozit malzemeler arasında fiberglas, karbon fiber ve fiber takviyeli matris sistemleri veya bunların herhangi bir kombinasyonu bulunmaktadır. Uçak üreticilerinin kompozit malzemeleri kullanmak ve havayolu şirketlerinin de kompozitlerin filolarında kullanılmasını istemek için pek çok iyi nedeni vardır. Pek çok kompozit malzeme geleneksel metalik malzemelere kıyasla, nispeten daha fazla mukavemet sağlayarak uçağın ağırlığını ve yolcu başına taşınan yakıt maliyetini düşürür. Kompozitler tekrarlanan kalkış/iniş çevrimlerinden kaynaklanan yorulmaya karşı metalden daha dayanıklıdır ve böylece uçağın ömrü boyunca denetimleri daha az masraflı olurken uçağın havada para kazandırdığı süre daha fazla olmaktadır (Mrazova 2013).

Uçak tasarımcıları araçlarını daha hafif, daha verimli ve daha konforlu hale getirmek için giderek artan bir şekilde kompozit malzemelere başvurmaktadır. Kompozit malzemelerin artan kullanımının arkasında birkaç faktör bulunmaktadır. Petrol fiyatları, çevre sorunlarına karşı tutum değişikliği(CO₂'in azaltılması, algılanan gürültünün %50 azaltılması, NO_x'in %80 azaltılması gibi ACARE'nin 2020 hedefleri) ve havayolu trafiğinde beklenen artış üretici firmaları daha hafif malzemelerden oluşan uçaklar yapmaya itmektedir. Bu sebeplerden ötürü, Boeing 747 serilerinde ağırlıkça %1 civarında olan kompozit malzeme kullanımı 787'de %50 seviyesine yükselmiştir. 757 ve 767 serilerinde artan kompozit malzeme kullanımı devam etmiş ve Boeing, 787 Dreamliner kompozit kanatlar ve göet al.e ile imal edilen ticari bir uçak üretimini başlatan ilk uçak üreticisi olmuştur. Boeing 757'de kullanılan kompozit malzemelerden imal edilen parçalar Şekil 2.5'de gösterilmiştir (url-4).

Boeing 757-200

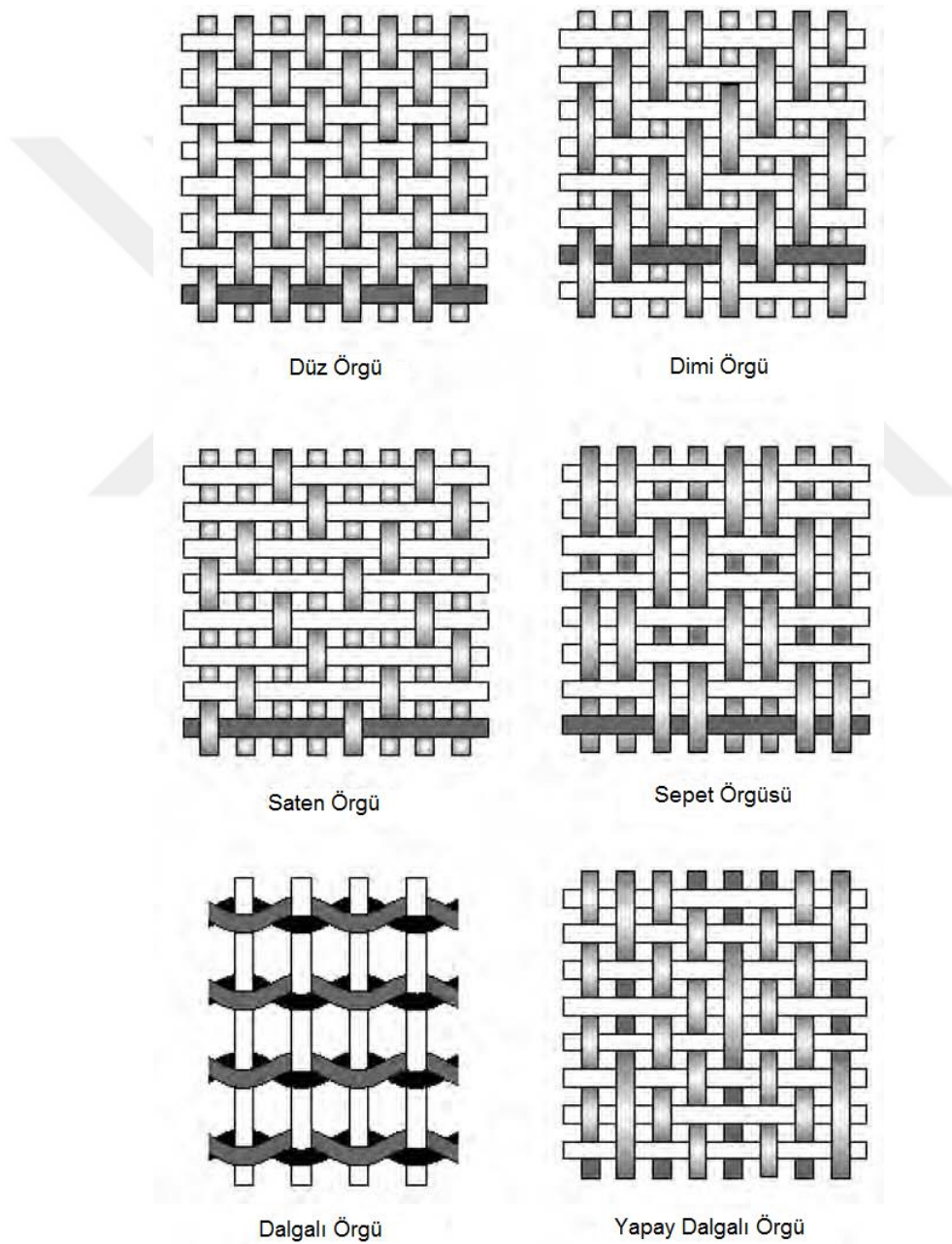


Şekil 2.5 Boeing 757-200’de kullanılan kompozit parçalar (url-4).

2.4.1 İki Boyutlu (2D) Fiber Takviyeli Örgülü Kompozitler

2D dokuma, çözüğü ve argaç olarak bilinen iki iplik takımını 90 derecelik açı ile birbirine geçirerek rijit kumaş üretme işlemidir. Genel olarak çözüğü ipliği, dolgu ipliklerinden daha fazla burkulma ve çekme mukavemetine sahiptir ve yoğunluğu santimetre başına karşılık gelen uç sayısı ile ifade edilir. Argaç iplikleri çözüğü ipliklerine dik eğimli olma eğilimindedir ve "dolgu iplikleri" olarak adlandırılırlar. 2D kumaşlara örnek olarak düz, dimi ve saten kumaşlar gösterilebilir. Bu 2D kumaşları, düşük maliyetli, hafif ve yüksek darbe direncine sahiplerdir. Bununla birlikte, iplik geçişlerinde çökme ve kıvrım varlığı 2D dokuma kumaşının mekanik performansını etkilemektedir (Baucom and Zikry 2005).

İki boyutlu kompozitler genellikle 0° , 90° 'lik bir yapı olarak sunulmaktadır. Bununla birlikte, eğilimli dokumalar (45° , 45°) temel 0° , 90° yapının bükülmesiyle elde edilebilir. Çoğu dokuma hem çözgü hem de dolgu yönünde eşit sayıda lif içerir ve aynı malzemeyi kullanır. Ancak, karbon ve cam'ın bir arada kullanıldığı hibrit dokumalar ve çözgü ipliklerinin hakim olduğu örgüler de üretilebilir. Dokuma tipleri, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi çeşitli birbirine geçme örnekleri ile sınıflandırılabilir. Genel olarak yüksek performanslı kompozitlerde kullanılan en yaygın iki örgü türü düz ve saten örgülerdir (Campbell 2010).



Şekil 2.6 Yaygın olarak kullanılan 2D örgü çeşitleri (SP Systems 2005).

Düz örgüler, diğer örgü türlerine göre daha fazla birim alana düşen örgüye sahiptir ve dolayısıyla en sıkı kumaş tasarımına sahiptir böylece kesme mukavemeti en yüksek olan örgü türüdür.

Sepet örgüsü, iki (veya daha fazla) çözgü ve iki (veya daha fazla) dolgu ipliğinin birlikte dokunduğu düz dokuma çeşididir. İki dolguya geçen iki çözgü düzeni 2x2'lik bir sepet olarak gösterilir, ancak fiberlerin düzeninin simetrik olması gerekmez; 8x2, 5x4 ve diğer varyasyonları üretmek de mümkündür. Sepet örgü düz örgüden daha az kıvrıma sahiptir ve bu nedenle biraz daha mukavemetlidir.

Saten dokumalar, dolgu ve çözgünün birbirine asgari sayıda geçmesi ile karakterizedir ve bu nedenle, düzlemsel kesme hareketine daha az direnç gösterir ve dōşenebilirliğı en iyi olan örgü türüdür. Düz dokumalar genellikle daha az kavisli parçalar için kullanılırken, saten dokumalar daha kıvrımlı parçalar için kullanılır. Daha az lif kıvrımına sahip olması nedeniyle, saten örgü kumaşlar düz örgü kumaşlardan daha güçlüdür.

Dimi örgü tipi dokumalar düz örgülerden daha iyi dōşenebilirliğe sahip oldukları ve emdirme esnasında son derece iyi ıslanmaları ile ünlü oldukları için, bazı uygulamalarda kullanılabilirler. Dimi örgü tipi dokumalarda, bir veya birden fazla çözgü yine bir veya birden fazla dolgunun üstünden ve altından tekrar eden bir şekilde geçirilerek örgüye düz veya kırık bir nervür şekli kazandırılır.

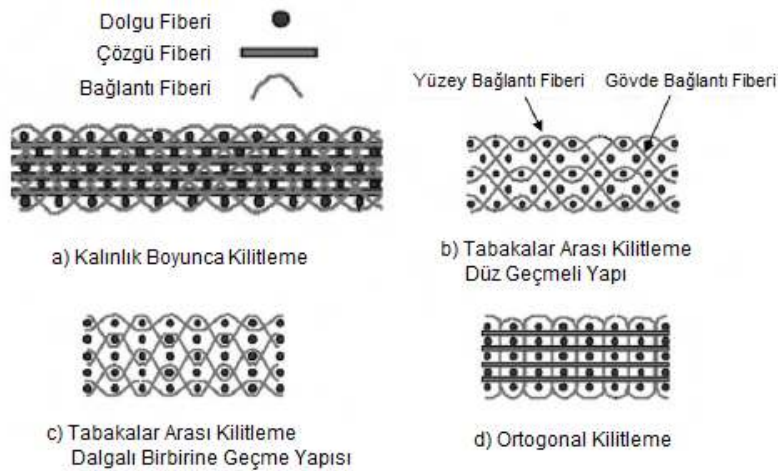
Dalgalı ve yapay dalgalı örgü çeşitleri yapısal kompozitler için nadiren kullanılır. Dalgalı örgü düz dokumanın bir çeşididir ve bitişik çözgü fiberleri ardışık dolgu lifleri arasında bükülerek spiral bir çift oluşturur ve her bir dolguyu yerine etkili bir şekilde kilitler. (Campbell 2010).

Örgü çeşitleri kompozit malzeme oluşturmak için termoset ve termoplastik reçineler ile birleştirilir. Bu birleştirme işleminin tamamlanması için gereken kürleşme işlemi bir kaç aşamadan oluşmaktadır. Termoset reçineleri kürleştirmek için kimyasal reaksiyondan faydalanılır. A, B ve C olarak adlandırılan üç kürleşme aşaması vardır;

- A aşaması: Reçinenin bileşenleri (baz materyali ve sertleştirici) karıştırılmış, ancak kimyasal reaksiyon başlatılmamıştır. Reçine ıslak kaplama işlemi sırasında A aşamasındadır.
- B aşaması: Reçinenin bileşenleri karıştırılarak kimyasal reaksiyon başlatılmıştır. Malzeme kalınlaşmış ve yapışkanlığı artmıştır. B aşamasında reçineler emdirilmeye başlanmıştır. Daha fazla kürleşmeyi önlemek için kompozit malzeme -18°C (0°F)'ye soğutulur. Donmuş durumda emdirilen malzemenin reçinesi B aşamasında kalır. Malzeme soğutucudan çıkarılıp tekrar ısıtıldığında kürleşme başlar.
- C aşaması: Reçine tamamen kürleşmiştir. Bazı reçineler oda sıcaklığında kürleşmeye başlarken diğerleri tamamen kürleşmek için daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyabilir. (F.A.A. 2012).

2.4.2 Üç Boyutlu(3D) Fiber Takviyeli Örgülü Kompozitler

Kompozit malzemelerin destek ve bağlantı parçaları gibi karmaşık yapılarda kullanılamamasının ana sebeplerinden biri 2D kompozitlerin düzlem dışı karmaşık yükleri verimli olarak karşılayamamasından kaynaklanır. 3D kompozitler bu sorunları giderilebilme potansiyeline sahiptir. 3D örgü, nominal olarak düz olan çözgü ve dolgu ipliklerinden oluşan birden fazla düzlem içermektedir ve bu düzlemler bağlantı iplikleri ile birbirlerine birleştirilerek sıkı bir yapı oluşturmaktadır. Şekil 2.7'de 3D fiberlerin tasarımları gösterilmektedir.

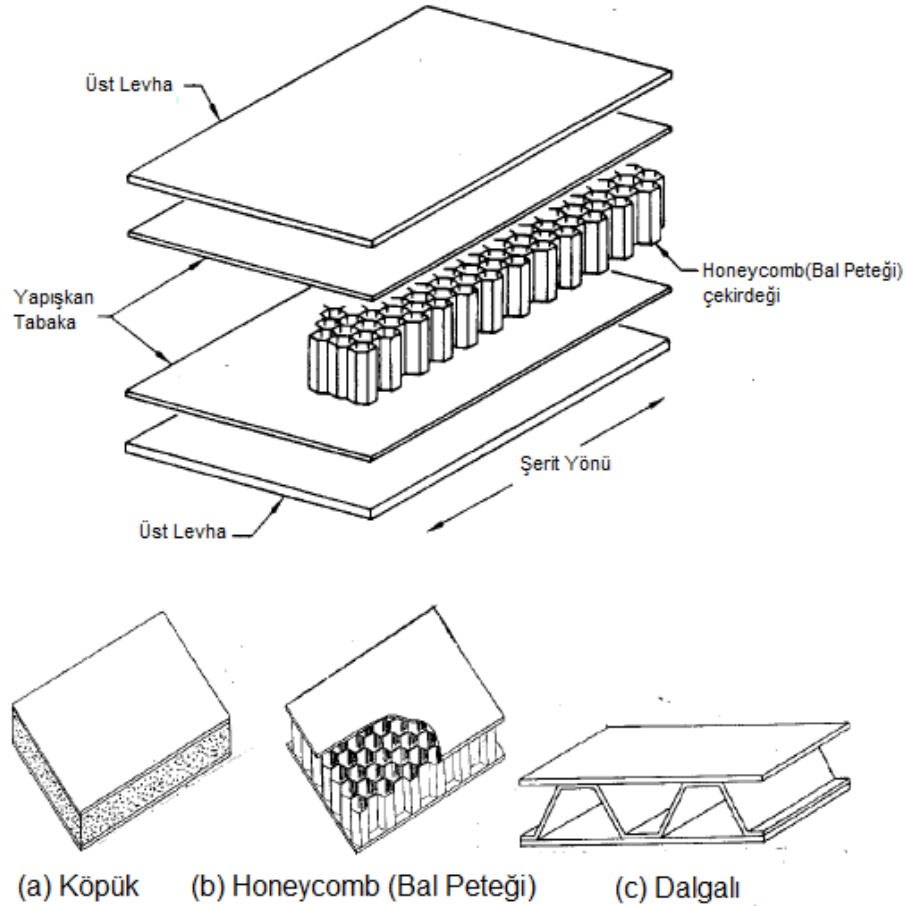


Şekil 2.7 Çeşitli 3D Fiber Örgü Tasarımları (Cox and Flanagan 1997).

3 boyutlu dokunmuş preformlar karmaşık şekilli preformları imal etme potansiyeline sahiptir ancak hazırlık süresi uzun ve dokuma işlemi yavaştır. 3D kompozitlerde küçük büküm boyutları maliyeti arttırırken, sertleşme sırasında veya daha sonra kompozit parça kullanıma girdiğinde matriste mikro kırılmaya duyarlı olan büyük reçine yığınlarını ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır (Campbell 2010).

2.4.3 Sandviç Kompozitler

Sandviç kompozitler, yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip olmalarından dolayı uçak, füze ve uzay araçlarında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Sandviç kompozitler, Şekil 2.8'te gösterildiği gibi düşük yoğunluklu bir malzemeden oluşan kalın bir tabaka ile ayrılmış metalik veya fiber kompozit malzemelerden oluşan ince, sert ve güçlü tabakalardan oluşur (Ratwani 2010).



Şekil 2.8 Honeycomb yapısı ve çekirdek çeşitleri; a) Köpük, b) Honeycomb, c) Dalgalı (Ratwani 2010).

Bazı sandviç kompozitlerde çekirdekdeki oluklar metal veya kompozit malzemelerden oluşabilir. Eğer üst plakalar metalik ise oluklu çekirdeğe yapışkanla, perçinle veya kaynak ile birleştirme işlemi yapılabilir. Kompozit üst plakaların kullanıldığı sandviç kompozitlerde ise çekirdek ile levhaların birleştirilmesi, yapıştırma işlemi ile veya çekirdeğin üst levhalar ile birlikte kürleşmesi sağlanarak yapılabilir. Sandviç kompozitlerde üst levhalar gerekli olan çekme, basma ve kesme gerilmelerine karşı direnç gösterecek rijitliğe sahip olmalı, çekirdek yük altında sandviç yapının tamamen bükülmesini önlemek için yeterli kesme modülüne sahip olmalıdır. Sandviç kompozitler mekanik ve sonik yorulmalara karşı oldukça dayanıklıdır, darbe sönümleme özellikleri iyidir ve termal özellikleri gelişmiştir (Ratwani 2010).



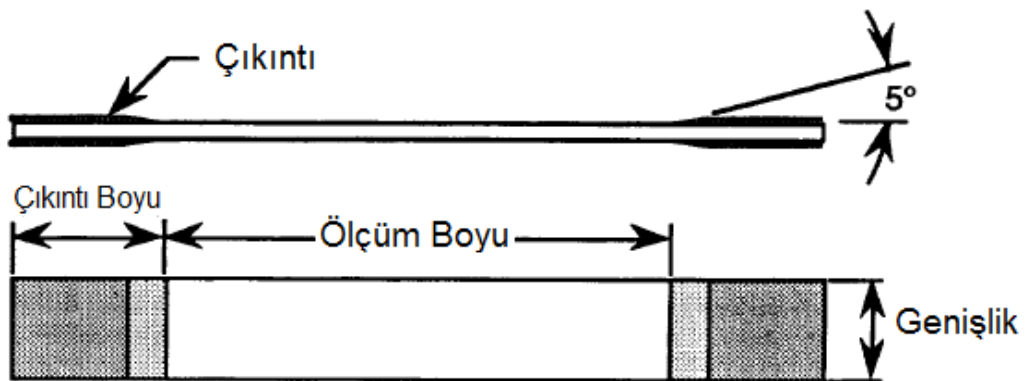
BÖLÜM 3

ÖRGÜLÜ KOMPOZİTLERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU

3.1 ÇEKME MUKAVEMETİ

Örgülü kompozitlerin mikroyapıları, tek yönlü tabakalı kompozitlerden oldukça farklıdır. Bu durum örgülü kompozitlerin daha yüksek derecede ayrışıklığa(homojen olmama) sahip olmasına yol açmaktadır. Ayrıca, tekstil kompozitlerinin düzlemsel ve kalınlık boyunca sahip oldukları elastisite ve mukavemet özelliklerinin göreceli büyüklükleri, tek yönlü tabakalı kompozitlerinkinden büyük olması örgülü kompozitlerin deneylerinde bazı özel hususları gerekli kılar. Tek yönlü tabakalı kompozitler için uygulanan numune boyutları, enstrümantasyon ve yükleme yöntemleri örgülü kompozitlerin mekanik özelliklerini ölçmek için yapılan deneylerde geçerli olmayabilir (Daniel and Ishai 2006).

