T. C.
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKRO PARÇACIK KATKILI EPOKSİ KOMPOZİTLERİN TİTREŞİM ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Meltem ÜRER

(20219215005)

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Aydın DEMİR

SİVAS

TEMMUZ 2023

Meltem ÜRER'in hazırladığı ve **"MİKRO PARÇACIK KATKILI EPOKSİ KOMPOZİTLERİN TİTREŞİM ANALİZİ"** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	**Dr. Öğr. Üyesi Aydın DEMİR** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	……
Jüri Üyesi	**Doç. Dr. Mehmet BULUT** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	……..……
Jüri Üyesi	**Dr. Öğr. Üyesi Sakine KIRATLI** Çankırı Karatekin Üniversitesi	……..……..

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Özlem Pelin CAN
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Meltem ÜRER, 2023

Canımdan çok sevdiğim vefat eden ağabeyim Mert ÜRER'in anısına...

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

7.07.2023

Meltem ÜRER

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi sırasında desteğini hiç esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım saygıdeğer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Aydın DEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez jüri üyelerinden Doç. Dr. Mehmet BULUT ve Dr. Öğr. Üyesi Sakine KIRATLI'ya tezime olan katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tezi hazırlamamda ve deneysel çalışmalarımda büyük yardımları dokunan Arş. Gör. Lutuf ERTÜRK'e, deney düzeneğimin üretilmesinde katkılarından dolayı Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nde bulunan Arş. Gör. Muhammed Taha YILDIZ'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince gerek teknik anlamda gerekse manevi anlamda desteklerini gönülden hissettiğim kıymetli hocalarım Doç. Dr. Ferhat KILINÇ, Doç. Dr. Ümit Nazlı TEMEL, Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖZTÜRK, Dr. Öğr. Üyesi Hacı Ali ERTAŞ, Arş. Gör. Bedrettin COŞKUN, Arş. Gör. Mustafa CANER, Arş. Gör. Yunis AKKAŞ'a teşekkür ederim.

Akademiye ve hayata dair güzel sohbetler ettiğim, hayata karşı bakış açımı güzelleştirmeyi sağlayan Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Sevgi ÇAVDAR'a teşekkür ederim.

Büyük bir sabır ve anlayışla beni yetiştiren, hayatım boyunca attığım her adımda yanımda olup maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen canım annem Sennur ÜRER ve canım babam Mustafa ÜRER'e teşekkürlerimi borç bilirim. Şu anda hayatta olmayan varlığını hep yanımda hissettiğim ve sonsuza kadar da hissedeceğim biricik ağabeyim Mert ÜRER'i anıyor ve bu tez çalışmamı ona armağan ediyorum.

ÖZET

MİKRO PARÇACIK KATKILI EPOKSİ KOMPOZİTLERİN TİTREŞİM ANALİZİ

Meltem ÜRER

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Aydın DEMİR

2023, 74+xvi sayfa

Bu çalışmada, saf epoksi reçineye %5, %10 ve %15 oranlarında ayrı ayrı grafit (C), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) mikropartikülleri eklenerek belirli boyutlarda epoksi kompozit numuneler üretilmiştir. Üretilen bu epoksi kompozitlerin mekanik ve titreşim davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Epoksi kompozitlerin üretiminin gerçekleşmesinde saf epoksi reçineye belirlenen oranlarda grafit, silisyum karbür ve bor karbür mikroparçacıkları katılıp homojenizatör ile karıştırılarak homojen bir hale getirilmiştir. Homojen hale getirilen karışımlar ölçüleri belirlenen kalıplara dökülüp oda sıcaklığında 3 gün bekletilerek boyutları eşit epoksi kompozit numuneler üretilmiştir. Daha sonra basit mesnetli bir titreşim test düzeneği tasarlanmış ve bu malzemelerden üretilen epoksi kompozit numunelerin serbest titreşimleri bu deney düzeneğinde modal analiz yöntemi ile incelenmiş ve frekans spektrumları elde edilmiştir. Titreşim sönüm oranları, yarı güç bant genişliği yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu epoksi kompozit numunelerin mekanik özellikleri de çekme testi uygulanarak ve Arşimed prensibiyle yoğunlukları belirlenmiştir. Elde edilen titreşim değerleri teorik olarak kontrol edilerek bu numunelere belirli oranlarda mikropartikül katkılarının doğal frekans ve sönümleme özelliklerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Belirli oranlarda mikropartikül katkı maddelerinin genel olarak doğal frekansları azalttığı ve sönüm oranlarını hem düşürdüğü hem de arttırdığı gözlemlenmiştir. Çekme testi uygulanarak mekanik özelliği araştırılan grafit, silisyum karbür ve bor karbür katkılı epoksi kompozit numunelerin genel olarak hepsinin elastisite modüllerinde artış olduğu, fakat bu artışın düzgün ve doğrusal olmadığı görülmüştür. Bu kompozit numunelerin kopma dayanımı ise genel olarak saf epoksiye göre azaldığı ancak sadece %5 silisyum karbür katkılı epoksi kompozitte arttığı anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Güçlendirilmiş Epoksi Kompozit, Mikro Partikül, Serbest Titreşim, Mekanik Özellikler.

ABSTRACT

VIBRATION ANALYSIS OF MICRO PARTICLE REINFORCED EPOXY COMPOSITES

Meltem ÜRER

Master of Science Thesis
Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Dr. Aydın DEMİR
2023, 74+xvi pages

In this study, epoxy composite specimens of certain sizes were produced by adding graphite (C), silicon carbide (SiC) and boron carbide (B_4C) microparticles separately at the ratio of 5%, 10% and 15% to the pure epoxy resin. The effects of these produced epoxy composites on the mechanical and vibration behaviors were investigated. In the realization of the production of epoxy composites, graphite, silicon carbide and boron carbide microparticles were added to the pure epoxy resin in the determined proportions and mixed with a homogenizer to make it homogeneous. The homogenized mixtures were poured into molds of which dimensions were determined, and epoxy composite specimens were produced by keeping them at room temperature for 3 days. Then, a simply supported vibration test setup was designed and the free vibrations of the epoxy composite specimens produced from these materials were investigated by modal analysis method in this experimental setup and their frequency spectra were obtained. Vibration damping ratios were calculated using the half power bandwidth method. The mechanical properties of these epoxy composite specimens were also determined by applying the tensile test and their densities with the Archimedes principle. By controlling the obtained vibration values theoretically, the effect of microparticle additives in certain proportions on the natural frequency and damping properties of these specimens was examined in detail. It has been observed that microparticle additives in certain proportions generally reduce the natural frequencies and both decrease and increase the damping ratio. In general, all of the graphite, silicon carbide and boron carbide added epoxy composite specimens, whose mechanical properties

were investigated by applying the tensile test, showed an increase in the modulus of elasticity, but this increase was not smooth and linear. It was understood that the breaking strength of these composite specimens generally decreased compared to pure epoxy, but increased only in 5% silicon carbide added epoxy composite.

Key Words: Reinforced epoxy composite, micro particle, free vibration, mechanical properties.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR ..... **vii**
ÖZET ..... **viii**
ABSTRACT ..... **ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xiv**
SİMGELER DİZİNİ ..... **xv**
KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xvi**

1.GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı ve İçeriği 1
1.2 Literatürde Yapılan Çalışmalar 1
2. EPOKSİ KOMPOZİTLER **11**
2.1 Epoksi Kompozitin Tanımı, Çeşitleri ve Kullanım Yerleri 11
2.2 Epoksi Reçinenin Tanımı ve Tarihsel Gelişim Süreci 12
2.3 Kürleme Nedir, Nasıl Yapılır? 14
2.4 Kürleme Çeşitleri 14
2.5 Epoksi Bazlı Kompozitler 15
2.6 Kompozit İmalat Yöntemleri 17
3. TİTREŞİM **23**
3.1 Temel Kavramlar 23
3.2 Titreşimin Sınıflandırılması 26
3.2.1 Sönümsüz serbest titreşim 26
3.2.2 Sönümlü serbest titreşim 28
3.2.3 Sönümsüz zorlanmış titreşimler 32
3.2.4 Sönümlü zorlanmış titreşimler 33
3.3 Titreşim Ölçümü 35
3.4 Titreşim Ölçüm Donanımı 35
3.5 Titreşim Analizi 39
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **42**
4.1 Epoksi Kompozitlerin Üretimi 42
4.2 Deney Düzeneği ve Titreşim Ölçüm Testi 46
4.3 Çekme Testi 50
5. SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRMELER **52**
5.1 Sonuçlar 52
5.2 Genel Değerlendirmeler 69
KAYNAKLAR **71**