Örgülü kompozitlerin çekme deneylerinde, numunenin genişliği tekstil birim hücresinin boyutuna oranla yeterince büyük olmalıdır. Numune için önerilen genişlik 25.4 mm (1 in.) ve minimum ölçme uzunluğu 127 mm (5 in.) olmalıdır. Deneyler, kumaşların dizilimleri boyunca, çözgü ve dolgu yönlerinde gerçekleştirilmelidir. Örgülü kompozitler için ASTM D3039'a göre standart çekme numunesi Şekil 3.1'de gösterilmektedir (Masters and Portanova 1996).



Şekil 3.1 Çekme deneyi için hasarsız örgülü kompozit numunesi (Masters and Portanova 1996).

Çekme mukavemeti aşağıdaki denkleme göre hesaplanır;

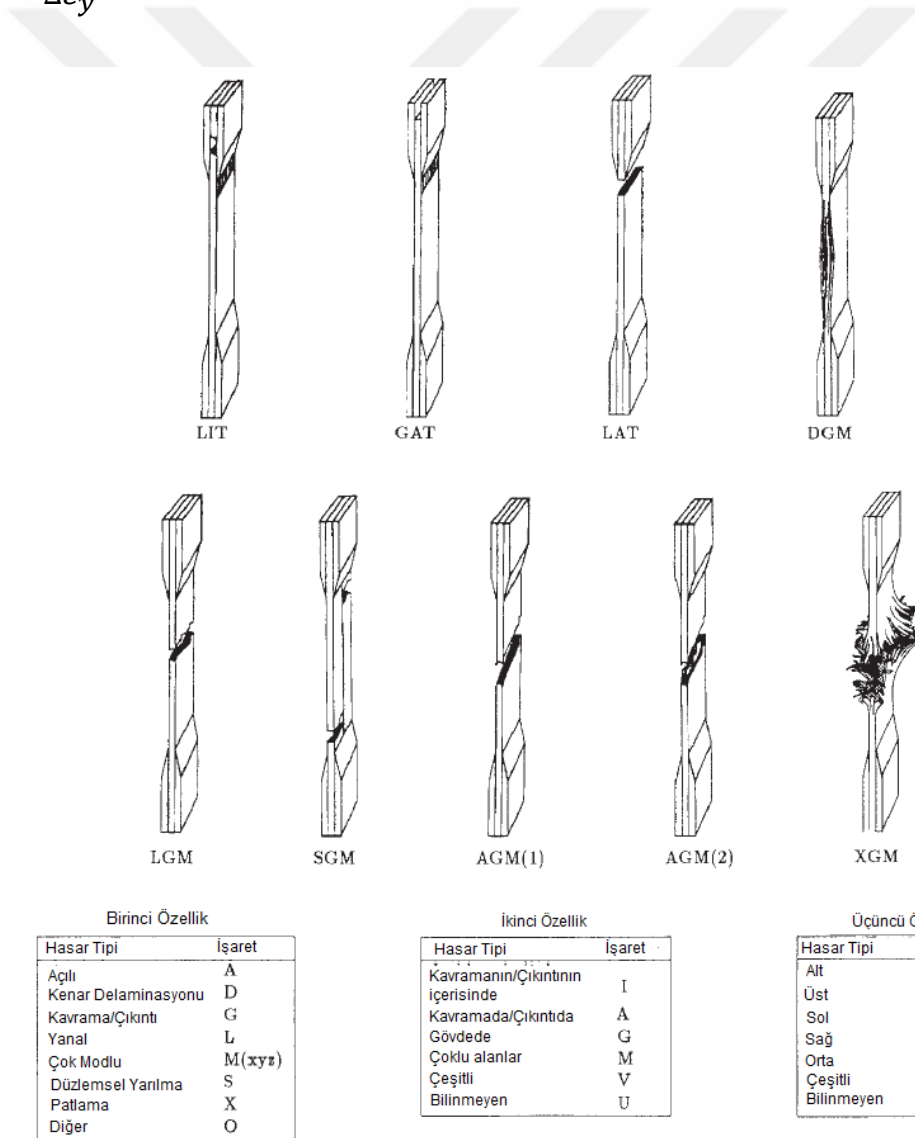
$$\sigma = \frac{P}{wt} \quad (3.1)$$

Elastisite modülü aşağıdaki denkleme göre hesaplanır.

$$E = \left(\frac{\Delta P}{\Delta I} \right) \left(\frac{I}{wt} \right) \quad (3.2)$$

Poission oranı aşağıdaki denkleme göre hesaplanır.

$$\nu = - \frac{\Delta \varepsilon_x}{\Delta \varepsilon_y} \quad (3.3)$$



Şekil 3.2 Çekme deneyi için hasar kodları/tipik modlar (ASTM 2002).

3.2 DİNAMİK KARAKTERİZASYON

3.2.1 Titreşim ve Ses Analizi

Uçaklarda kullanılan yapılar, havanın uçağa uyguladığı dirençten dolayı uçuş esnasında aerodinamik titreşime maruz kalır. Titreşimin rezonans genliği önemli ölçüde yapının her moduyla alakalı olan sönümlemeyen kaynaklanmaktadır. Bu durumda yapının doğal frekansının ve modal sönümlenmesinin bulunması zorunlu hale gelmektedir. Doğal frekanslar kompozit plakların ortotropik özelliklerine duyarlıdır ve tasarımın uygun hale getirilmesi doğal frekansın kontrol edilmesine yardımcı olabilir. Yapıların titreşim ve ses özelliklerini belirlemek için kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir.

3.2.1.1 Temel Eşitlikler

Serbest titreşim, harici kuvvetlere veya herhangi bir takviye harekete maruz kalmayan bir yapının hareketi anlamına gelmektedir. Sönümsüz doğrusal SDOF (tek serbestlik dereceli) sistemlerinin hareketi;

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + ku = 0 \quad (3.4)$$

Serbest titreşim, sistemin statik denge durumunu bozarak başlatılır. Zamanın sıfır olduğu anda deplasman $u(0)$ ve hız $\dot{u}(0)$ eklendiğinde;

$$u = u(0), \dot{u} = \dot{u}(0) \quad (3.5)$$

Böylece, denklemin çözümü standart yöntemlerle elde edilir:

$$u(t) = u(0) \cos \omega_n t + \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t \quad (3.6)$$

Titreşimin dairesel doğal frekansı, saniyedeki birim radyan cinsinden;

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.7)$$

Radyan frekansından, doğal frekans f_n , ω_n 'i 2π 'ye bölerek bulunabilir. Radyan frekansı bulunmadan, doğal frekans doğrudan da bulunabilir.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.8)$$

Sönümsüz bir sistemde serbest titreşimin bir devrini tamamlamak için gereken süre, sistemin titreşiminin doğal periyodudur.

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (3.9)$$

Titreşimin dairesel doğal frekansı Hz(saniyedeki devir sayısı) ile ifade edilir;

$$f_n = \frac{1}{T_n} \quad (3.10)$$

Kritik sönüm oranı;

$$\zeta = \frac{f_u^2 - f_l^2}{2f_d^2} \quad (3.11)$$

ζ 'nin 0.1'den düşük olduğu küçük sönüm oranları için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.

$$\zeta \approx \frac{f_u - f_l}{2f_d} \quad (3.12)$$

3.2.1.2 Modal Analiz

Örgülü kompozitlerin doğal frekansı, sönüm değerleri ve yapısal deformasyonuna bağlı bir değer olan mod biçimini içeren dinamik karakterini belirlemek için modal analiz yöntemi kullanılır.

Hareket denklemi:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (3.13)$$

Pek çok yapı için sönüm oranı %10'un altında olduğu için sönümlemeyi çoğu problem için ihmal edebiliriz. Sönümlemeyi ihmal edersek:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (3.14)$$

$\{\ddot{u}\}_1$ ve $\{u\}_1$ vektörleri için denklem yeniden yazılırsa:

$$[M]\{\ddot{u}\}_1 + [K]\{u\}_1 = \{F(t)\} \quad (3.15)$$

Yük vektörünün sıfıra ayarlandığı durumda dinamik denkleminin geçerli bir sonucu olan $\{\ddot{u}\}_2$ ve $\{u\}_2$ vektörlerin için:

$$[M]\{\ddot{u}\}_2 + [K]\{u\}_2 = 0 \quad (3.16)$$

İki denklem toplandığında:

$$[M]\{\ddot{u}\}_1 + [M]\{\ddot{u}\}_2 + [K]\{u\}_1 + [K]\{u\}_2 = \{F(t)\} + 0 \quad (3.17)$$

Denklemi daha sade bir biçimde ifade edersek:

$$[M](\{\ddot{u}\}_1 + \{\ddot{u}\}_2) + [K](\{u\}_1 + \{u\}_2) = \{F(t)\} \quad (3.18)$$

Bu durumda, $(\{\ddot{u}\}_1 + \{\ddot{u}\}_2)$ ve $(\{u\}_1 + \{u\}_2)$ sönümsüz dinamik denklemin geçerli bir çözümü olmaktadır. $\{\ddot{u}\}_2$ ve $\{u\}_2$ 'nin her ikisi de sıfır olduğu sürece problemin çözümü hareket denklemini ile bulunabilir. Ancak, sıfır olmayan bir vektör kümesi varsa o zaman dinamik denklem için çözüm yöntemini başlangıç koşulları belirler.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (3.19)$$

$$\{u\}(t) = \{U\}e^{i\omega t} \quad (3.20)$$

$$\{\ddot{u}\}(t) = -\omega^2\{U\}e^{i\omega t} \quad (3.21)$$

Bu denklemler kullanılarak aşağıdaki denklemi elde edebiliriz.

$$-\omega^2[M]\{U\}e^{i\omega t} + [K]\{U\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (3.22)$$

Denklemi daha sade bir biçimde ifade etmek için tarafları $e^{i\omega t}$ ile sadeleştirirsek;

$$([K] - \omega^2[M])\{U\} = \{0\} \quad (3.23)$$

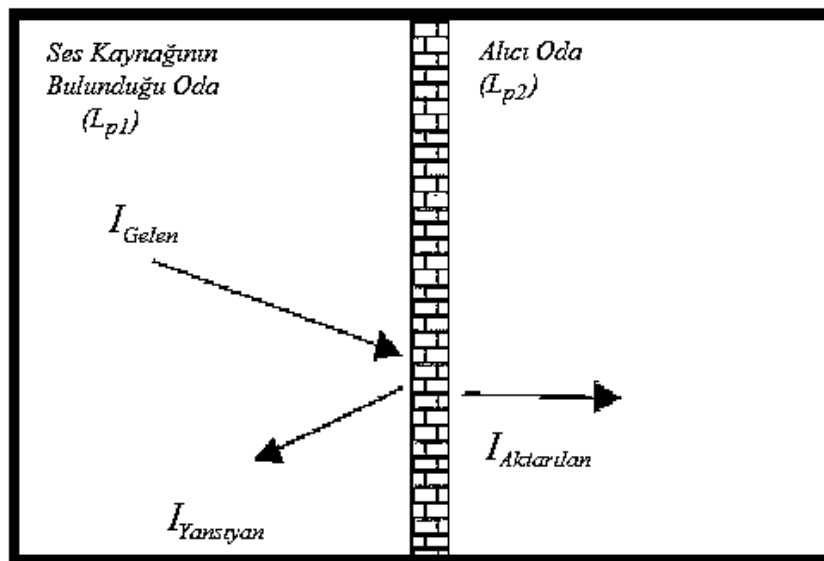
Bu denklemin amacı, ilgili frekansa(ω) karşılık gelen vektörü $\{U\}$ bulmaktır. $\{U\}$ 'yu bir şekil olarak ele almak daha uygundur. Bu yüzden $\{U\}$ mod şekili olarak adlandırılır. $\{U\}$, yapının ω frekansı ile salınımindaki şekildir. Bir yapı için birden fazla mod olabilir, her mod şekli söz konusu modun doğal frekansı olarak nitelendirilen çok spesifik bir frekansta meydana gelir.

3.2.1.3 Ses Bağlılıları

Ses basıncı veya akustik basınç, ses dalgasının yönüne dik olan bir yüzey alanındaki (m^2) sesin kuvveti (N) 'dir. Ses basıncı, SI birim sistemi için “N/m²” veya “Pa” ile ifade edilmektedir. Ses basıncı, havada mikrofon ile suda ise hidrofon ile ölçülebilir. Desibel (dB), iki değer arasındaki oranı gösteren logaritmik bir birimdir. Bu değerlerden biri genellikle standart bir referans değerdir, bu durumda desibel bu referansa göre diğer değer seviyesini ifade etmek için kullanılır. Desibel, ses basıncının bir birimi olarak akustikte yaygın olarak kullanılır. Ses ölçerken, ses basıncı seviyesini (SPL) desibel olarak belirlemek için aşağıdaki logaritmik formülü kullanırız.

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) dB \quad (3.24)$$

İletim kaybı(STL), bir duvar veya başka bir yapı tarafından durdurulan belirli bir frekanstaki ses desibel sayısını ifade eder.



Şekil 3.3 Tipik Ses Aktarımı (Lamancusa 2000).

İki oda arasına kısmen soğurucu bir bölüm konulduğunda, sesin bir kısmı tekrar odaya yansıtılır, bir kısmı da diğer odaya odaya aktarılır. Aktarılan ses yoğunluğunun başlangıçtaki ses yoğunluğuna oranı iletim katsayısını ifade eder.

$$\tau = \frac{I_{Aktarılan}}{I_{Gelen}} \quad (3.25)$$

Başlangıçtaki ses enerjisinin aktarılan ses enerjisine logaritmik oranı ses iletim kaybını ifade eder.

$$STL = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (3.26)$$

Akustik iletim, uçakların kompozit göet al.eleri için temel tasarım kriterlerinden biridir. Dolayısıyla bir göet al.e yapısının ses iletim kaybının (STL) öngörüsü büyük önem taşımaktadır.



BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 DENEY DÜZENEGİ VE KULLANILAN MALZEMELER

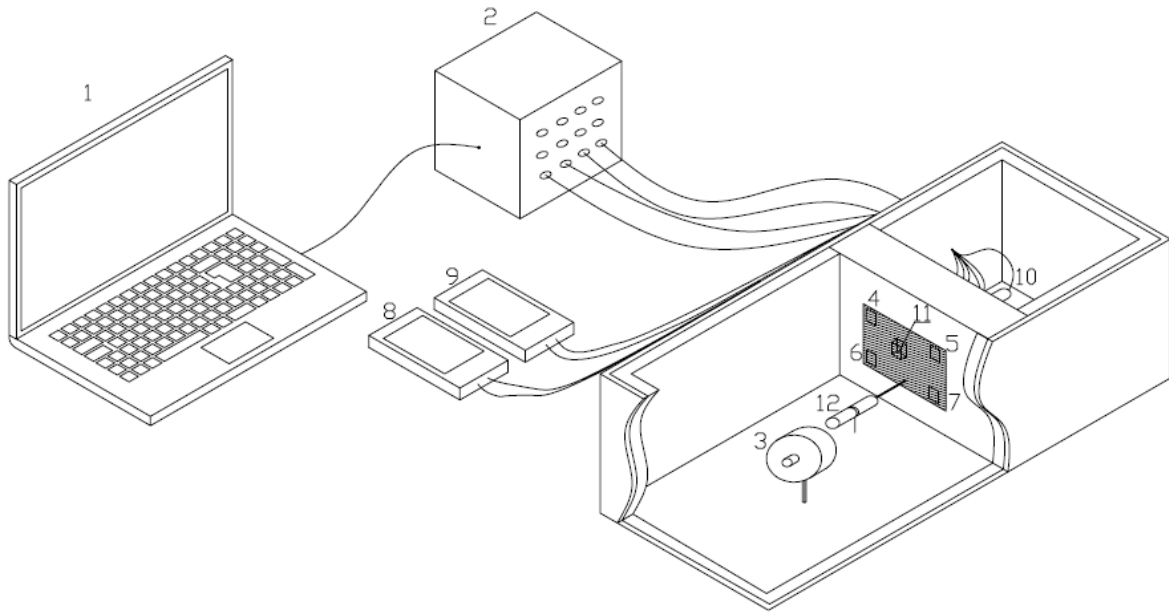
4.1.1 Deney Düzenegi

Vibroakustik deneylerde ses yalıtımı deney sonuçlarının doğru elde edilmesi için son derece önemlidir, dışarıdan gelebilecek sesler sistemi etkileyebilmekte, hatalı sonuçlar elde edilmesine ve dolayısıyla malzemenin dinamik özelliklerinin yanlış yorumlanmasına yol açabilmektedir. Bu yüzden deney düzeneğinde, ses yalıtımını en üst düzeyde elde edebilmek amacıyla hazırlanan ahşap sandığın içerisine 50 mm kalınlığında polistren levha, bu levhanın içerisine de 30 mm kalınlığında piramit akustik sünger yerleştirilmiştir. Deney düzeneğinde iki ayrı oda oluşturulmuştur. Birinci odada titreşim kaynağı ve ısıtıcı fan, ikinci odada ise kompozit numune üzerine yapıştırılmış termokapllar ve ivmeölçer ile mikrofon bulunmaktadır.

Hazırlanan düzenekte örgülü kompozit plakayı düşük hızda tahrik etmek amacıyla kendi eksenini etrafında rotasyonel hareket eden elektrikli bir tahrik unsuru kullanılmıştır. Kompozit levha 13 mm kalınlığındaki iki alüminyum plakanın orta noktasına 3 mm et kalınlığında, 4 mm çerçeve genişliğine sahip 150x100 mm boyutlarında pencere açılarak sabitlenmiştir. 3 mm kalınlığındaki pencerenin arkasına, içerisine numune tam olarak oturacak şekilde 158x108 mm boyutlarında ve 7 mm derinliğinde bir yuva açılmıştır. Yuvanın içerisine açılan kompozit plakayı sıkıştırmak için farklı kalınlıklarda çelik çerçeveler kullanılmış ve kompozit plaka alüminyum plakalar arasına sıkıştırılarak sabitlenmiştir. Düşük hızlı kuvvet ile tahrik edilen kompozit levhayı ısıtmak için 5 kW gücünde sıcak hava üfleyen Isijet marka EX-5 tipi elektrikli bir ısıtıcı fan kompozit numuneden 40 cm uzağa yerleştirilerek numunenin ısıtılması sağlanmıştır. Termokaplların ısıtıcı fandan gelen sıcak havaya direkt olarak maruz kalmasını önlemek amacı ile termokapllar ve ivmeölçer kompozit numunenin öteki yüzeyine

yapıştırılmıştır. Numuneleri taşıyan Ayrıca alüminyum plakanın refrakter tuğladan ayrılmak zorunda kaldığı yerlerde ise bondex sünger kullanılarak ısı yalıtımı sağlanmıştır. Kompozit plakanın dört köşesine yapıştırılan termokapllardan elde edilen sıcaklık değerleri, her bir termokaplı çifti bir termometreye bağlanarak iki adet termometre ile ölçülmüştür.

Frekans ve ses basıncını ölçmek için sırasıyla Dytran marka 3093B model ivmeölçer ve G.R.A.S marka 46AE model mikrofona kullanılmıştır. Her iki enstrüman da Somat marka eDAQ Lite modeli veri toplama cihazına bağlanarak bilgisayardaki InField programının yardımı ile farklı sıcaklıktaki hasarlı ve hasarsız örgülü kompozit numunelerin frekans ve ses basıncı değerleri ölçülmüştür. Çalışmalarda kullanılan kompozitlerin vibroakustik özelliklerini ölçmek için hazırlanan deney düzeneği Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Deney Düzeneği.

Şekilde numara ile belirtilen ekipmanlar sırası ile;

1: Bilgisayar (TCE, InField ve nCode)

2: eDAQ veri toplama cihazı

3: Isijet EX-5 tipi ısıtıcı fan

4,5,6,7: Termokapllar

8,9: Termometreler

10: G.R.A.S 46AE tipi mikrofon

11: Dytran 3093B tipi ivmeölçer

12: Tahrik unsuru



Şekil 4.2 Dizüstü Bilgisayar ve Veri Toplama Cihazı.

Veri toplama cihazı ile ivme ölçer ve mikrofondan alınan veriler kaydedilmiş ve TCE yazılımı ile bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan veriler InField ve nCode yazılımları ile analiz edilmiştir.



Şekil 4.3 Isıtıcı Fan.

Isijet EX-5 tipi 5 kW elektrikli ısıtıcı fan ile sıcak hava üflenilerek numunelerin sıcaklıkları istenilen değere ayarlanmıştır.



Şekil 4.4 Termometre ve Termokapllar.

Örgülü kompozit plakanın dört köşesine yapıştırılan K tipi termokapllardan alınan sıcaklık değerleri CEM DT-3891g model iki adet termometreden okunmuş ve ortalama değeri bulmak üzere kaydedilmiştir.



Şekil 4.5 Mikrofon.

Çalışmada ses basıncını ölçmek için $\pm 50^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta çalışma hassasiyetine sahip G.R.A.S. marka 46AE tipi mikrofon kullanılmıştır.



Şekil 4.6 İvmeölçer.

Düşük hızla darbeye maruz bırakılan numunelerden elde edilen frekans değerleri Dytran 3093B model ivmeölçer ile ölçülmüştür.



Şekil 4.7 Tahrik Unsuru.

Numunelere farklı sıcaklıklarda tahrik unsuru ile ± 0.5 N kuvvetinde yük uygulanmıştır.



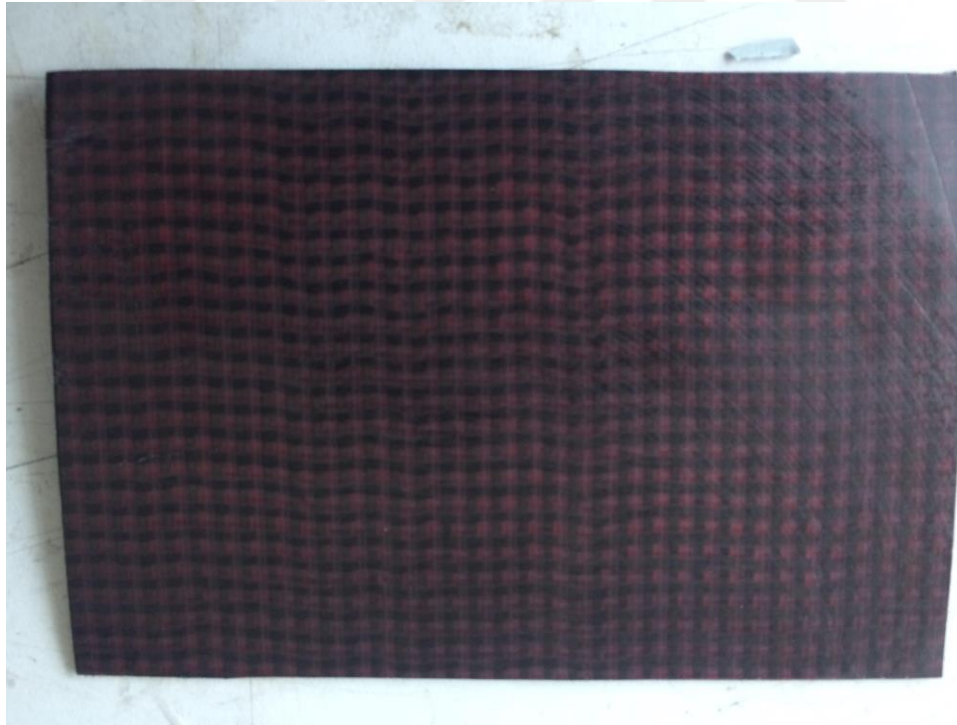
Şekil 4.8 Veri toplanan bölmedeki ivme ölçer ve termokapllar yapıştırılmış numune.

4.1.2 Çalışmada Kullanılan Numuneler

Bu çalışmada, hepsi düz örgü[0°/90°]_s olmakla beraber düğüm aralıkları ve kalınlıkları farklı olan 0.5 mm, 1 mm ve 1.5 mm kalınlığında örgülü kompozit plakalar tercih edilmiştir. Numuneler, deney düzeneğine uyumlu olarak 4 mm kalınlığındaki çerçeveye sahip alüminyum yuvaya yerleştirildiğinde 150 mm x100 mm boyutundaki yüzeyler açıkta kalacak şekilde örgü yönlerine paralel olarak 108 mm x 158 mm boyutlarına ayarlanmıştır. Çalışmada kullanılan örgülü kompozitler Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.(TAI)’den sağlanmıştır.



Şekil 4.9 0.5 mm kalınlığında örgülü kompozit plaka.



Şekil 4.10 1 mm kalınlığında örgülü kompozit plaka.



Şekil: 4.11 1.5 mm kalınlığında örgülü kompozit plaka.

4.2. DENEYLERİN YÜRÜTÜLMESİ

4.2.1 Çekme Deneyi



Şekil 4.12 Çekme Cihazı ve Çeneler.

Örgülü kompozit plakaların elastisite modülünün bulunması ve mekanik özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için 75mm x 15 mm boyutunda çekme numuneleri çekme deneyine tabii tutulmuştur. Kompozit plakaların, çekme cihazının çenelerinin tuttuğu yüzeyinden kaymaması amacıyla hazırlanan numunelerin alt ve üst kısımlarına 10mm boyunca 1.5 mm kalınlığında plastik bant sarılmıştır. Hazırlanan çekme numunelerin orta noktalarına strengçeç yapıştırılmış ve numunelere yapıştırılan strengçeçler (gerinim ölçer) gerinim ölçme cihazına bağlanmıştır. Malzemelerin özellikleri hakkında daha fazla bilgiye sahip olmak amacıyla numunelerin ağırlıkları hassas terazi yardımı ile ölçülmüş ve hacimsel değerlerine

oranlanarak malzemelerin yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Çekme deneyinden elde edilen sonuçlar ve çalışmada kullanılan malzemelerin yoğunlukları Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 Çekme deneyi sonuçları ve malzemelerin yoğunlukları.

Numune Çeşidi	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (g/cm ³)
Örgülü Kompozit (0.5 mm kalınlık)	53	0.24	0.46
Örgülü Kompozit (1 mm kalınlık)	28.8	0.34	0.35
Örgülü Kompozit (1.5 mm kalınlık)	54.3	0.26	0.53

4.2.1 Darbe Deneyi



Şekil 4.13 Darbe deney düzeneği.

Örgülü kompozit plakalara hasar vermek için 500 g ve 150 g ağırlığındaki iki adet çelik kurşun Resim 5.8'deki düzenek kullanılarak 1250 cm yükseklikten numunelerin üzerine serbest olarak bırakılarak örgülü kompozit plakaların yüzeyinde hasar oluşması sağlanmıştır.

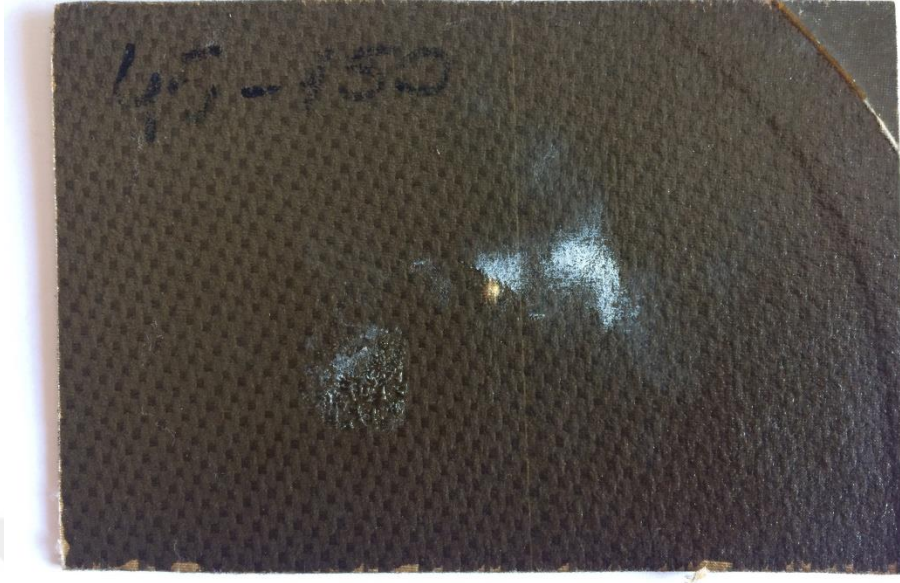


Şekil 4.14 45° tepe açısına sahip 150 g ve 500 g'lık kurşunlar.

Çizelge 4.1 Darbe deneyinde kullanılan kurşun çeşitleri ve özellikleri.

Malzeme Çeşidi	Tepe Açısı	Yüzey alanı (mm ²)	Hacim (mm ³)	Ağırlık (g)	Potansiyel Enerji (J)
1.Tip	45°	2.814	0.517	150.1	1.84
2.Tip	45°	7.505	2.397	500.4	6.13

Ağırlıkları farklı iki tip kurşun ile hasara uğratılan kompozit plakalara ait çarpma sonrası görüntüler sırasıyla Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de verilmiştir.



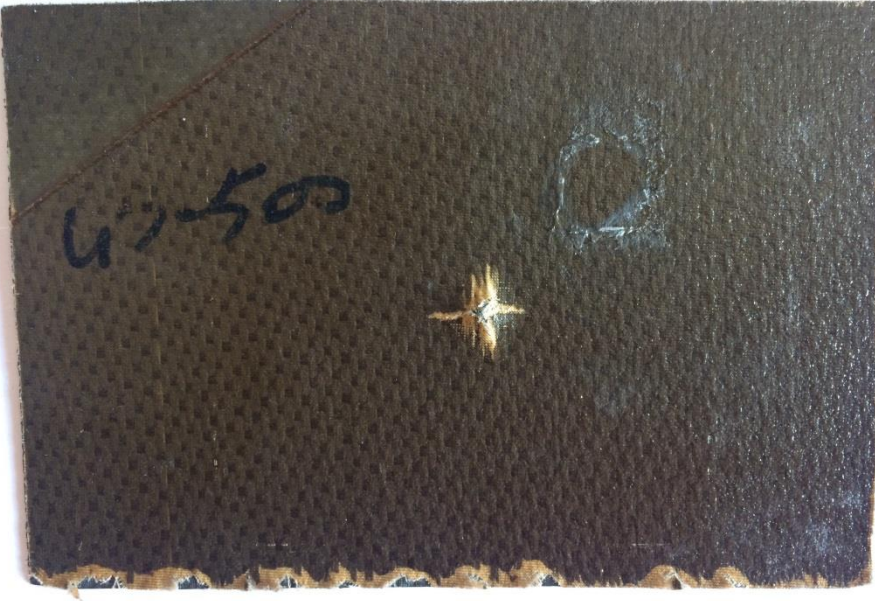
Şekil 4.15 0.5 mm kalınlıkta 1.84 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.



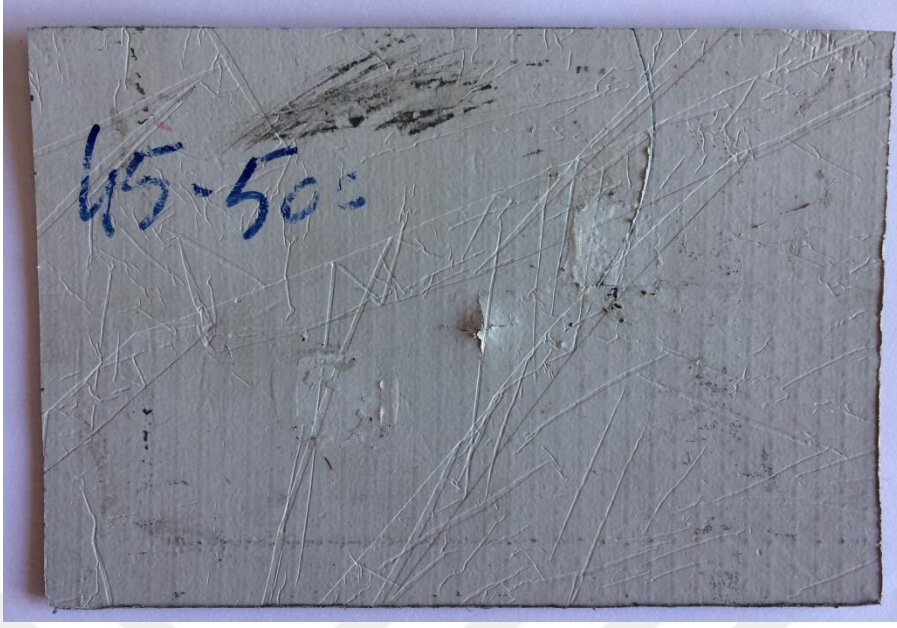
Şekil 4.16 1 mm kalınlıkta 1.84 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.



Şekil 4.17 1.5 mm kalınlıkta 1.84 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.



Şekil 4.18 0.5 mm kalınlıkta 6.13 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.

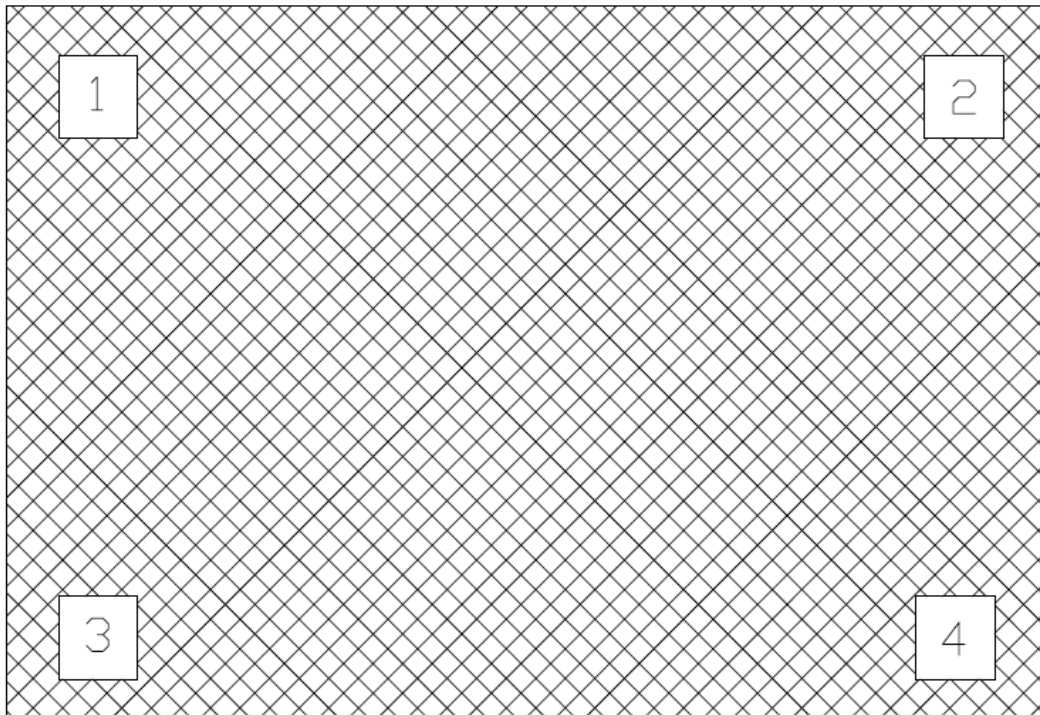


Şekil 4.19 1 mm kalınlıkta 6.13 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.



Şekil 4.20 1.5 mm kalınlıkta 6.13 J enerji ile hasara uğratılmış plaka.

Bu çalışmada örgülü kompozit numunelerin farklı sıcaklıklarda dinamik karakteristiklerini analiz etmek amacıyla üç farklı sıcaklık değeri seçilmiştir. Hasarlı ve hasarsız numuneler ısıtıcı fan tarafından üflenen sıcak hava ile 25°C, 35°C ve 50°C sıcaklık değerlerine ısıtılarak analiz edilmiştir. Sıcaklık dağılımını daha iyi gözlemlemek için numunenin dört köşesine birer termokapl yapıştırılmış ve bu termokaplardan okunan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak numunenin sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Termokaplların yerleşimi ve numaralandırılması Şekil 5.10'da gösterilmektedir. 0.5, 1 ve 1.5 mm kalınlığındaki hasarsız (UD), 0.15 kg ağırlığındaki kurşun ile hasara uğratılmış(15) ve 0.5 kg ağırlığındaki kurşun ile hasara uğratılmış(5) haldeki numunelerin 25°C(25), 35°C(35) ve 50°C(50)'de termokapllardan okunan değerleri ve bu değerlerin aritmetik ortalamaları Çizelge 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.20 Termokaplların numune üzerindeki kodlanması.

Çizelge 4.2 Termokaplılardan okunan sıcaklık değerleri.

Kod	Termokapl	Okunan Değer (°C)	Ortalama Değer (°C)
0.5 –UD-25	1	25.1	25.1
	2	25.2	
	3	24.9	
	4	25.2	
0.5 –UD-35	1	35.3	35.3
	2	35.3	
	3	35.2	
	4	35.1	
0.5 - UD- 50	1	50.5	50.3
	2	50.4	
	3	50	
	4	50.1	
0.5 –15- 25	1	25.2	25
	2	24.7	
	3	24.9	
	4	25.2	
0.5 –15- 35	1	34.4	34.8
	2	34.7	
	3	35.1	
	4	35	
0.5 –15- 50	1	50.8	50.7
	2	51	
	3	50.4	
	4	50.5	
0.5 –5- 25	1	25.1	25
	2	25	
	3	25	
	4	25	

Çizelge 4.2 (devam ediyor)

0.5 –5- 35	1	35.5	35
	2	35.3	
	3	34.4	
	4	34.9	
0.5 –5- 50	1	51.2	50.6
	2	50.8	
	3	50.2	
	4	50.2	
1 –UD- 25	1	25	25
	2	25	
	3	24.9	
	4	25	
1 –UD- 25	1	25	25
	2	25	
	3	24.9	
	4	25	
1 –UD- 35	1	35.6	35.4
	2	35.4	
	3	35.2	
	4	35.3	
1 –UD- 50	1	51.5	51
	2	51.4	
	3	50.6	
	4	50.6	
1 –15- 25	1	25.2	25.1
	2	25.2	
	3	25	
	4	25.1	

Çizelge 4.2 (devam ediyor)

1 –15- 35	1	34.8	34.9
	2	35	
	3	34.8	
	4	34.9	
1 –15- 50	1	50.6	50.5
	2	50.5	
	3	50.8	
	4	50.2	
1 –5- 25	1	25.1	25
	2	25	
	3	24.8	
	4	25.3	
1 –5- 35	1	36.2	35.7
	2	35.7	
	3	35.4	
	4	35.6	
1 –5- 50	1	51.2	51
	2	51.5	
	3	50.8	
	4	50.7	
1.5 –UD- 25	1	25	25
	2	25.1	
	3	25	
	4	24.7	
1.5 –UD- 35	1	35.6	35.6
	2	35.4	
	3	36.1	
	4	35.3	

Çizelge 4.2 (devam ediyor)

1.5 –UD- 50	1	49.5	49.5
	2	50.2	
	3	48.8	
	4	49.5	
1.5 –15- 25	1	25.3	25.2
	2	25.3	
	3	25.1	
	4	24.9	
1.5 –15- 35	1	35.4	35.7
	2	36.2	
	3	35.6	
	4	35.8	
1.5 –15- 50	1	51.5	50.9
	2	50.7	
	3	50.6	
	4	50.8	
1.5 –5- 25	1	24.7	25
	2	25.3	
	3	24.9	
	4	25.1	
1.5 –5- 35	1	34.4	35
	2	35	
	3	35.2	
	4	35.1	
1.5 –5- 50	1	51.1	50.3
	2	50.9	
	3	50.3	
	4	49.8	

4.2.2 Frekans Ölçümleri ve Modların Belirlenmesi

Numunelerin düşük hızlı tahrik etkisinde titreşim karakteristiklerinin belirlenmesi için numune üzerine yapıştırılan ivme ölçer, her üç ekseninden veri alabilmek amacıyla üç farklı kablo ile veri toplama cihazına bağlanmıştır. Bilgisayar kontrollü yapılan titreşim deneylerinde deneyler TCE programı kullanılarak, deneyler 0-2500 Hertz aralığında yürütülmüştür.