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Epoksi reçinelerin uygulama alanları **12**
Şekil 2.2 El yatırması prosesi adımları **17**
Şekil 2.3 Püskürtme yöntemi **18**
Şekil 2.4 Elyaf sarım prosesi düzeneği **19**
Şekil 2.5 Reçine transfer yöntemi **19**
Şekil 2.6 Profil çekme yöntemi düzeneği **20**
Şekil 2.7 Enjeksiyon kalıplama basamakları **21**
Şekil 2.8 Santrifüj kalıplama yöntemi **21**
Şekil 2.9 Vakum torba kalıplama **22**
Şekil 3.1 Basit harmonik hareket **24**
Şekil 3.2 Basit harmonik harekette yer değiştirme, hız ve ivmenin zamanla değişimi .. **25**
Şekil 3.3 Yay karakteristikli yay kütle sistemi **26**
Şekil 3.4 Yer değiştirme-zaman eğrisi **27**
Şekil 3.5 Viskoz sönümleme **28**
Şekil 3.6 Sönümlü serbest yay-kütle sistemi **28**
Şekil 3.7 Aşırı sönümde yer değiştirme grafiği **30**
Şekil 3.8 Zayıf sönümde yer değiştirme grafiği **31**
Şekil 3.9 Yay - kütle sisteminin harmonik kuvvetle tahrik edilmesi **32**
Şekil 3.10 Rezonans eğrisi (büyütme faktörü) **33**
Şekil 3.11 Sönümlü bir yay-kütle sisteminin tahrik edilmesi **33**
Şekil 3.12 Sönümlü bir sistem için büyütme faktörü **34**
Şekil 3.13 Titreşim testinin gerçekleştirilmesinde kullanılan bir donanım şeması **36**
Şekil 3.14 Bir darbe çekici vuruşunun zaman (a) ve frekans (b) cevabı **37**
Şekil 3.15 Piezoelektrik ivmeölçerin şeması ve fotoğrafı **37**
Şekil 3.16 Genel bir F(t) periyodik fonksiyonu örneği **39**
Şekil 3.17 Birkaç sinyal ve onların Fourier spektrumu **40**
Şekil 3.18 Modal sönüm oranının hesaplanmasını gösteren frekans cevap fonksiyonu **41**
Şekil 4.1 Hassas tartı **42**
Şekil 4.2 Katkı maddelerinin epoksi reçineye eklenmesi **43**
Şekil 4.3 Katkı maddelerinin homojenizatörde karıştırılması **43**
Şekil 4.4 Karışım ve probu soğutmak için kullanılan buzlu kap **44**
Şekil 4.5 Pleksiglas kalıp **44**
Şekil 4.6 Karışımların pleksiglas malzemeye dökülmesi **45**
Şekil 4.7 Üretilen katkısız epoksi numune ve katkılı epoksi kompozit numuneler **46**
Şekil 4.8 Deney düzeneğinin SolidWorks programında çizimi **46**
Şekil 4.9 İvmeölçer **47**
Şekil 4.10 Genel amaçlı modal çekiç **47**
Şekil 4.11 LabShop yazılımı **48**
Şekil 4.12 Deney düzeneğine yerleştirilen numuneden çekiçle ölçüm alınması **48**
Şekil 4.13 Deneysel kurulum ve titreşim sistemi **49**
Şekil 4.14 Çekme cihazına bağlanan numune **50**
Şekil 4.15 Numunenin yoğunluk ölçümü **51**
Şekil 5.1 Grafit katkılı kompozit numunelerin frekans spektrumu **52**
Şekil 5.2 Silisyum karbür katkılı kompozit numunelerin frekans spektrumu **53**
Şekil 5.3 Bor karbür katkılı kompozit numunelerin frekans spektrumu **53**
Şekil 5.4 Grafit katkılı kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki

frekans spektrumu **54**
Şekil 5.5 Silisyum karbür katkılı kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu **55**
Şekil 5.6 Bor karbür katkılı kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu **56**
Şekil 5.7 %5 katkılı epoksi kompozit numunelerin frekans spektrumu **57**
Şekil 5.8 %10 katkılı epoksi kompozit numunelerin frekans spektrumu **57**
Şekil 5.9 %15 katkılı epoksi kompozit numunelerin frekans spektrumu **58**
Şekil 5.10 %5 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu **59**
Şekil 5.11 %10 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu **60**
Şekil 5.12 %15 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu **60**
Şekil 5.13 Katkı oranına göre doğal frekansın değişimi **62**
Şekil 5.14 Katkı oranına göre sönümleme oranının değişimi **62**
Şekil 5.15 Grafit katkılı epoksi kompozitlerin çekme gerilimi- birim uzama eğrileri (σ-ϵ) **65**
Şekil 5.16 Silisyum karbür katkılı epoksi kompozitlerin çekme gerilimi- birim uzama eğrileri (σ-ϵ) **65**
Şekil 5.17 Bor karbür katkılı epoksi kompozitlerin çekme gerilimi- birim uzama eğrileri (σ-ϵ) **66**
Şekil 5.18 %5 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin çekme gerilmeleri-birim uzama eğrileri (σ-ϵ) **67**
Şekil 5.19 %10 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin çekme gerilmeleri-birim uzama eğrileri (σ-ϵ) **68**
Şekil 5.20 %15 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin çekme gerilmeleri-birim uzama eğrileri (σ-ϵ) **68**

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Kütle- yay- sönüm sisteminin cevap fonksiyonları ve dönüşümü **41**
Çizelge 5.1 Kompozit numunelerin ilk doğal frekansları ve sönüm oranları..... **63**
Çizelge 5.2 Üretilen kompozit numunelerin bazı mekanik özellikleri..... **64**

SİMGELER DİZİNİ

% ϵ	Birim uzama yüzdesi
A	Genlik
a	İvme
c	Sönümleme katsayısı
cSt	Kinematik viskozite birimi
dB	Desibel
E	Elastisite modülü
f	Frekans
F_k	Yay karakteristiği
f_n	Yay kütle sisteminin periyodu
G	Kütle merkezi
Hz	Hertz
I	Kesit atalet momenti
k	Yay sabiti
L	Numunenin boyu
m	Kütle
N	Newton
Pa	Paskal
rad	Radyan
sn	Saniye
T	Periyot
t	Zaman
v	Hız
x	Yer değişimi
β_i	Sınır şartlarına bağlı katsayılar
η	Frekanslar oranı
ξ	Sönümleme faktörü
ρ	Yoğunluk
σ_k	Kopma mukavemeti
ϕ	Faz açısı
ω	Açısal frekans
ω_d	Sönümlenmiş titreşimlerin doğal dairesel frekansı (özfrekans)
ω_n	Doğal frekans

KISALTMALAR DİZİNİ

ABS	Poli(akrilonitril-ko-bütadien-ko-stiren)
B_4C	Bor karbür
C	Grafit
CFRP	Karbon fiber takviyeli polimer kompozit
CNF	Karbon nanofiber
CNT	Karbon nanotüp
cSt	Santistok
FFT	Hızlı Fourier dönüşümleri
FRF	Frekans tepki fonksiyonu
G	Giga
GNP	Grapen nanoplatelet
GO	Grafen oksit
M	Mega
MoS_2	Molibden disülfür
NaOH	Sodyum hidroksit
ODS	Operasyonel yer değiştirme şekilleri
PEI	Poli(eter imidler)
PES	Poli(eter sülfonlar)
SA	Silika aerojel
SIDV	Taramalı lazer Doppler vibrometre
Si_3N_4	Silisyum nitrür
SiC	Silisyum karbür
SiO_2	Silisyum oksit
SK	Sinyal koşullandırma
T	Transdüser(dönüştürücü)

1. GİRİŞ

Malzemeler, günlük hayatımızın hemen hemen her yerinde hatta en önem arz eden durumlarda kullandığımız öğelerin yapıtaşını oluşturur. Bu yüzden, çeşitli durumlarda malzeme seçimine çok dikkat edilmelidir. Özellikle havacılık, uzay, otomotiv, inşaat gibi potansiyel alanlar başta olmak üzere birçok alanda malzeme seçimi önemli bir parametredir.

Olağanüstü mekanik özelliklere sahip olan epoksi reçineler, yüksek mukavemet ve modül, mükemmel yapışma, iyi kimyasal direnç ve işlenme kolaylığı sağlar. Buna karşın kırılgan olmaları, nem varlığında özelliklerinin azalması ve polyester reçinelere göre epoksilerin işlenmesi veya sertleşmesinin daha yavaş olması dezavantajlarıdır. Epoksi reçineler yüksek elektrik direnci ve iyi ısı direnci sayesinde kaplamalarda, elektronik malzemelerde, çeşitli yapıştırıcılarda, elyaf takviyeli kompozitler ve kompozit matrislerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kompozitlerin kullanıldığı birçok alanda yapıların güvenliği için dinamik performansları çok önemlidir. Bu nedenle yüksek performanslı makine ve sistemlerde kullanılan kompozit malzemelerin doğal frekans ve sönüm gibi titreşim karakteristiklerinin iyileştirilmesi son derece önemlidir.

1.1 Tezin Amacı ve İçeriği

Epoksi kompozitler havacılık, uzay, spor, denizcilik, imalat, otomotiv, uydu, radar…vb. gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Epoksi malzemeye çeşitli mikro parçacıklar katılarak titreşim sönümleme özelliklerinin belirlenmesi ve iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Üretilen mikro parçacık katkılı epoksi malzemelerin titreşim karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiş ve bazı mekanik özellikleri saptanmıştır. Elde edilen deney sonuçları teorik sonuçlarla da karşılaştırılmıştır.

1.2 Literatürde Yapılan Çalışmalar

Bu çalışmada mikro parçacık katkılı epoksi kompozitlerin titreşim analizi konusu ele alınmıştır. Bu konuyla yapılacak olan deneysel çalışmalarda kullanılacak olan malzeme ve cihazla neler yapıldığı araştırılmıştır. Literatürdeki araştırmalar sonucunda bu konuyla ilgili çalışmalar, bu çalışmalarda neler yapıldığı ve hangi aşamaların dikkate alındığı aşağıda belirtildiği gibidir:

Ramakrishnan vd. (2021), basınçlı kalıplama yöntemiyle jüt/nano-kil/epoksi hibrit kompozitlerin üretilmesi için çeşitli oranlarda işlenmemiş ve işlenmiş jüt fiberi ve nano-kil kullanmışlardır. Dinamik mekanik ve serbest titreşim davranışları, NaOH konsantrasyonu (%2.5, %5 ve %7.5) ve nano-kilin ağırlıkça %'si (%1, %3, 5 ve %7) değiştirilerek değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, depolama ve kayıp modülünün, sönümleme faktörünün ve doğal frekansın NaOH çözeltisinin konsantrasyonundan etkilendiğini ortaya çıkarmışlardır. NaOH ile yapılan işlem ve nano-kil ilavesinden sonra cam geçiş sıcaklığında ve kompozitlerin doğal frekansında pozitif bir kaymanın (daha yüksek sıcaklığa doğru) görülmesi jüt lifleri ve epoksi matrisi arasında üstün ara yüzey bağının var olduğu doğrulanmıştır. Son olarak, inşaat ve otomobil endüstrilerinde düşük mukavemetli yapısal uygulamalar için %5 işlem görmüş fiber ve ağırlıkça %5 nano-kil içeren kompozitler önerilmektedir [1].