0.5 mm, 1 mm ve 1.5 mm kalınlığındaki farklı örgülü kompozit malzemelerin hasarsız, 0.15 kg ağırlığındaki kurşun ile hasara uğratılmış ve 0.5 kg ağırlığındaki kurşun ile hasara uğratılmış haldeki numunelerinin her biri 15 sn süre ile 25°C, 35°C ve 50°C sıcaklıklarında düşük hızlı tahriğe maruz bırakılarak toplam 27 adet deney yapılmıştır. Yapılan deneylerde ses iletimini ve ses iletim kaybını gözlemlemek amacıyla bir mikrofon numuneden 3 cm uzağa yerleştirilerek titreşim verilerinin yanında ses verilerinin de alınması sağlanmıştır.

Ayrıca sonuçlarda herhangi bir sapma olmasını engellemek ve daha sağlıklı sonuçlar elde etmek amacıyla örgülü kompozit numuneler düzenekten çıkartılarak, deney düzeneğinden mikrofon yardımı ile tahrik unsurunun olduğu ve tahrik unsuru olmadan ses verileri alınmıştır.

BÖLÜM 5

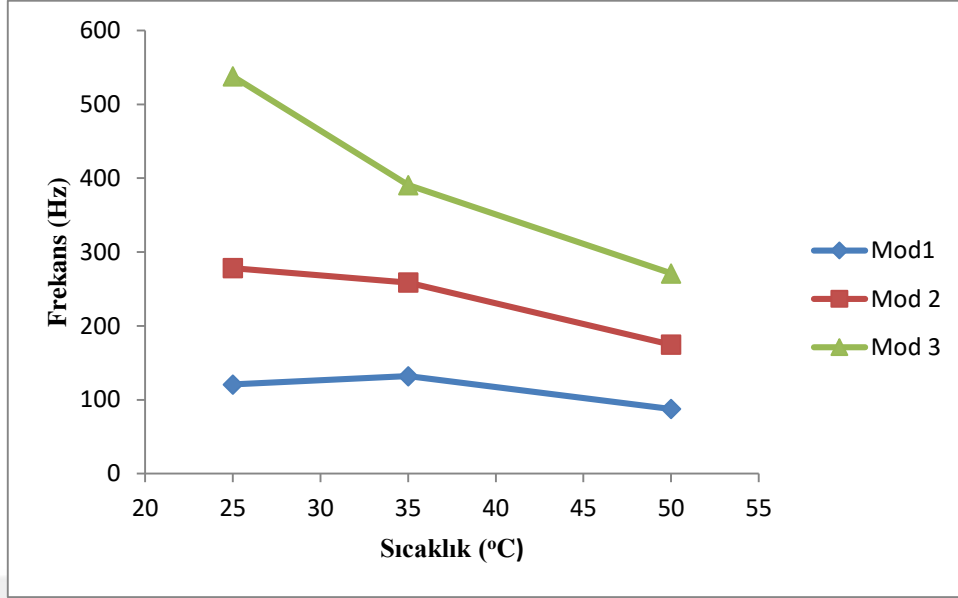
DENEY SONUÇLARI

Deney sonuçları iki aşamalı analiz edilmiştir. İlk olarak, aynı kalınlıktaki örgülü kompozit plakaların farklı hasar durumlarında değişen sıcaklıklarda modal analizi ve sönüm oranları kıyaslanmıştır. Daha sonra ise aynı sıcaklıkta farklı kalınlıklardaki örgülü kompozit plakaların farklı hasar durumlarındaki frekans ve sönüm oranları incelenmiştir.

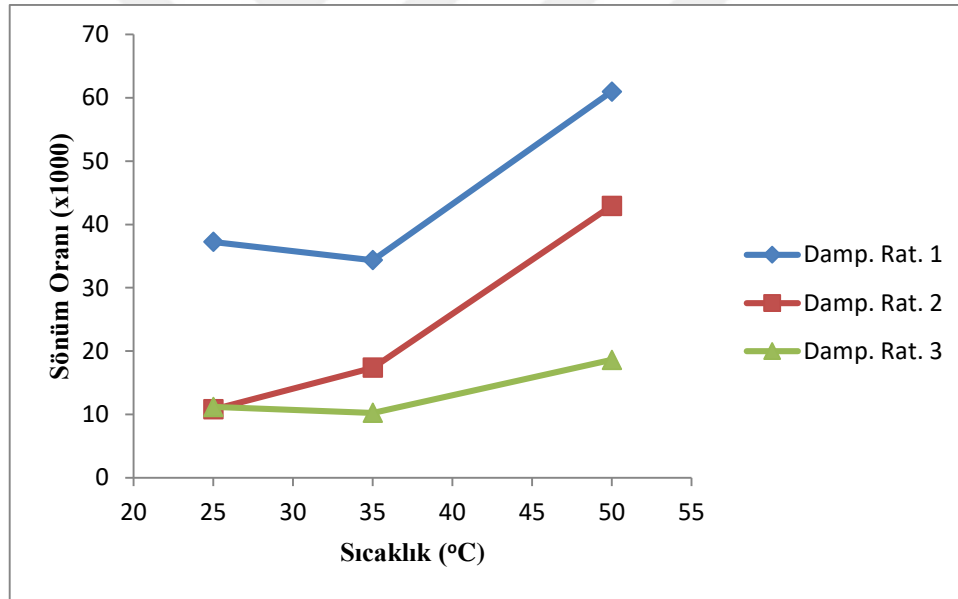
0.5 mm kalınlığındaki örgülü kompozit plakanın hasarsız durumda 25°C, 35°C ve 50°C’deki frekans ve sönüm oranı değerleri Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 0.5 mm'lik hasarsız numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları

T(°C)	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	$\xi_1 (\times 10^{-3})$	$\xi_2(\times 10^{-3})$	$\xi_3(\times 10^{-3})$
25	120.8	278.3	537.8	37.23	10.79	11.17
35	132	258.8	390.7	34.35	17.38	10.24
50	87.6	174.7	271.1	60.97	42.93	18.61



Şekil 5.1 0.5 mm kalınlıkta hasarsız numunenin frekans oranları.

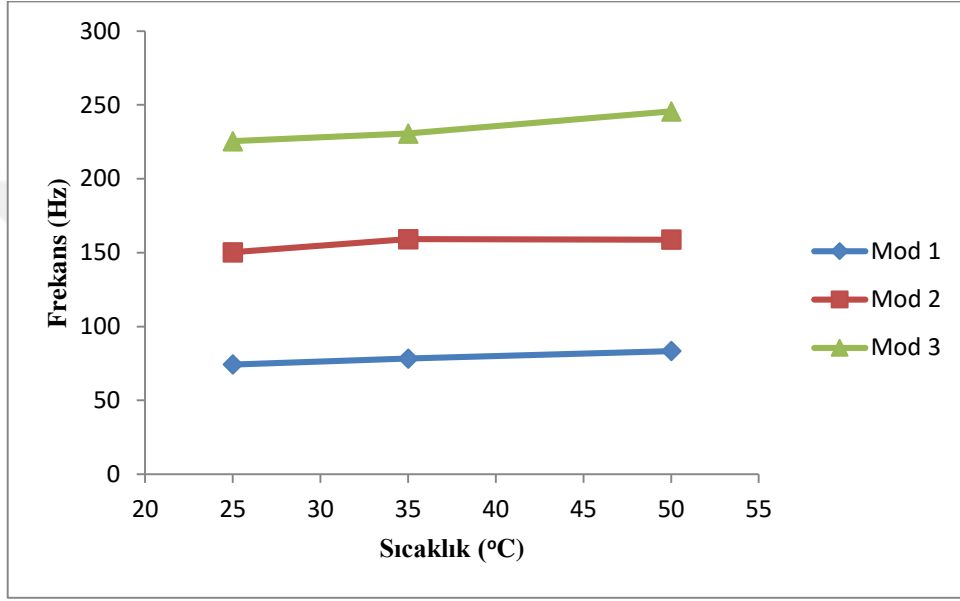


Şekil 5.2 0.5 mm kalınlıkta hasarsız numunenin sönüm oranları.

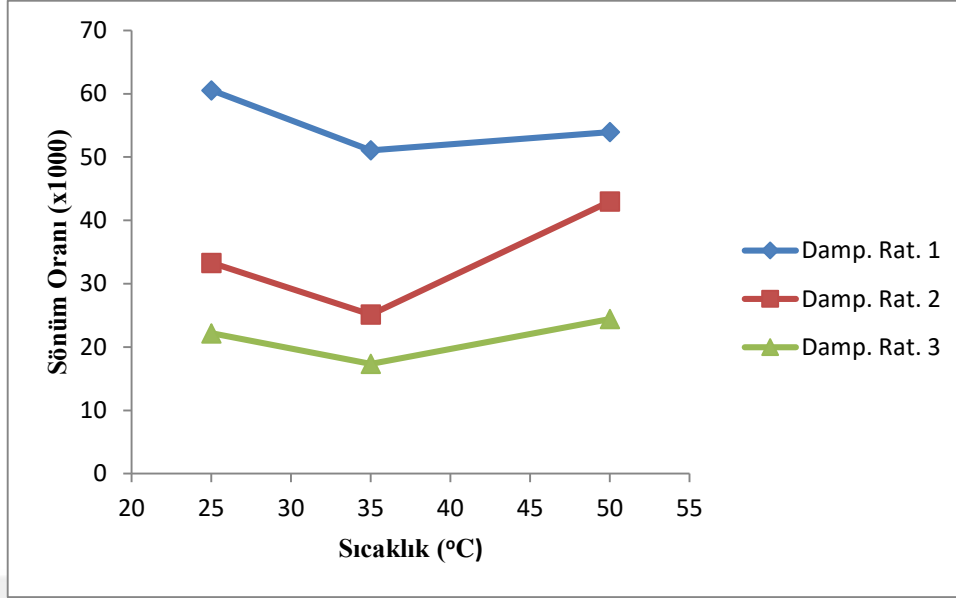
0.5 mm kalınlığındaki örgülü kompozit plakanın 1.84 J ile darbeye maruz bırakılmış numunesinin 25°C, 35°C ve 50°C'deki frekans ve sönüm oranı değerleri Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 1.84 J'lük darbeye maruz bırakılan 0.5 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları.

T(°C)	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	$\xi_1(\times 10^{-3})$	$\xi_2(\times 10^{-3})$	$\xi_3(\times 10^{-3})$
25	74.3	150.2	225.4	60.56	33.31	22.18
35	78.3	159.1	230.6	51.08	25.14	17.34
50	83.4	158.8	245.6	53.95	42.97	24.43



Şekil 5.3 0.5 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları.

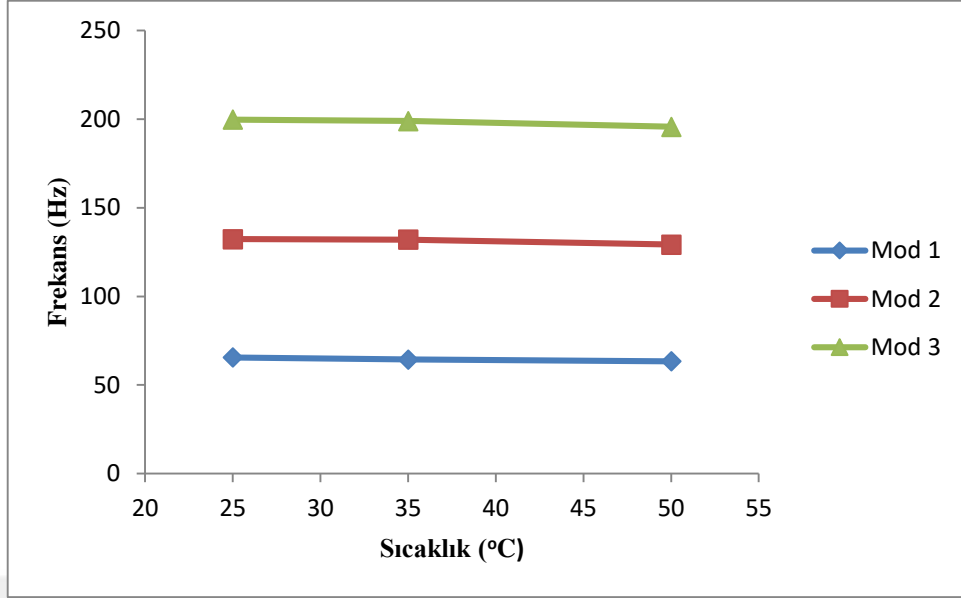


Şekil 5.4 0.5 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.

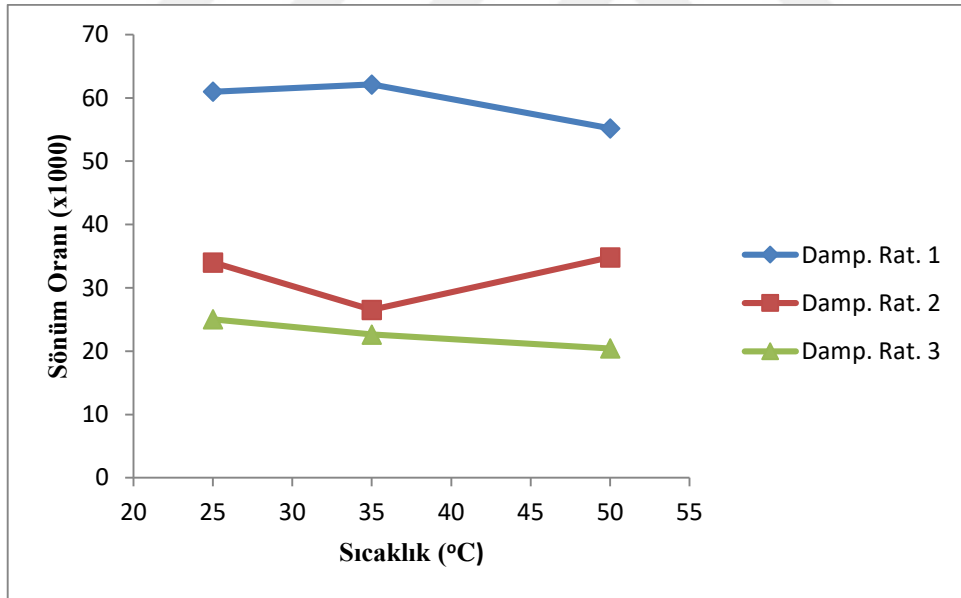
0.5 mm kalınlığındaki örgülü kompozit plakanın 6.13 J ile darbeye maruz bırakılmış numunesinin 25°C, 35°C ve 50°C'deki frekans ve sönüm oranı değerleri Çizelge 5.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3 6.13 J'lük darbeye maruz bırakılan 0.5 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları.

T(°C)	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	$\xi_1(\times 10^{-3})$	$\xi_2(\times 10^{-3})$	$\xi_3(\times 10^{-3})$
25	65.6	132.3	199.7	60.97	34.01	25.03
35	64.4	132	198.9	62.11	26.51	22,62
50	63.4	129.2	195.7	55.2	34.82	20.43



Şekil 5.5 0.5 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları.

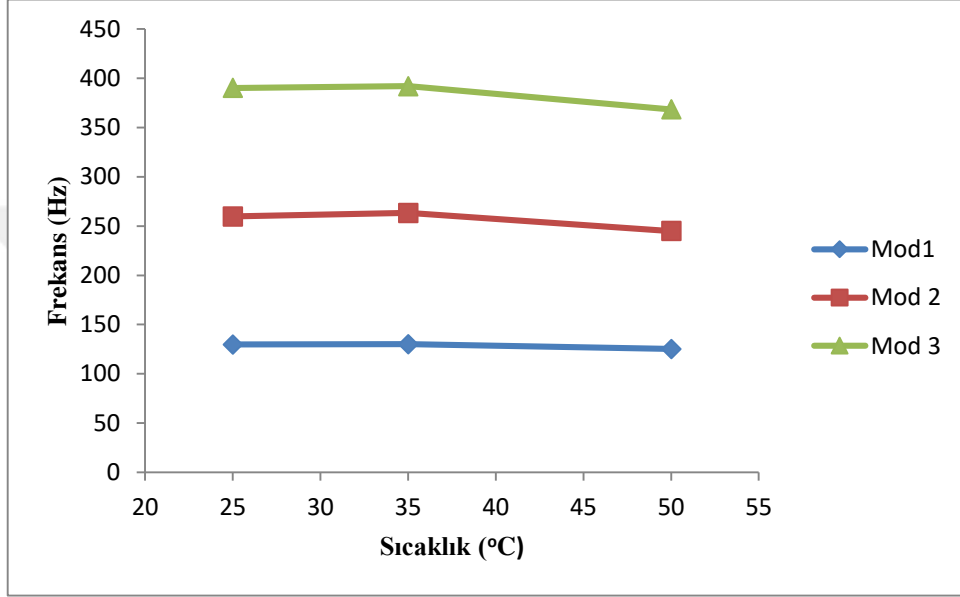


Şekil 5.6 0.5 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.

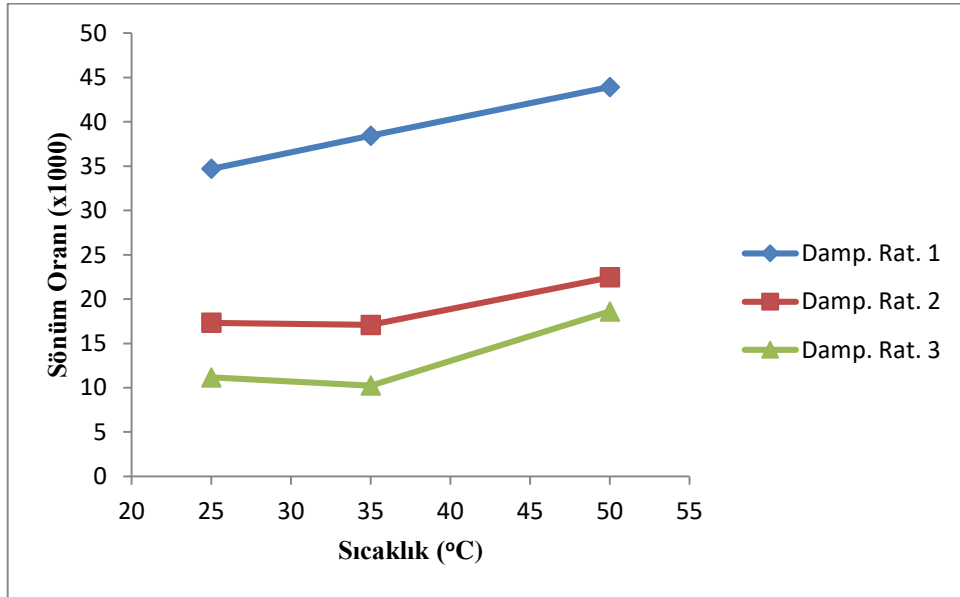
1 mm kalınlığındaki örgülü kompozit plakanın hasarsız durumda 25°C, 35°C ve 50°C'deki frekans ve sönüm oranı değerleri Çizelge 5.4'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.4 1 mm'lik hasarsız numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları.

T(°C)	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	$\xi_1(\times 10^{-3})$	$\xi_2(\times 10^{-3})$	$\xi_3(\times 10^{-3})$
25	129.7	259.7	390.3	34.69	17.32	11.52
35	130.1	263.3	392	38.43	17.09	14.03
50	125.2	244.9	368.5	43.92	22.45	20.35



Şekil 5.7 1 mm kalınlıkta hasarsız numunenin frekans oranları.