Mırıtoıu vd. (2021), mısır koçanı tozu ile güçlendirilmiş bazı kompozitler oluşturulup ve matris, Resoltech 1050 reçinesi ile Resoltech 1058 sertleştiricisinin bir kombinasyonu ile yapmışlardır. Kompozit üretimi için manuel döküm tekniğini kullanmışlardır. Yeni üretilen kompozitler için ASTM D3039 standartı kullanılarak young modülü, kopma mukavemeti ve kopma uzamasına göre çekme testinden mekanik özellikleri belirlemişlerdir. Ayrıca ASTM D695-15'e göre basma testi için numuneleri kalıplanıp kırılma mukavemetini belirlemişlerdir. Çekme ve basma testleri üniversal test makinelerinde yapılmıştır. Sonunda ise, numuneleri bir kenardan sıkıştırarak ve diğer kenarda numuneleri serbest bırakılarak incelenen malzemenin dinamik mekanik özellikleri de belirlenmiştir. Sınırsız kenara, numunelerin serbest titreşimlerini kaydeden bir Bruel & Kjaer ivmeölçer yerleştirmişlerdir. Serbest titreşim kaydı ve Euler-Bernoulli teorisinden sonraki dinamik mekanik özelliklerinden birim kütle ve uzunluk başına sönüm faktörü, öz frekans, dinamik elastiklik modülü, kayıp faktörü ve dinamik rijitliği belirlemişlerdir. Deneysel sonuçlardan, önerilen malzeme için çekme testine kıyasla basmada artan kırılma mukavemeti değerleri elde etmişlerdir. Mühendislik literatüründe incelenen benzer malzemelerle karşılaştırıldığında, basma testinde yüksek kırılma mukavemeti elde etmişlerdir [2].

Mohammad Rafiee vd. (2019), dört farklı nanodolgu yüklemesinde (ağırlıkça %0,2, %0,4, %0,6, %1,2) bozulmamış ve amino işlevli grafen nanoplateletler (GNP'ler) ile modifiye edilmiş epoksi kompozitlerin titreşim ve sönümleme özelliklerini karakterize etmeyi amaçlamışlardır. GNP'ler/aseton çözeltisi, mekanik karıştırma yoluyla epoksi ile

karıştırılmıştır. Karışım daha sonra asetonu buharlaştırmak için bir sıcak plaka vasıtasıyla ısıtılmıştır. Karışım soğutulduktan sonra, sertleştirici ilave edilmiştir ve karışım, nanokompozit test numuneleri oluşturmak için alüminyum kalıplara enjekte etmişlerdir. Bir çalkalayıcıyla, sabit uçtaki konsol nanokompozit numunelerini uyarmak için periyodik bir sinyal üretilip zorlanmış titreşim tekniği kullanılarak sönüm oranları ve doğal frekanslar ölçülüp frekans tepki fonksiyonlarını (FRF'ler) elde etmişlerdir. Deneysel sonuçlar, grafen nanoplateletlerin yüksek içerikli epoksi nanokompozitlerin sönümleme oranı üzerindeki faydalı etkisini doğrulamıştır [3].

Karim ve Zaman (2019), havacılık ve uzay endüstrilerinin gelişimi, ince paneller gibi hafif malzemelerin kullanılmasını gerektirdiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, ince paneller, aşırı gürültüye yol açan önemli titreşim ve ses iletimine katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, epoksi takviyeli doğal liflerin optimum ağırlık fraksiyonundan yapılmış küçük ölçekli bir pasif titreşim emici geliştirmek için bir çalışma yapmışlardır. Takviye şeker kamışı küspesinin yüzde yirmi hacmi, mekanik özellikler açısından test edilen kompozitler arasında iyi bir optimum ağırlık fraksiyonunu verir. % 20 katkı içeren kompozit malzemenin, 972,82 MPa ve 21,29 MPa olan kenaf elyaf takviyeli epoksi kompozitlere kıyasla yüksek genç modülü ve çekme mukavemetine sahip olduğu belirtilmiştir. VCS yazılımı kullanılarak optimum kompozitler üzerinde absorbe edilen enerjiyi belirlemek için geçirgenlik testi yapılmıştır. Sonuç olarak, şeker kamışı küspesi takviyeli epoksinin 1 mm için 21.39 Hz, 1.5 mm için 18.51 Hz, 0.1 g için 24.27 Hz ve 0.15 g için 24.11 Hz olup en yüksek rezonans frekansına ulaştığını göstermektedir. Sönümleme analizi için şeker kamışı küspesi kompozitlerinin sönüm oranını %7,2'ye kadar arttırdığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra, küçük ölçekli bir titreşim sönümleyici geliştirilmiş ve sabit-sabit uçlu kirişlere bağlanmıştır. Sonuçlar, bu noktadaki maksimum titreşim olan 2. noktada meydana gelen kritik noktayı göstermektedir. Dört soğurucu, en düşük genliğin 9 katı frekansa sahiptir ve kirişe daha fazla titreşim soğurucu eklendiğinde titreşim azaltma etkinliğini sağladığını açıklamışlardır [4].

Sumesh (2020), sisal/hindistan cevizi/alümina nanokompozitlerin doğal frekans ve sönüm faktöründe fiber, nano içerik, yüzey işlemi ve sıkıştırma basıncının etkisini ele almışlardır. Çekiç testi için optimize edilmiş proses parametresini bulmak için Taguchi yöntemi ve gri ilişkisel analiz yapılmıştır. Dolgu maddesi olarak neem yaprağından biyosentezlenmiş nanoalümina uygulanmıştır. Gri ilişkisel derece, tüm bu titreşim

prosedürü için optimize edilmiş çalışma koşulu olarak sisal, ağırlıkça %20, %15 hindistan cevizi, alümina nano %2, %5 NaOH işlemi ve 10 MPa sıkıştırma basıncı olduğu sonucuna varılmıştır. Hindistan cevizi lifinden daha küçük sisal çapı (100–200 μm), hibrit kompozitlerin sönümleme doğasında sisali diğer faktörlere göre hayati bir rol haline getirildiği ifade edilmiştir. Daha küçük çap, malzemede iyileştirme yaparak daha geniş arayüz sağladığı belirtilmiştir. Doğal kompozitlerin kırık yüzeyini belirlemek için çekme, eğilme ve darbe testlerinden sonra SEM testi uygulanmıştır [5].

Abdellah vd. (2019), Son yıllarda, kompozit lamine yapılar monoton olanlardan daha rekabetçi malzemeler haline geldiğini belirtmişlerdir. Bu tür kompozitlerin, özellikle hafif olduklarında ve havacılık ve otomobil gibi endüstrilerde ihtiyaç duyulan özellikler olan yüksek özgül dayanımlara sahip olduklarında geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Bu bağlamda, yaptıkları çalışmada iki tip kompozit lamine yapının titreşim davranışı incelemişlerdir. İlk kompozit dokuma cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi laminat, ikincisi ise cam elyafları ve çelik hasır ağ ile güçlendirilmiş epoksi hibrit laminat kullanmışlardır. Bu kompozit laminatları, oda sıcaklığında elle yerleştirme tekniği kullanılarak üretmişlerdir. Titreşim modu şekillerini ve doğal frekanslarını simüle etmek için gelişmiş bir sonlu eleman yöntemi kullanmışlardır. Bu kompozitlerin serbest titreşimlerinin davranışları daha sonra dövme 1100 alüminyum ve kalaylı çeliğinkilerle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar kompozit lamine yapıların diğer monotonik malzemelere göre daha yüksek sönüm oranlarına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak, bu tip kompozitler monotonik malzemelerle aynı serbest titreşim eğilimini takip ettiği belirtilmiştir [6].

Partheeban ve Jeevanantham (2018), birçok uygulamada ve mühendislik yapılarında kullanılabilecek dolgu SiC Epoksi Hibrit polimer kompozit ile güçlendirilmiş karbon/cam elyafın mekanik özelliklerini ve titreşim sönümleme özelliklerini incelemeyi amaçlamışlardır. Özelliklerin bir reçine matrisinde ayırt edici filamentler kullanılarak tek bir malzemede birleştirilmesi, çeşitli ağırlık oranlarına sahip silikon karbür dolgu maddelerinin eklenmesiyle karbon/cam elyaf takviyeli epoksi hibrit kompozit oluşturularak incelenmiştir (%3,%6,%9) . Silisyum karbür dolgu takviyesi kullanılır ve el yatırması ve sıkıştırma kalıplama tekniği kullanılarak üretilmiştir. Lamine numune, çeşitli mekanik özellikleri ve titreşim sönümlemeyi araştırmak için ASTM standartlarına göre test edilmiştir. Karakteristikler, kompozit numune için doğal frekans, sönüm oranı, kayıp faktörü gibi çeşitli titreşim özelliklerini incelemek için

titreşim test cihazı kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, silisyum karbür dolgu takviye içeriğinin ağırlık yüzdesindeki artışla mekanik özelliklerdeki ve sönümleme özelliklerindeki iyileşme olduğu gösterilmiştir[7].

Erkliğ, Bulut, ve Fayzulla (2018), boraks, kanalizasyon çamuru külü, silisyum karbür ve perlit mikropartiküllerinin S-cam/epoksi kompozit malzemelerin çekme, sönümleme ve titreşim özellikleri üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Sönümleme ve titreşim özellikleri, dinamik modal analiz kullanılarak deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarla, bu tür parçacıkların belirli miktarlarının S-cam/epoksi kompozit matrisine eklenmesinin, mekanik özelliklerini gözle görülür şekilde iyileştirildiği gösterilmiştir [8].