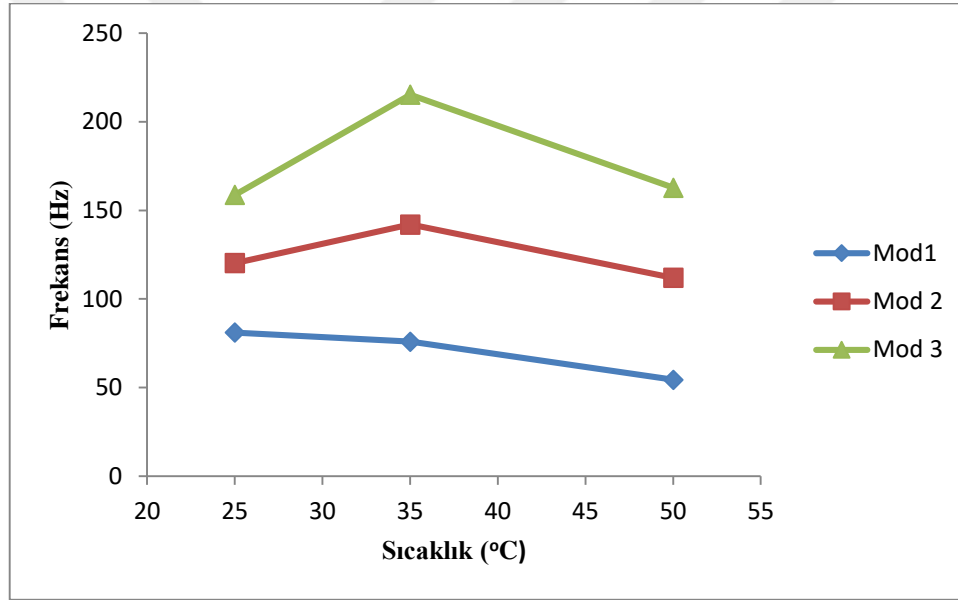


Şekil 5.8 1 mm kalınlıkta hasarsız numunenin sönüm oranları.

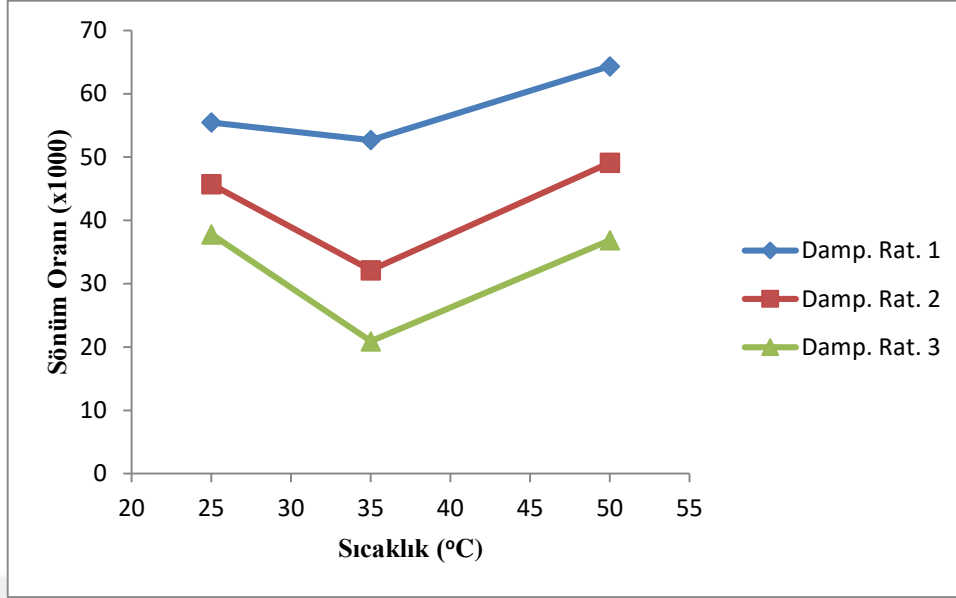
1 mm kalınlığındaki örgülü kompozit plakanın 1.84 J ile darbeye maruz bırakılmış numunesinin 25°C, 35°C ve 50°C'deki frekans ve sönüm oranı değerleri Çizelge 5.5'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.5 1.84 J'lük darbeye maruz bırakılan 1 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları.

T(°C)	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	$\xi_1(\times 10^{-3})$	$\xi_2(\times 10^{-3})$	$\xi_3(\times 10^{-3})$
25	81.1	120.3	158.7	55.48	45.72	37.8
35	75.9	142	215.2	52.7	32.14	20.91
50	54.4	112	162.8	64.33	49.11	36.85



Şekil 5.9 1 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları.

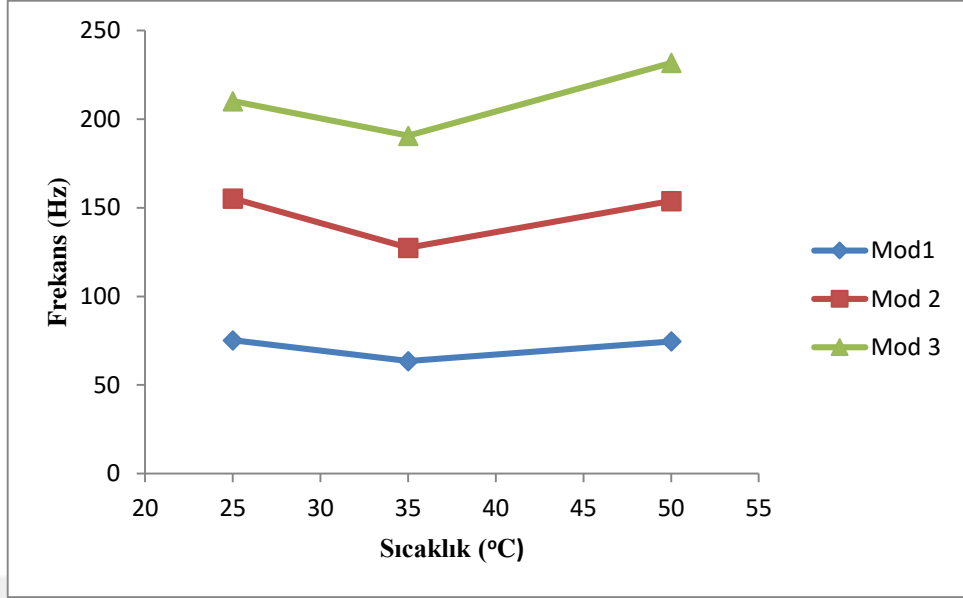


Şekil 5.10 1 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.

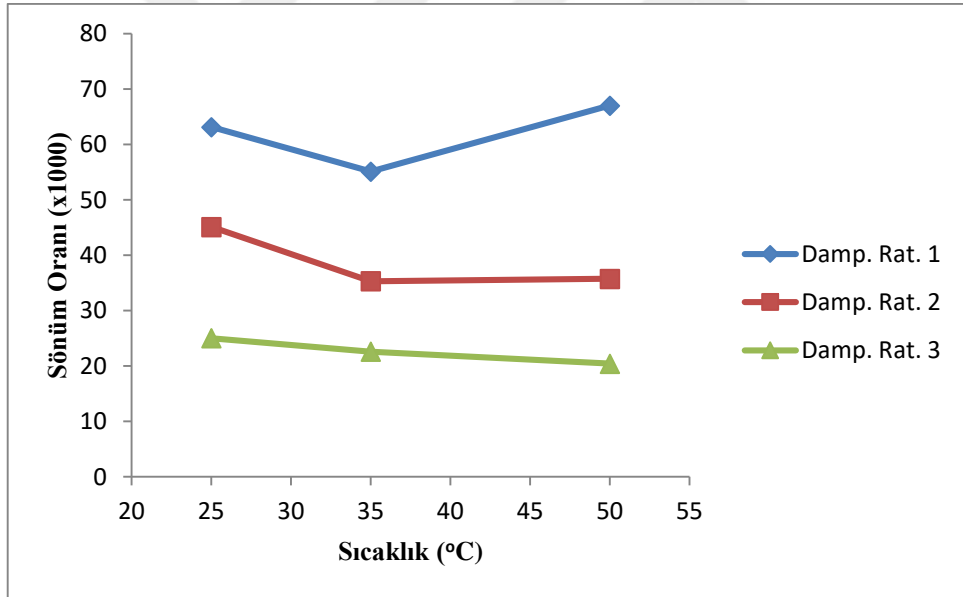
1 mm kalınlığındaki örgülü kompozit plakanın 6.13 J ile darbeye maruz bırakılmış numunesinin 25°C, 35°C ve 50°C'deki frekans ve sönüm oranı değerleri Çizelge 5.6'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.6 6.13 J'lük darbeye maruz bırakılan 1 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları.

T(°C)	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	$\xi_1(\times 10^{-3})$	$\xi_2(\times 10^{-3})$	$\xi_3(\times 10^{-3})$
25	75.2	155.2	210.1	63.13	45.11	26.19
35	63.5	127.4	190.6	55.11	35.32	23.26
50	74.6	153.8	231.7	67.02	35.76	19.42



Şekil 5.11 1 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları.

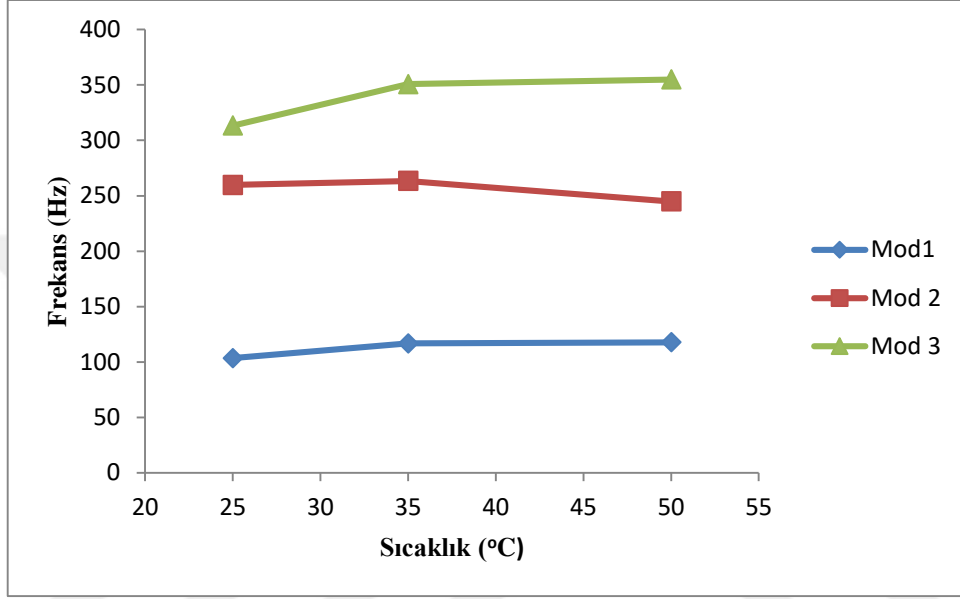


Şekil 5.12 1 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.

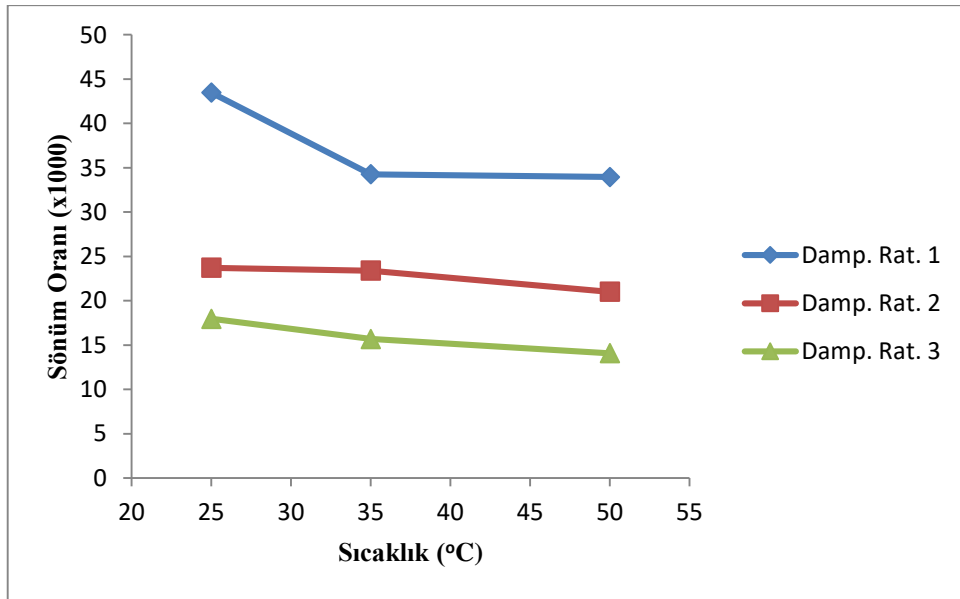
1.5 mm kalınlığındaki örgülü kompozit plakanın hasarsız durumda 25°C, 35°C ve 50°C'deki frekans ve sönüm oranı değerleri Çizelge 5.7'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.7 1.5 mm'lik hasarsız numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları.

T(°C)	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	$\xi_1(\times 10^{-3})$	$\xi_2(\times 10^{-3})$	$\xi_3(\times 10^{-3})$
25	103.5	210.8	313.3	43.47	23.71	17.96
35	116.7	234.9	350.7	34.27	23.4	15.68
50	117.8	238.1	355	33.95	21	14.08



Şekil 5.13 1.5 mm kalınlıkta hasarsız numunenin frekans oranları.

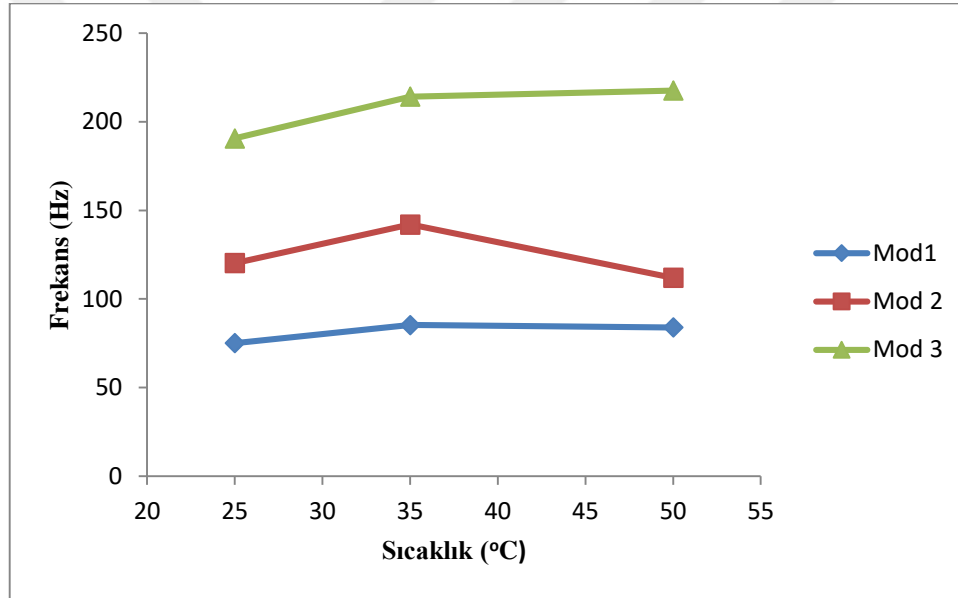


Şekil 5.14 1.5 mm kalınlıkta hasarsız numunenin sönüm oranları.

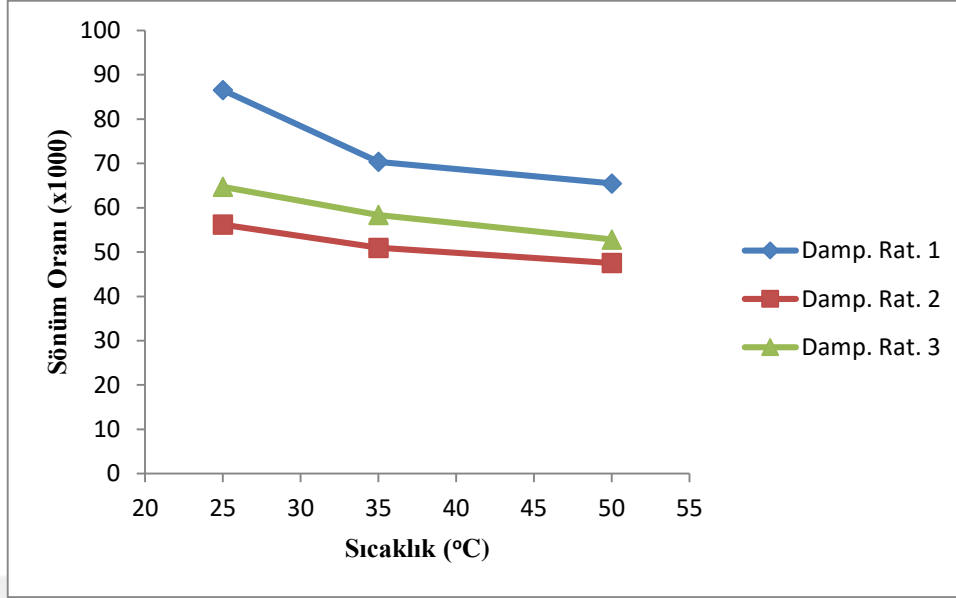
1.5 mm kalınlığındaki örgülü kompozit plakanın 1.84 J ile darbeye maruz bırakılmış numunesinin 25°C, 35°C ve 50°C'deki frekans ve sönüm oranı değerleri Çizelge 5.8'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.8 1.84 J'lük darbeye maruz bırakılan 1.5 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları.

T(°C)	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	$\xi_1(\times 10^{-3})$	$\xi_2(\times 10^{-3})$	$\xi_3(\times 10^{-3})$
25	75.1	140.7	190.6	86.55	56.21	64.71
35	85.3	147.2	214.2	70.34	50.95	58.36
50	84	147.7	217.6	65.47	47.52	52.84



Şekil 5.15 1.5 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları.

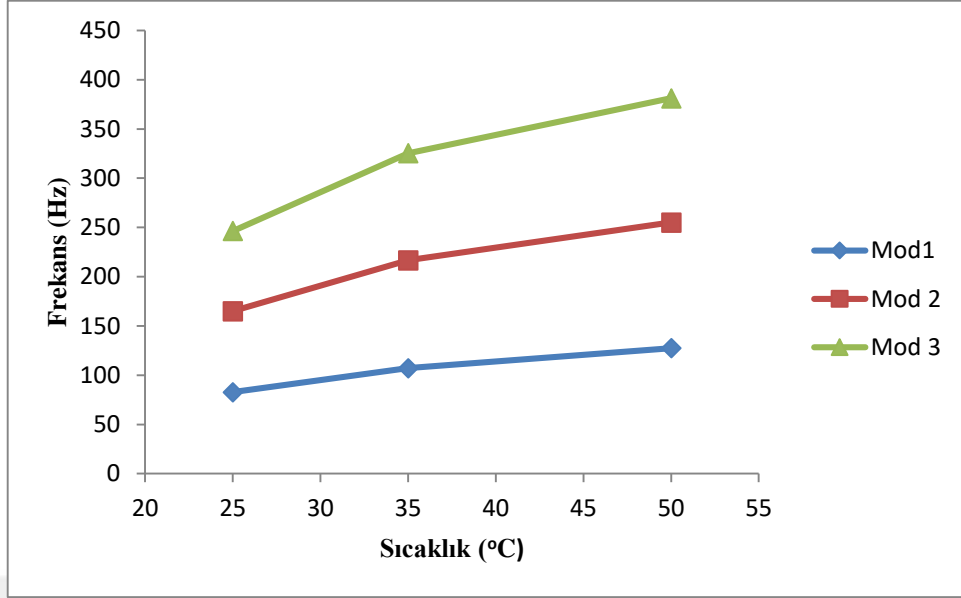


Şekil 5.16 1.5 mm kalınlıkta 1.84 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.