Khan vd. (2011), çok duvarlı karbon nanotüpler (CNT'ler) içeren nanokompozitlerin ve karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin (CFRP'ler) titreşim sönümleme özellikleri serbest ve zorlanmış titreşim testleri kullanılarak incelenmiştir. Farklı genliklerde, doğal frekanslarda ve titreşim modlarında sönümleme davranışını karakterize etmek için çeşitli titreşim parametreleri değiştirilmiştir. Hibrit kompozitlerin sönüm oranı, CNT-matris arayüzlerinde kaymaya atfedilen CNT'lerin eklenmesiyle geliştirilmiştir. Sönüm oranı, epoksi matrisindeki CNT'lerin rastgele oryantasyonunun bir sonucu olarak genliğe bağlı olduğu ifade edilmiştir. Doğal frekans, sönümleme özellikleri üzerinde ihmal edilebilir bir etki gösterir. Zorlanmış titreşim testi, hem 1. hem de 2. titreşim modlarında artan CNT içeriği ile CFRP kompozitlerin sönüm oranlarının arttığını gösterilmiştir. CNT-epoksi nanokompozitler de benzer artışta olduğu gösterilmiştir. CNT içeriğine sahip sönüm oranı eğilimleri, esas olarak değiştirilmiş matrisin geliştirilmiş sönümleme özelliğinden kaynaklanan CFRC'lerin gelişmiş sönümleme özelliğini gösterilmiştir. Dinamik mekanik analiz ayrıca CNT'lerin kompozitlerin sönümleme özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu doğrulanmıştır. Nanokompozitlerin hem dinamik kayıp modülü hem de kayıp faktörü ve karşılık gelen CFRP'ler, CNT'lerin eklenmesiyle tutarlı artışlar gösterir, bu da gelişmiş sönümleme performansının bir göstergesi olduğu belirtilmiştir [9].

Piratelli-Filho ve Levy-Neto (2010), mekanik titreşimleri sönümleme kapasitesi, dökme demirden bile üstün olan granit-epoksi kompozitlerin en önemli özelliklerinden biri olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle, bu malzemeler takım tezgahı temellerinin ve hassas aletlerin imalatında benimsenmiştir. Mekanik titreşimlere maruz kalan granit

tozu ve epoksi esaslı parçacıklı kompozit kirişlerin davranışına ilişkin bir çalışma sunmuşlardır. Kompozit numuneler, karışımdaki epoksinin ağırlık oranı ve granit parçacıklarının boyut dağılımları gibi farklı işlem değişkenleri kombinasyonlarıyla hazırlanmıştır. Malzemenin sönüm davranışı logaritmik azalma yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Prizmatik demetler halindeki numuneler orta noktada uyarılmış ve uçta bulunan bir noktada çıkış sinyali ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, ağırlık fraksiyonları yaklaşık %80 granit ve %20 epoksi olan kompozit numunelerin, gri dökme demirden yaklaşık üç kat daha fazla sönümleme özellikleri sergilediğini göstermişlerdir [10].

Keyte, Pancholi ve Njuguna (2019), grafen oksit/epoksi karbon fiber takviyeli kompozitlerdeki son gelişmeler hakkında çalışma yapmışlardır. İki boyutlu makro moleküllü grafen ve türevleri, karbon fiber takviyeli kompozitlerde (CFRC) nano doldurucular olarak uygulanması kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır [11].

Liu, Li, Shen and Chen (2021), Epoksinin tribolojik özelliklerini geliştirmek için, epoksi kompozitleri, farklı oranlarda silisyum karbür (SiC) partikülleri ve molibden disülfür (MoS_2) tozu doldurularak hazırlamışlardır. SiC ve MoS_2 parçacık yüzeyleri, dağılımı iyileştirmek ve epoksi reçine matrisindeki inorganik parçacıkların aglomerasyonunu önlemek için silan bağlantı maddesi KH560 tarafından modifiye etmişlerdir [12].

Su vd. (2021), farklı ağırlık % oranlarında (20:0, 18:2, 15:5, 10:10, 5:15, 2:18 ve 0:0) bor nitrür (BN) partikülleri ve silisyum nitrür (Si_3N_4) içeren hibrit dolgu maddelerinin, bir epoksi kompozitin termal iletkenliği üzerindeki etkisini çalışmışlardır [13].

Gimenez vd. (2022), mxene/epoxy kompozitler için en son gelişmeleri, trendleri ve beklentileri gözden geçirmişlerdir. Bunlar, mxene/epoxy nanokompozitlerin geliştirilmesindeki son gelişmelere ve nano doldurucuların özelliklerin iyileştirilmesine yönelik çalışmalarını sürdürmüşlerdir [14].

Mikropartikül katkılı epoksi kompozitler ile ilgili başlıca çalışmalardan bazıları şunlardır:

Yohanes ve Sekiguchi (2018), karışık silika mikro nanopartiküllerin epoksi yapıştırıcının sıkıştırma dinamik sertliği ve sönümlenmesi üzerindeki sinerjistik etkilerini incelemişlerdir. Epoksi yapıştırıcıların dinamik sertliği ve sönümlemesinin,

titreşimlere ve darbe yüklerine maruz kalan yapıların güvenliğini, güvenilirliğini ve konforunu sağlamak için kritik olduğunu ifade etmişlerdir [15].