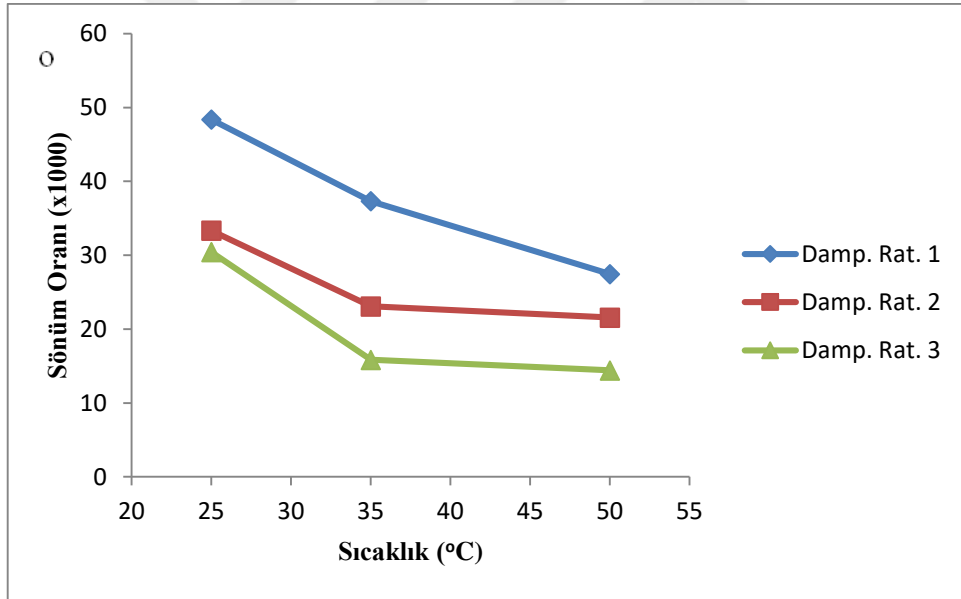
1.5 mm kalınlığındaki örgülü kompozit plakanın 6.13 J ile darbeye maruz bırakılmış numunesinin 25°C, 35°C ve 50°C'deki frekans ve sönüm oranı değerleri Çizelge 5.9'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.9 6.13 J'lük darbeye maruz bırakılan 1.5 mm'lik numunenin farklı sıcaklıklardaki frekans ve sönüm oranları.

T(°C)	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	$\xi_1(\times 10^{-3})$	$\xi_2(\times 10^{-3})$	$\xi_3(\times 10^{-3})$
25	82.7	165	246.4	48.37	33.33	30.44
35	107.2	216.6	325.4	37.32	23.08	15.85
50	127.4	255	381.1	27.47	21.56	14.43

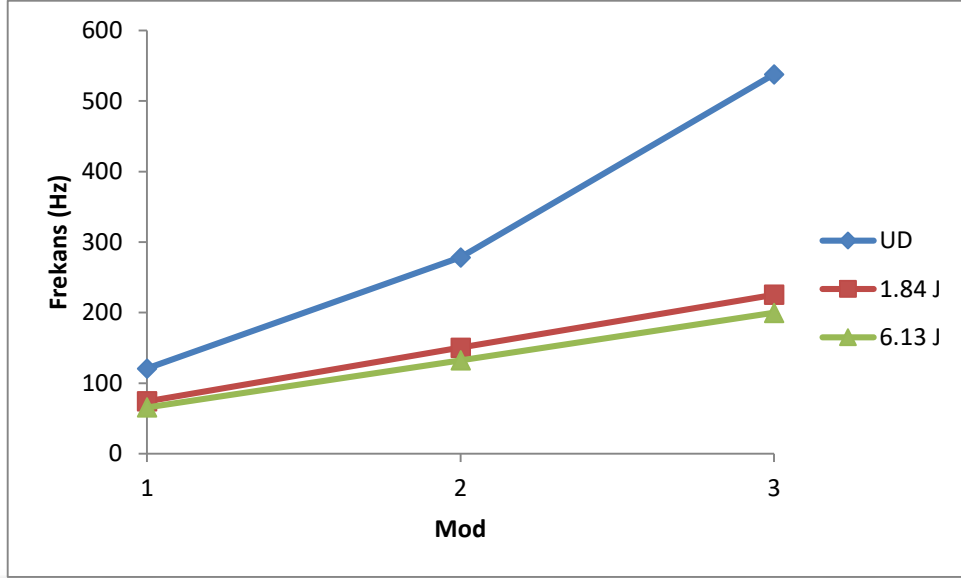


Şekil 5.17 1.5 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin frekans oranları.

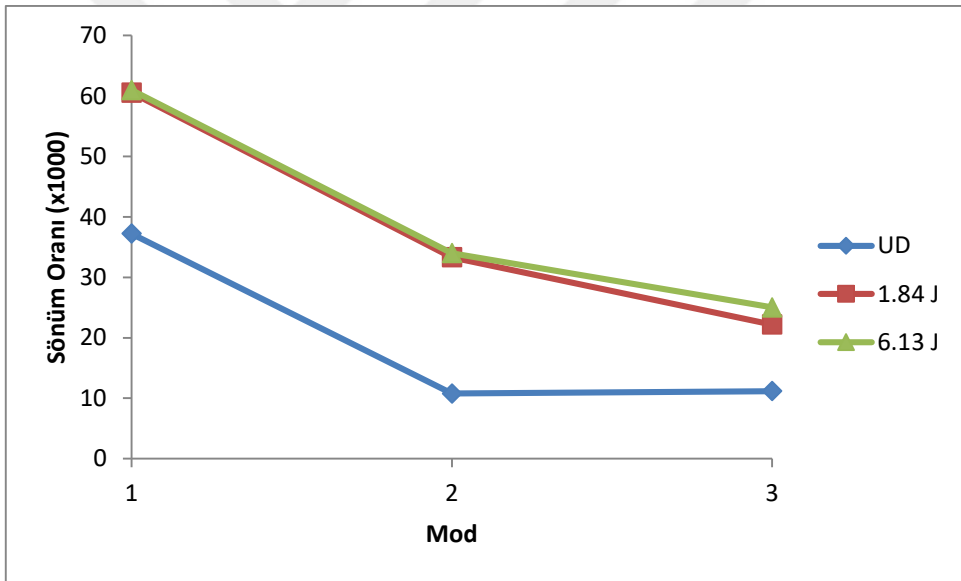


Şekil 5.18 1.5 mm kalınlıkta 6.13 J ile hasara uğramış numunenin sönüm oranları.

0.5 mm kalınlıktaki örgülü kompozit plakanın hasarsız(UD), 1.84 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış (1.84 J) ve 6.13 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış (6.13 J) numunelerinin 1,2 ve 3. modlarındaki frekans ve sönüm oranı değerlerinin 25°C sıcaklık altındaki değişimleri sırasıyla Şekil 5.19 ve 5.20’de gösterilmektedir.

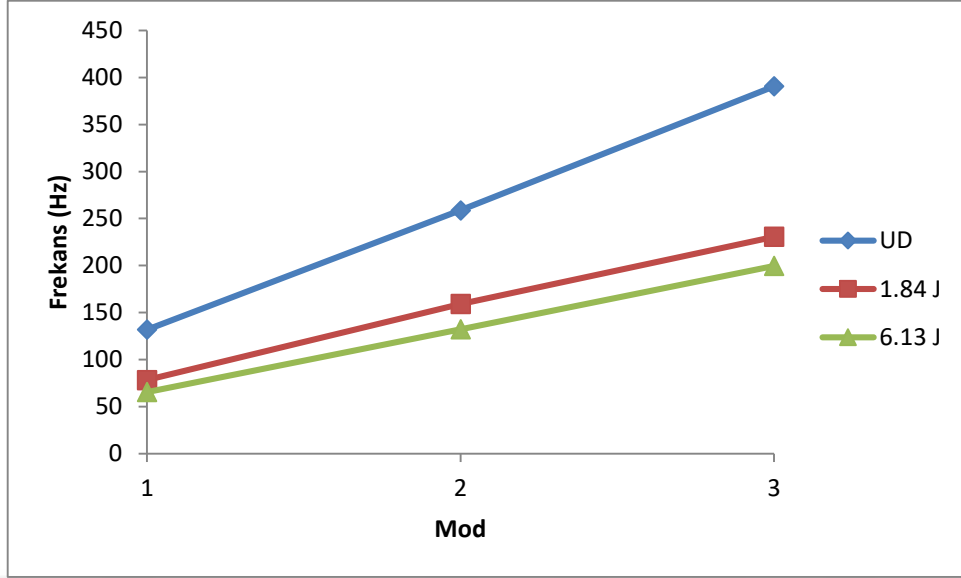


Şekil 5.19 25°C'de frekansların modlara göre değişimi (t=0.5 mm).

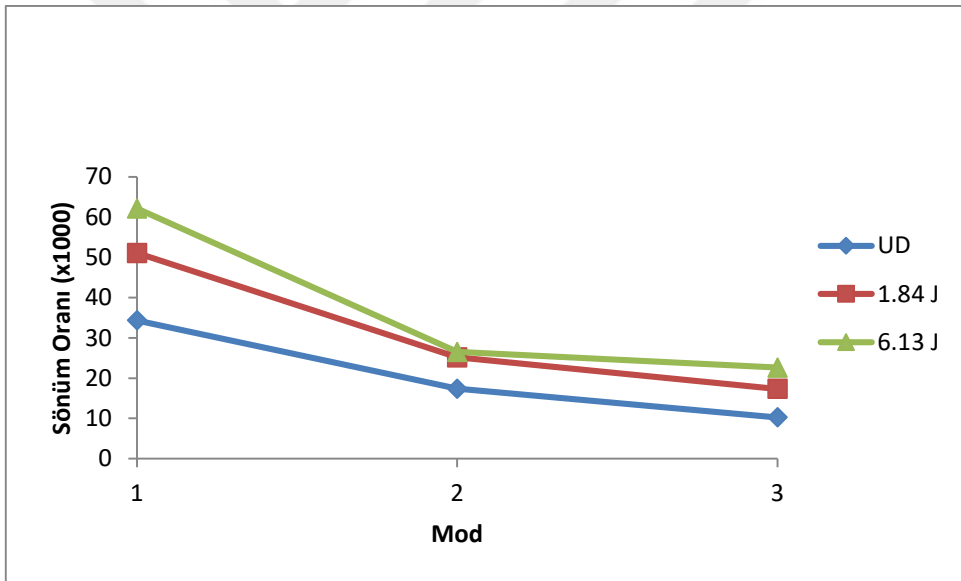


Şekil 5.20 25°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=0.5 mm).

0.5 mm kalınlıktaki örgülü kompozit plakanın hasarsız(UD), 1.84 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(1.84 J) ve 6.13 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(6.13 J) numunelerinin 1,2 ve 3. modlarındaki frekans ve sönüm oranı değerlerinin 35°C sıcaklık altındaki değişimleri sırasıyla Şekil 5.21 ve 5.22’de gösterilmektedir.

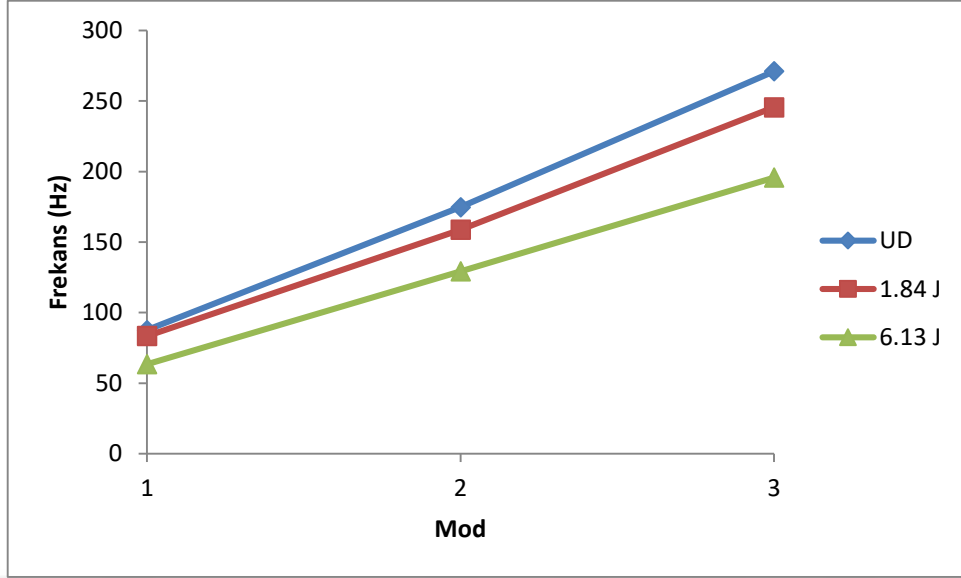


Şekil 5.21 35°C'de frekansların modlara göre değişimi (t=0.5 mm).

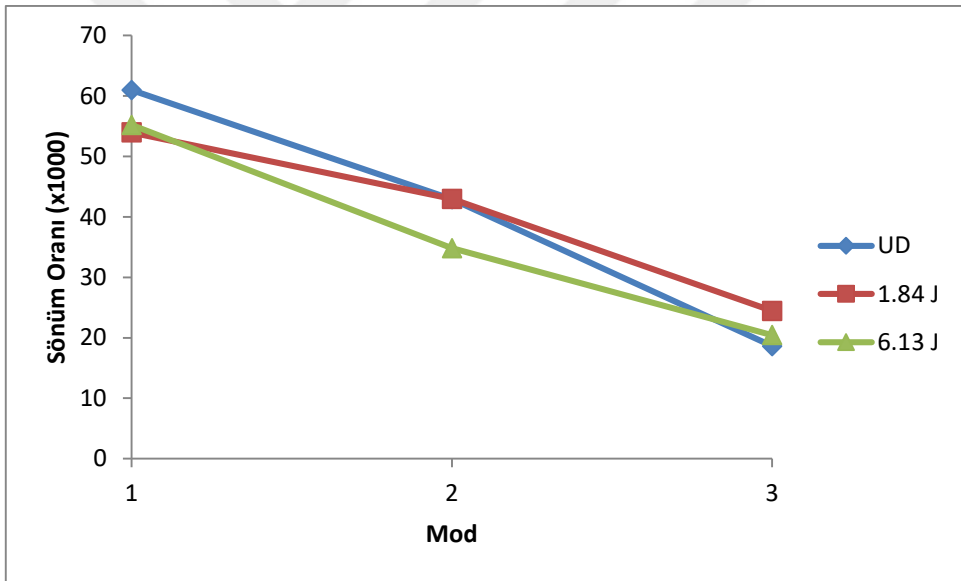


Şekil 5.22 35°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=0.5 mm).

0.5 mm kalınlıktaki örgülü kompozit plakanın hasarsız(UD), 1.84 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(1.84 J) ve 6.13 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(6.13 J) numunelerinin 1,2 ve 3. modlarındaki frekans ve sönüm oranı değerlerinin 25°C sıcaklık altındaki değişimleri sırasıyla Şekil 5.23 ve 5.24'te gösterilmektedir.

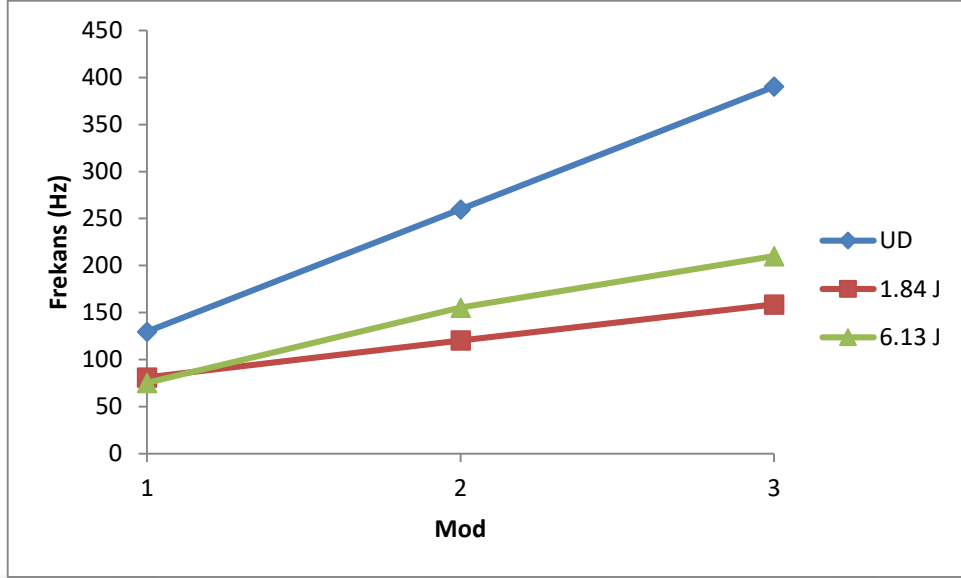


Şekil 5.23 50°C'de frekanslarının modlara göre değişimi (t=0.5 mm).

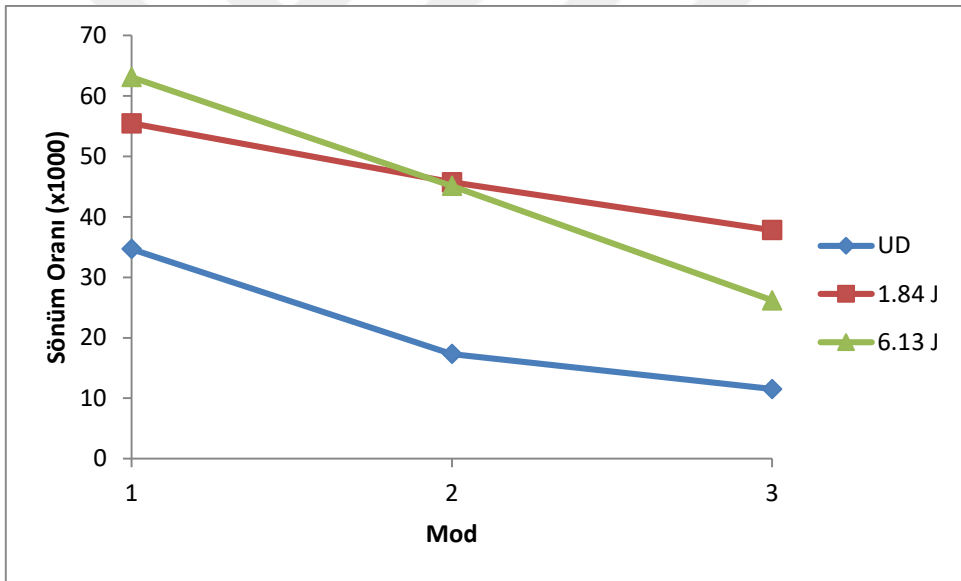


Şekil 5.24 50°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=0.5 mm).

1 mm kalınlıktaki örgülü kompozit plakanın hasarsız(UD), 1.84 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(1.84 J) ve 6.13 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(6.13 J) numunelerinin 1,2 ve 3. modlarındaki frekans ve sönüm oranı değerlerinin 25°C sıcaklık altındaki değişimleri sırasıyla Şekil 5.25 ve 5.26'de gösterilmektedir.

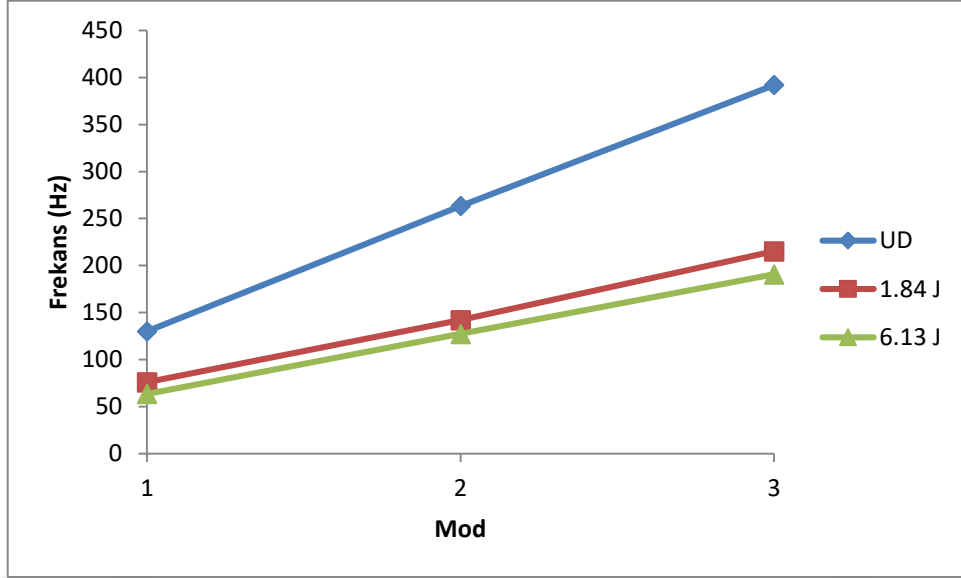


Şekil 5.25 25°C'de frekansların modlara göre değişimi (t=1 mm).

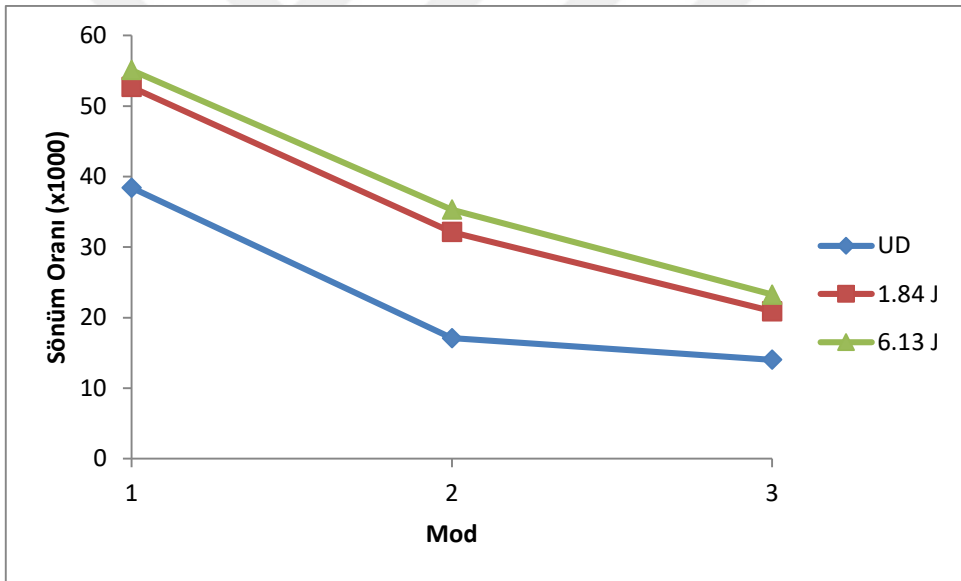


Şekil 5.26 25°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=1 mm).

1 mm kalınlıktaki örgülü kompozit plakanın hasarsız(UD), 1.84 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(1.84 J) ve 6.13 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(6.13 J) numunelerinin 1,2 ve 3. modlarındaki frekans ve sönüm oranı değerlerinin 35°C sıcaklık altındaki değişimleri sırasıyla Şekil 5.27 ve 5.28'de gösterilmektedir.

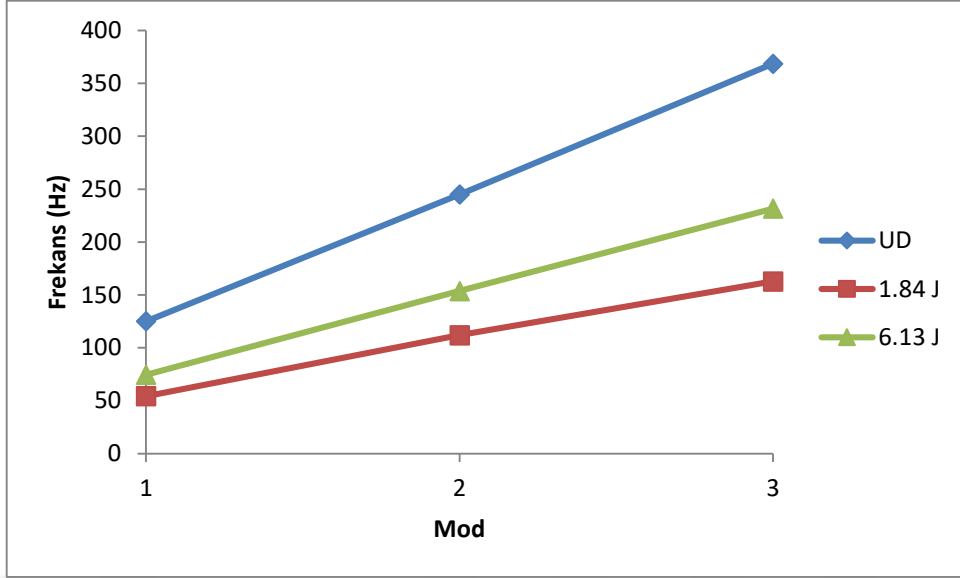


Şekil 5.27 35°C'de frekansların modlara göre değişimi (t=1 mm).

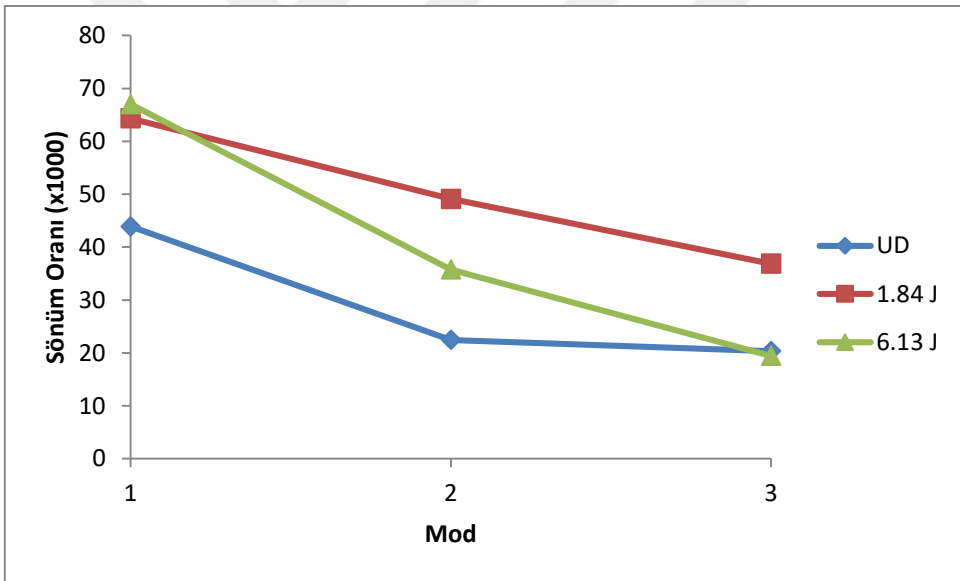


Şekil 5.28 35°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=1 mm).

1 mm kalınlıktaki örgülü kompozit plakanın hasarsız (UD), 1.84 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış (1.84 J) ve 6.13 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış (6.13 J) numunelerinin 1,2 ve 3. modlarındaki frekans ve sönüm oranı değerlerinin 50°C sıcaklık altındaki değişimleri sırasıyla Şekil 5.28 ve 5.29'de gösterilmektedir.

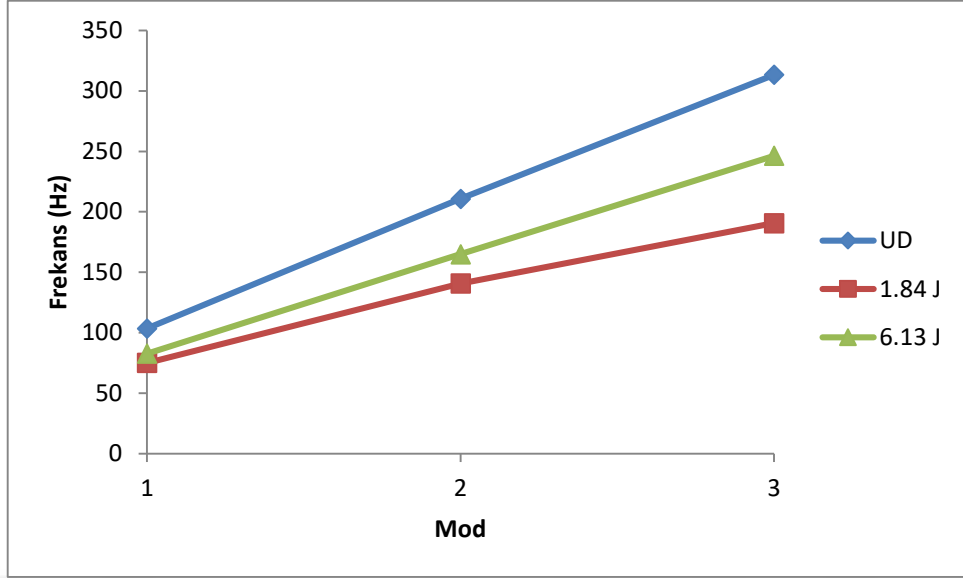


Şekil 5.28 50°C'de frekansların modlara göre değişimi (t=1 mm).

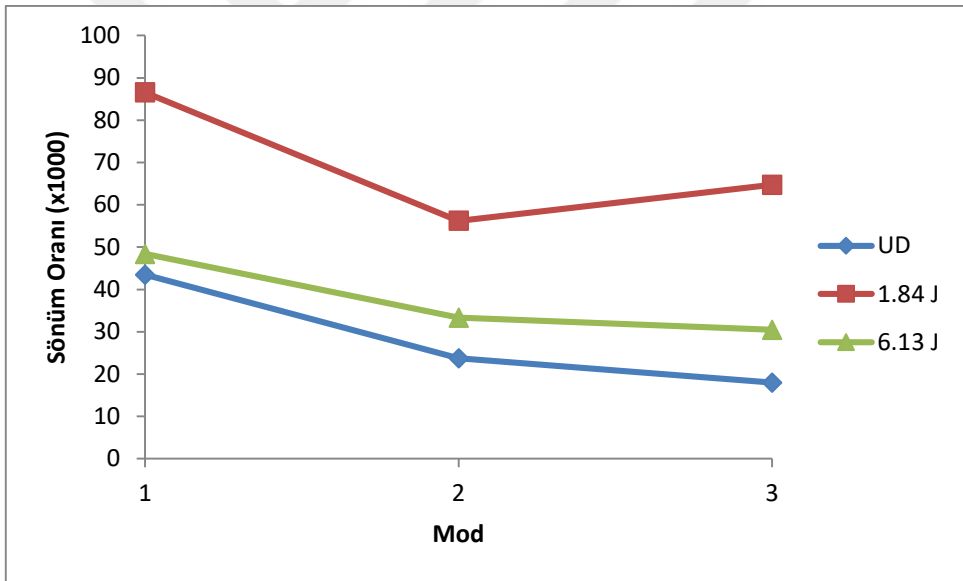


Şekil 5.29 50°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=1 mm).

1.5 mm kalınlıktaki örgülü kompozit plakanın hasarsız(UD), 1.84 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(1.84 J) ve 6.13 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(6.13 J) numunelerinin 1,2 ve 3. modlarındaki frekans ve sönüm oranı değerlerinin 25°C sıcaklık altındaki değişimleri sırasıyla Şekil 5.30 ve 5.31'de gösterilmektedir.

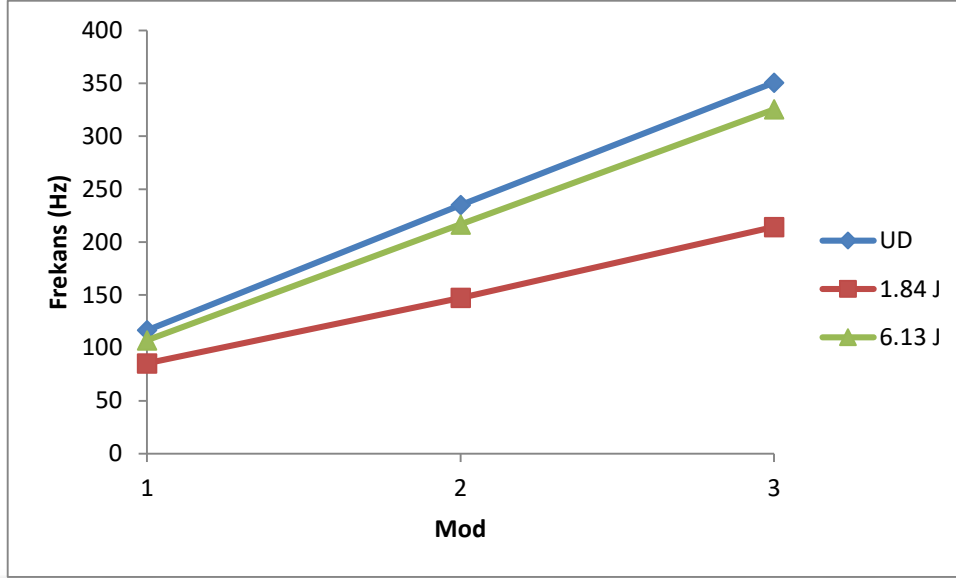


Şekil 5.30 25°C'de frekansların modlara göre değişimi (t=1.5 mm).

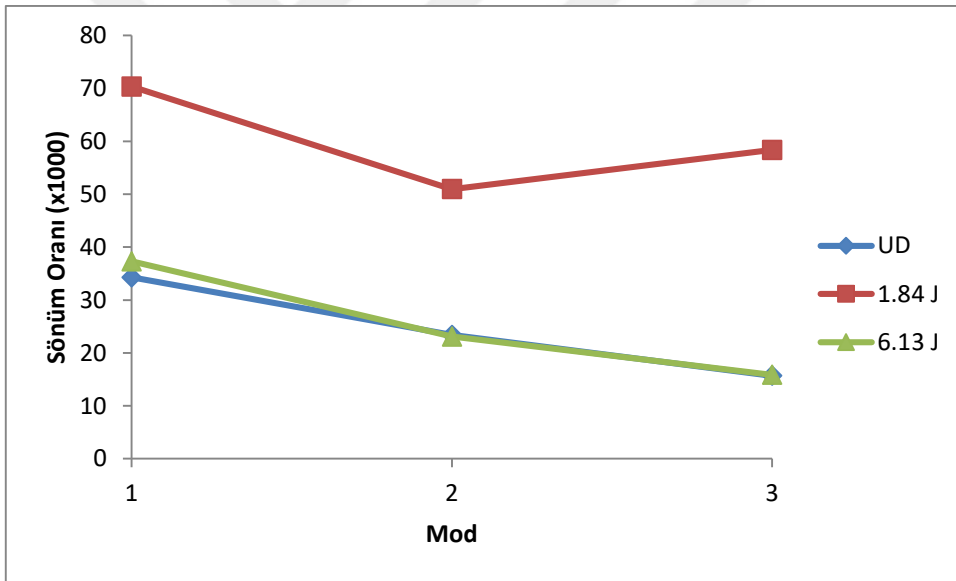


Şekil 5.31 25°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=1.5 mm).

1.5 mm kalınlıktaki örgülü kompozit plakanın hasarsız(UD), 1.84 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(1.84 J) ve 6.13 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(6.13 J) numunelerinin 1,2 ve 3. modlarındaki frekans ve sönüm oranı değerlerinin 35°C sıcaklık altındaki değişimleri sırasıyla Şekil 5.32 ve 5.33'de gösterilmektedir.

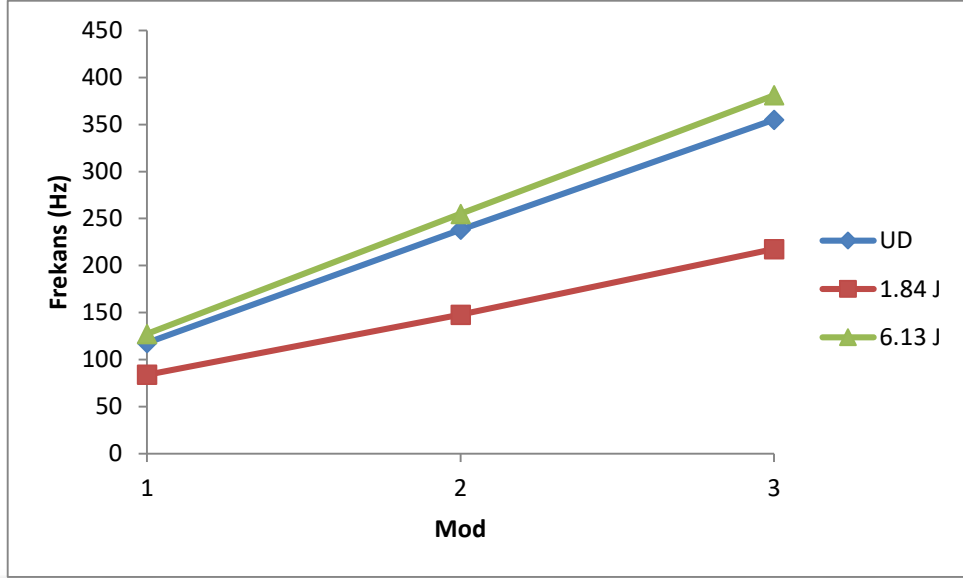


Şekil 5.32 35°C'de frekansların modlara göre değişimi (t=1.5 mm).

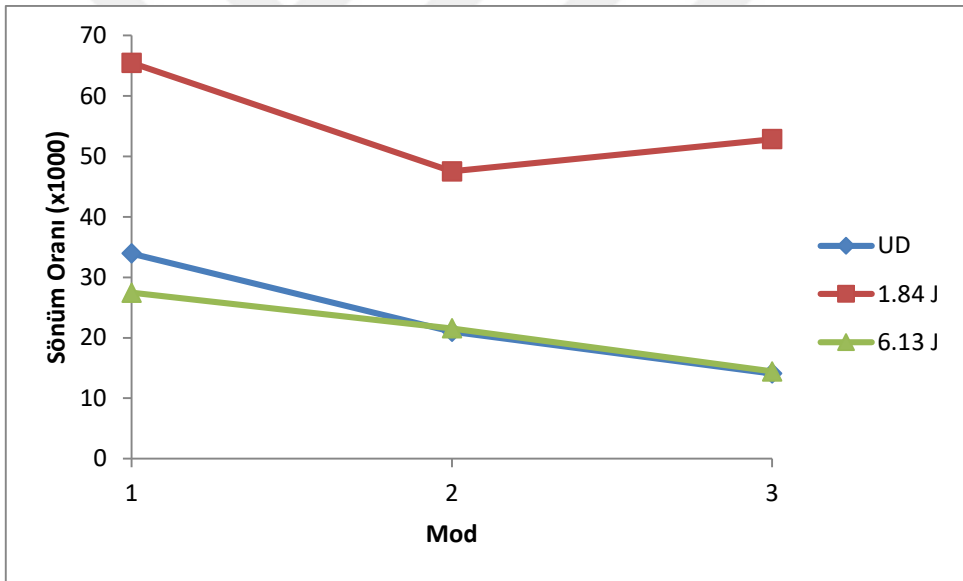


Şekil 5.33 35°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=1.5 mm).

1.5 mm kalınlıktaki örgülü kompozit plakanın hasarsız(UD), 1.84 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(1.84 J) ve 6.13 J potansiyel enerjiye sahip kurşun ile hasara uğratılmış(6.13 J) numunelerinin 1,2 ve 3. modlarındaki frekans ve sönüm oranı değerlerinin 50°C sıcaklık altındaki değişimleri sırasıyla Şekil 5.34 ve 5.35’de gösterilmektedir.



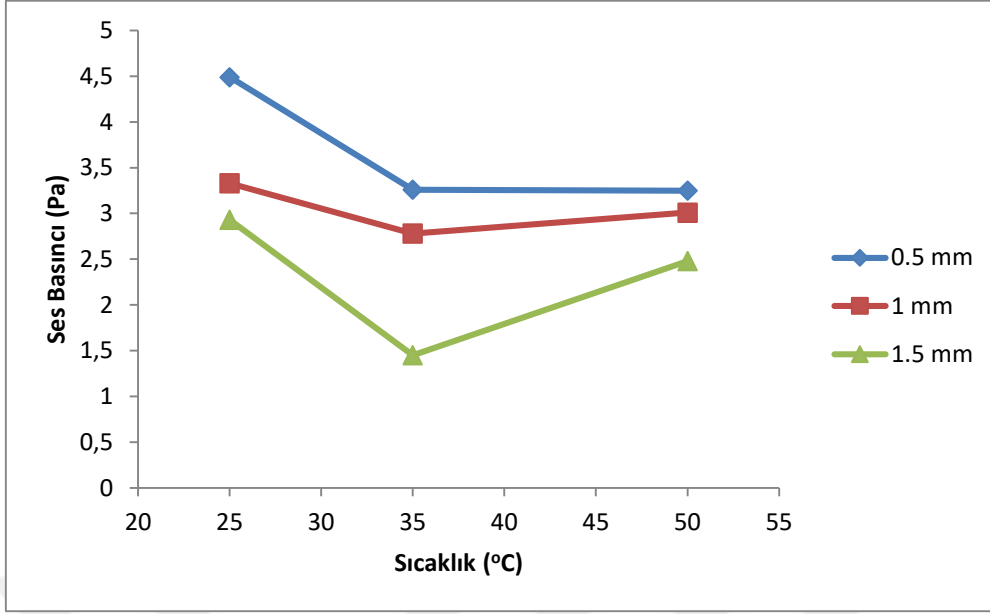
Şekil 5.34 50°C'de frekansların modlara göre değişimi (t=1.5 mm).



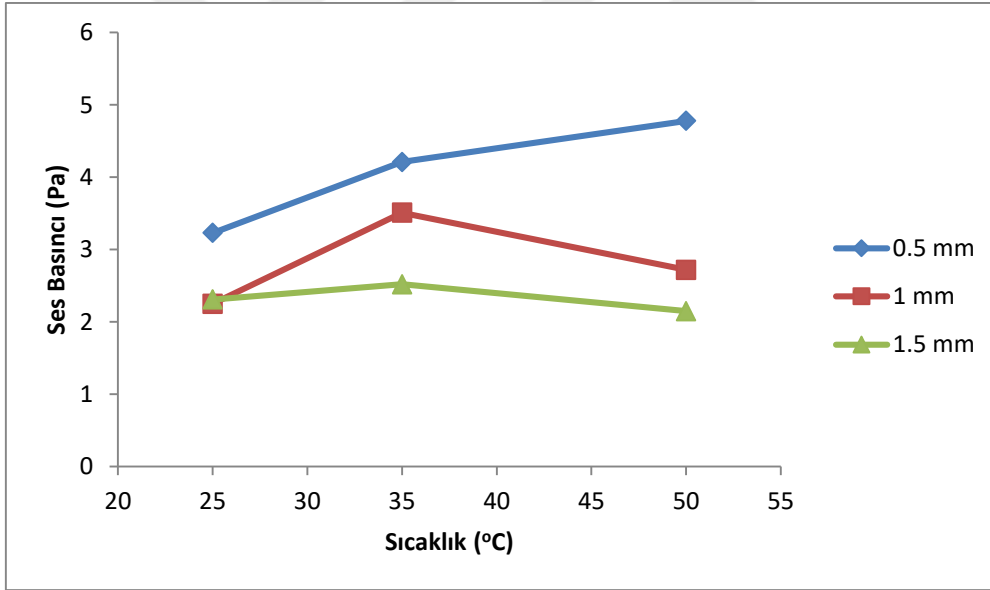
Şekil 5.35 50°C'de sönüm oranlarının modlara göre değişimi (t=1.5 mm).

Çizelge 5.11 Farklı sıcaklık, kalınlık ve hasar durumlarında elde edilen ses basıncı değerleri.

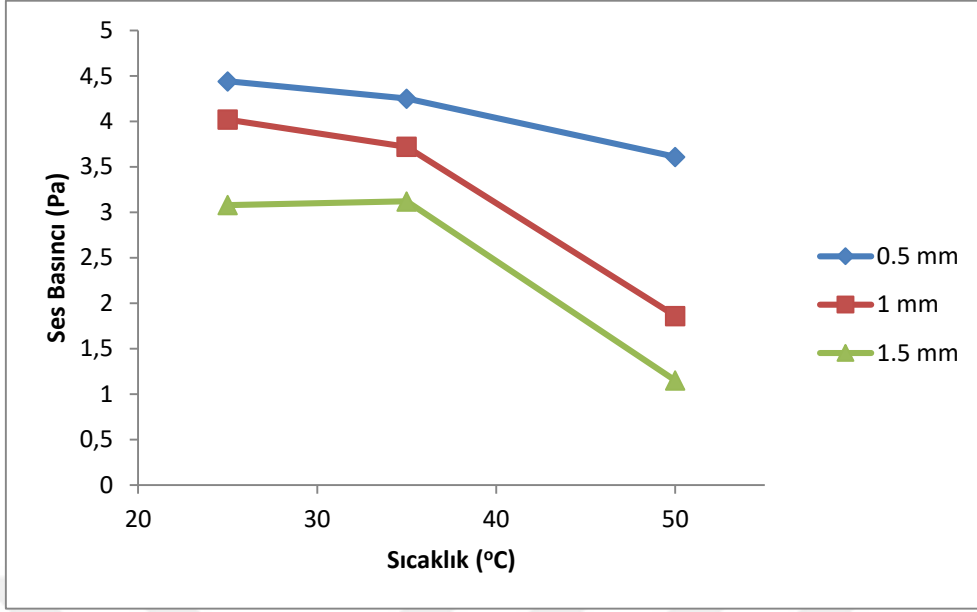
Numune Durumu	Hasar Durumu	Ses Basıncı (Pa)
Yok	Yok	0.13
Yok (Tahrik var)	Yok	0.27
25°C 'de 0.5 mm kalınlıkta	Yok	4.49
35°C 'de 0.5 mm kalınlıkta	Yok	3.26
50°C 'de 0.5 mm kalınlıkta	Yok	3.25
25°C 'de 1 mm kalınlıkta	Yok	3.33
35°C 'de 1 mm kalınlıkta	Yok	2.78
50°C 'de 1 mm kalınlıkta	Yok	3.01
25°C 'de 1.5 mm kalınlıkta	Yok	2.93
35°C 'de 1.5 mm kalınlıkta	Yok	1.45
50°C 'de 1.5 mm kalınlıkta	Yok	2.48
25°C 'de 0.5 mm kalınlıkta	1.84 J	3.23
35°C 'de 0.5 mm kalınlıkta	1.84 J	4.21
50°C 'de 0.5 mm kalınlıkta	1.84 J	4.78
25°C 'de 1 mm kalınlıkta	1.84 J	2.25
35°C 'de 1 mm kalınlıkta	1.84 J	3.51
50°C 'de 1 mm kalınlıkta	1.84 J	2.72
25°C 'de 1.5 mm kalınlıkta	1.84 J	2.31
35°C 'de 1.5 mm kalınlıkta	1.84 J	2.52
50°C 'de 1.5 mm kalınlıkta	1.84 J	2.15
25°C 'de 0.5 mm kalınlıkta	6.13 J	4.44
35°C 'de 0.5 mm kalınlıkta	6.13 J	4.25
50°C 'de 0.5 mm kalınlıkta	6.13 J	3.61
25°C 'de 1 mm kalınlıkta	6.13 J	4.02
35°C 'de 1 mm kalınlıkta	6.13 J	3.72
50°C 'de 1 mm kalınlıkta	6.13 J	1.86
25°C 'de 1.5 mm kalınlıkta	6.13 J	3.08
35°C 'de 1.5 mm kalınlıkta	6.13 J	3.12
50°C 'de 1.5 mm kalınlıkta	6.13 J	1.15



Şekil 5.36 Hasarsız durum.



Şekil 5.37 1.84 J ile hasara uğratılmış durum.



Şekil 5.38 6.13 J ile hasara uğratılmış durum.



BÖLÜM 6

YORUMLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Çalışmada üç farklı tipte ve kalınlıktaki kompozit numunelerin vibroakustik analizi yapılmıştır. 0.5 mm, 1 mm ve 1.5 mm kalınlığa sahip örgülü kompozit plakalar hasarsız, 1.84 J ve 6.13 J büyüklüğünde enerjiye sahip kurşunlar ile hasara maruz bırakılarak 25°C, 35 °C ve 50 °C sıcaklık altındaki titreşim karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir.

İlk olarak hasar durumunun değişmesi ile birlikte sıcaklık artışına bağlı olarak farklı modlardaki titreşim değerleri analiz edilmiştir. Termal etkiden bağımsız olarak bakıldığında deneylerden elde edilen sonuçlara göre malzemeye verilen hasar miktarı arttıkça modlardaki doğal frekans değerlerinde önemli oranda bir düşüş gözlemlenmiştir. Sıcaklığın etkisi göz önüne alındığında ise sonuçlar farklılık göstermiştir. Hasarsız durumda düşük kalınlıkta (0.5 mm) sıcaklığın artması ile birlikte modlardaki doğal frekans değerlerinde düşüş gözlemlenirken, numunelerin kalınlıklarının artması ile birlikte (1 mm, 1.5 mm) modlardaki frekans değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Bu durumun ısının düşük kalınlığa sahip kompozit plakadaki epoksiye daha iyi nüfuz etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

0.5 mm kalınlıktaki numuneye hasar verildiğinde, az hasarlı durumda (1.84 J) sıcaklığın artmasıyla birlikte modlardaki frekans değerlerinde hafif dereceli bir yükseliş, daha yüksek hasarlı durumda (6.13 J) ise hafif dereceli bir düşüş gözlemlenmiştir.

1 mm kalınlığa sahip numuneye hasar verildiğinde, az hasarlı durumda (1.84 J) sıcaklığın artmasıyla birlikte modlardaki frekans değerleri önce düşmüş sonra yükselmiş, daha yüksek hasarlı durumda (6.13 J) ise frekans değerleri önce düşmüş daha sonra ise yükselme eğilimine girmişlerdir.

1.5 mm kalınlıktaki numuneye hasar verildiğinde, az hasarlı durumda (1.84 J) sıcaklığın artmasıyla birlikte modlardaki frekans değerleri genel olarak artarken sadece ikinci modda belirgin derecede bir düşüş gözlemlenmiştir. Numuneye verilen hasar miktarı arttırıldığında (6.13 J) ise sıcaklığın artmasıyla birlikte tüm modlarda artış gözlemlenmiştir.

Modlardaki sönüm oranlarına bakıldığında, hasarsız durumda 0.5 mm kalınlıktaki örgülü kompozit plakadaki tüm modlardaki sönümlerinde artış gözlemlenmiştir. Numunelerin kalınlığı arttığında (1 mm, 1.5 mm) ise modlardaki sönüm oranlarının değerleri sıcaklık artışı ile beraber artmaya devam etmiş ancak artış daha düşük miktarda seyretmiştir.

0.5 mm kalınlığa sahip örgülü kompozit plaka düşük miktarda hasara (1.84 J) uğratıldığında modlardaki sönümleme oranları önce düşmüş daha sonra ise artmıştır. Aynı numuneye daha yüksek miktarda hasar (6.13 J) verildiğinde ise sönüm oranlarının genel olarak düştüğü gözlemlenmiştir.

1 mm kalınlıktaki numune düşük miktarda hasara (1.84 J) uğratıldığında modlardaki sönümleme oranları önce düşmüş daha sonra ise belirgin bir şekilde artmıştır. Hasar miktarı arttırıldığında (6.13 J) ise sıcaklığın artmasıyla birlikte modlardaki sönüm oranları genel olarak düşmüştür.

1.5 mm kalınlıktaki numuneye düşük miktarda hasar (1.84 J) verildiğinde sıcaklığın artmasıyla birlikte tüm modlardaki sönüm oranlarında düşüş gözlemlenmiştir. Numuneye daha yüksek miktarda hasar (6.13 J) hasar verildiğinde ise sıcaklık artışıyla beraber modlardaki sönüm oranlarında düşüş gözlemlenmeye devam edilmiştir.

Sıcaklık sabit tutularak, farklı sıcaklıklarda örgülü kompozit plakalara verilen hasar durumlarında malzemelerin titreşim değerleri analiz edildiğinde;

0.5,1 ve 1.5 mm kalınlıklarda, 25°C’de modlardan elde edilen frekans değerlerinin en yüksek değerleri hasarsız durumda gözlenirken hasar miktarının artmasıyla birlikte modlardaki frekans değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. 35°C’de benzer bir durum gözlemlenirken modlardaki frekans değerleri birbirine yakınsamıştır. 50°C’de ise modlardaki frekans

değerleri belirgin bir yaklaşma göstermiştir. 0.5, 1 ve 1.5 mm kalınlıklarda hasarsız ve hasarlı durumların tamamında modlardaki sönüm oranlarında düşüş gözlemlenmiştir.

Akustik değerler analiz edildiğinde ise hasarsız durumda sıcaklığın artmasıyla birlikte 0.5, 1 ve 1.5 mm kalınlığındaki tüm numunelerde ses basıncı değerlerinde önce düşüş daha sonra ise yükseliş görülmüştür. Numunelere hasar verildiğinde, düşük hasarlı durumda (1.84 J) sıcaklığın artmasıyla ses basıncı değerleri önce artmış daha sonra ise düşüş göstermiştir. Daha yüksek hasarlı durumda (6.13 J) ise sıcaklığın artmasıyla birlikte ses basıncı değerlerinde yüksek miktarda düşüş gözlemlenmiştir.

Deneylerden elde edilen sonuçlar Li ve arkadaşlarının (Li et al. 2016) çalışması ile uyumluluk göstermektedir. Li'nin çalışmasında hasarsız durumda 5 mm kalınlıktaki tabakalı kompozit plakada, sıcaklığın artmasıyla (0°C - 80°C) ilk üç moddaki frekans değerlerinde sırasıyla %66.19, %26.55, %29.54 düşüş gözlemlenirken güncel çalışmada 0.5 mm kalınlık için ilk üç moddaki frekanslarda sırasıyla %49.5, %37.4 ve %27 düşüş gözlemlenmiştir.

Genel olarak bakıldığında;

Sıcaklığın artmasıyla birlikte (25°C - 35°C - 50°C) örgülü kompozit plakaların doğal frekans ve ses basıncı değerlerinde düşüş gözlemlenirken, sönüm oranlarında artış gözlemlenmiştir.

Kalınlığın artması ile birlikte (0.5 mm - 1mm - 1.5 mm) örgülü kompozit plakaların doğal frekans değerlerinde artış gözlemlenirken, ses basıncı ve sönüm oranı değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

Hasar durumunun artması ile birlikte (UD - 1.84 J - 6.13 J) örgülü kompozit plakaların doğal frekans ve ses basıncı değerlerinde düşüş gözlemlenirken, sönüm oranlarında artış gözlemlenmiştir.



KAYNAKLAR

- Ashby M F and Cebon D** (1993) Materials Selection in Mechanical Design. *Journal de Physique Archives*, 3: 1-9.
- Aviation Maintenance Technician Handbook Airframe** (2012) *Federal Aviation Administration US Department of Transportation-Flight Standards Service*. Adres: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/amt_airframe_vol1.pdf
- Bagherpour S** (2012) Fibre Reinforced Polyester Composites. *Polymers*, Saleh H M (Ed.), 1st edition, ISBN: 978-953-51-0770-5, InTech, e-book, 167-198.
- Baucom J N and Zikry M A** (2005) Low-Velocity Impact Damage Progression in Woven E-Glass Composite Systems. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36 (5): 658-664.
- Benli S ve Sayman O** (2011) Mathematical and Computational Application. *Association of Scientific Research*, 16: 392-403.
- Bisht D and Chauhan H** (2014) Estimating Effects of Temperature on Tensile Strength of Eglass Composite with Unsaturated Orthophthalic Polyester. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4 (1): 175-176.
- Callister W D and Rethwisch D G** (2013) *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9th edition, ISBN: 978-1-118-31922-2, Wiley, USA, 936 pp.
- Campbell F C** (2010) *Structural Composite Materials*. 1st edition, ISBN: 978-1-61503-037-8, ASM International, USA, 612 pp.
- Carolín A** (2003) Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements. *PhD Thesis*, Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå / Sweden, 52 pp.
- Chen C S, Chen C W, Chen W R and Chang Y C** (2013) Thermally Induced Vibration and Stability of Laminated Composite Plates with Temperature-Dependent Properties. *Meccanica*, 48 (9): 2311-2323.
- Composites Overview**. (15.11.2016) *History of Recent Science and Technology*. Adres: http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm
- CTP Teknolojisi**. (2017) *Şişecam Kimyasallar*. Adres: <http://www.sisecamkimyasallar.com/tr/faaliyet-alanlarimiz/cam-elyaf>
- CTP'den Neler Yapılıyor ? Uygulama Örnekleri**. (t.y.) *Kompozit*. Adres: <http://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2017/05/CTP-Uygulama-Ornekler.pdf>

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Daniel M I and Ishai O** (2006) *Engineering mechanics of composite materials*. 2nd edition, ISBN: 978-0195150971, Oxford University Press, Oxford, 411 pp.
- Engineering Noise Control**. (2001) Adres: <http://www.mne.psu.edu/lamancusa/me458/>
- Gächter R and Müller H** (1985) *Plastics Additives Handbook*. 1st edition, ISBN: 978-3446195790, Hanser, Munich, 754 pp.
- Geng Q, Li H and Li Y** (2014) Dynamic and Acoustic Response of A Clamped Rectangular Plate in Thermal Environments: Experiment and Numerical Simulation. *Journal of Acoustical Society of America*, 135: 2674-2682.
- Handbook of Analytical Methods for Textile Composites**. (1997) *NASA Contractor Report 4750*. Adres: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19970017583.pdf>
- Jassal M and Ghosh S** (2002) Aramid Fibres - An Overview. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 24: 290-306.
- Jeyaraj P, Ganesan N and Padmanabhan C** (2009) Vibration and Acoustic Response of A Composite Plate with Inherent Material Damping in A Thermal Environment. *Journal of Sound and Vibration*, 320 (1-2): 322-338.
- Li X, Yu K, Han J, Song H and Zhao R** (2016) Buckling and Vibro-Acoustic Response of the Clamped Composite Laminated Plate in Thermal Environment. *International Journal of Mechanical Sciences*, 119: 370-382.
- Masuelli M A** (2013) Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes. *Polymers*, Masuelli M A (Ed.), 1st edition, ISBN: 978-953-51-0938-9, InTech, e-book, 3-40.
- Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri**. (2008) *YTÜ*. Adres: http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son
- Mrazova M** (2013) Advanced Composite Materials of the Future in Aerospace Industry. *Incas Bulletin*, 5 (3): 139-150.
- Plastik Matrisli Kompozitler** (2008) *YTÜ*. Adres: http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/Plastik_Matrisli_Kompozitler.pdf
- Ratwani M M** (2010) Composite Materials and Sandwich Structures - A Primer. *NATO*, 17 (4): 1-17.
- Sahu N P, Khande D K, Patel G C and Sen P K** (2014) Study On Aramid Fibre and Comparison With Other Composite Materials. *IJIRST –International Journal for Innovative Research in Science and Technology*, 1 (7): 303-306.
- Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri** (2008) *YTÜ*. Adres: http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/SMK_son

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Singha M K, Ramachandra L S and Bandyopadhyay J N (2006) Vibration Behavior of Thermally Stressed Composite Skew Plate. *Journal of Sound and Vibration*, 296: 1093-1102.

SP Systems - Composite Engineering Materials (t.y.) *Guide to Composites*. Adres: http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/documentation/SP_Composites_Guide.pdf

Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. (December 2002). Adres: <http://file.yizimg.com/175706/2012061422194947.pdf>

Standard Test Methods for Textile Composites. (1996) *NASA Contractor Report 4751*. Adres: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19960054333.pdf>

URL-1 <<http://www.lucintel.com>>, Ziyaret tarihi: 25.11.2016.

URL-2 <http://www.materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/strength-density/basic.html>, Ziyaret tarihi: 10.11.2016.

URL-3 <<http://www.christinedemerchant.com/carbon-kevlar-glass-comparison.html>>, Ziyaret Tarihi: 19.11.2016.

URL-4 <<http://www.boeing.com>>, Ziyaret Tarihi: 19.11.2016.

URL-5 <<http://www.columbia.edu>>, Ziyaret Tarihi: 19.11.2016.

Vangipuram P and Ganesan N (2007) Buckling and Vibration of Rectangular Composite Viscoelastic Sandwich Plates Under Thermal Loads. *Composite Structures*, 77 (4): 419-429.



ÖZGEÇMİŞ

Utku Uzun, 1990 yılında Adana’da doğdu. İlköğretim eğitimini Yaltır Kardeşler İlköğretim Okulu’nda tamamladı. Ceyhan Halil Çiftçi Anadolu Lisesi’nde lise eğitimini tamamladıktan sonra 2008 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi’ne kaydoldu. 2012 yılında mezun olduktan sonra 2 yıl özel bir firmada makine mühendisi olarak çalışmıştır. 2014 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi’nde araştırma görevlisi olarak başladığı görevine hala devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ:

Adres: Bülent Ecevit Üniversitesi Farabi Kampüsü Makine Mühendisliği Bölümü
İncivez/Zonguldak

Tel: (+90) 372 257 40 10/ 2375

E-posta: utku.uzun@beun.edu.tr