D'Mello vd. (2019), granit parçacıklı epoksi matrisli kompozitin sıkıştırma, eğilme dayanımı ve sönümleme davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Mevcut dökme demir konvansiyonel malzemeyi değiştirmek için alternatif bir malzeme üzerinde çalışmalarını sürdürmüşlerdir [16].

Bozkurt vd. (2019), ise nano kil partikülleri içeren fiber takviyeli S-cam/epoksi kompozitlerin eksenel ve yanal burkulma analizini araştırmışlardır [17].

Epoksi kompozitlere farklı katkı maddeleri eklenerek mekanik özelliklerin araştırılması için de çalışmalar yapılmıştır:

Piratelli-Filho ve Shimabukuro (2008), parçacıklı seramik granit ile güçlendirilmiş bir epoksi polimerik matris ile geliştirilen polimer matrisli kompozit (PMC) üzerinde bir işleme çalışması gerçekleştirmişlerdir [18].

Ghosh, Kumar ve Kumar (2015), epoksi-silikon oksit hibrit malzemelerin termal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir [19].

Abdullah ve Ansari (2020), grafen oksit (GO)/epoksi kompozitlerin elektriksel özelliklerinin hazırlanması ve karakterizasyonu üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Araştırmacılar ayrıca kompozitlerin iletkenliği üzerine de çalışmalar yapmışlardır [20].

Kurita vd. (2020), çeşitli CNF hacim fraksiyonlarına sahip mekanik olarak defibrile edilmiş CNF takviyeli epoksi reçine matris (Epoksi-CNF) kompozitleri üretmiş ve selüloz nanofiber bulamaç katkılı epoksi kompozitlerin gerilme özelliklerinin deneysel değerlendirmesini çalışmışlardır [21].

Bhatia vd. (2021), bor karbür takviyeli epoksi kompozitin mekanik ve tribolojik karakterizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır [22].

Diğer çalışmalarda, Bharadwaja vd. (2021), epoksi ve SiO_2 kompozitinin gerilme ve eğilme davranışının araştırılması hakkında deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir [23].

Fouly vd. (2021), mısır koçanı ile güçlendirilmiş epoksilerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin değerlendirilmesi hakkında teorik ve deneysel bir çalışma yapmışlardır [24].

Wang vd. (2022), bir dolgu maddesi olarak kümelenmiş nanoparçacıkların organik-inorganik bir hibridini kullanarak epoksinin geliştirilmiş mekanik ve sönümleme özelliklerini araştırmışlardır [25].

Wei vd. (2023), epoksi/316L metalik kafes kompozitlerin sönümleme ve mekanik özellikleri üzerine çalışmalar yapmıştır [26].

Son zamanlarda epoksi kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda epoksi kompozitlerin titreşim analizi konusuna yer verilmekle birlikte bu çalışmaların sayısı sınırlıdır. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir:

Stanescu vd. (2010), karbon ve kevlar dokusu ile güçlendirilmiş kompozit çubukların titreşimleri için sönümleme faktörünün belirlenmesi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada bir çubuğun titreşimlerini, belirli bir noktada incelemek için bir serbestlik derecesine sahip mekanik bir modelin kullanılabileceğini göstermişlerdir. Söz konusu yapılar, karbon – kevlar doku ile güçlendirilmiş epoksi reçineden yapılmıştır. Diğer ucunda kenetlenmiş çubuğun serbest ucundaki titreşimler, dört farklı uzunluk için deneysel olarak belirlemişlerdir. Her çubuk için ilk titreşim modları, özfrekanslar ve sönümleme faktörü elde edilmiştir [27].

de Borbon vd. (2014), serbest titreşim testleri gerçekleştirerek karbon nanotüpler (CNT'ler) içeren kompozit kirişlerin sönümleme tepkisini araştırmışlardır. Basit ve sandviç kirişler alüminyum, epoksi reçine ve farklı tipte CNT'lerden üretmişlerdir. Karşılaştırma amacıyla, temiz epoksi reçineli sandviç ve basit kirişler de yapılmış ve test edilmiştir. Her durumda CNT'lerin ağırlıkça% 5'i epoksi matrisine dolgu maddesi olarak eklemişlerdir. Sönümleme oranı logaritmik azaltma ve yarı güç bant genişliği yöntemi ile elde etmişlerdir. Kısa en - boy oranlı çok duvarlı işlevselleştirilmemiş nanotüplerin, her iki kiriş türünde sönümleme özelliklerini iyileştirmek için en etkili olduğu bulmuşlardır [28].

Rafiee, Nitzsche ve Labrosse (2018), karbon nanotüplerin işlevselleştirilmesinin epoksi nanokompozitlerin titreşim ve sönümleme özellikleri üzerindeki etkisini teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır [29].

Bulut, Erkliğ ve Kanmaz (2019), farklı ağırlık içerikleri için grafen nanopelletler içeren bazalt/epoksi kompozit laminatların titreşim sönümleme karakterizasyonu üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir [30].

Avil, Kadıoğlu ve Kaynak (2020), işlevselleştirilmemiş çok duvarlı karbon nanotüplerin önce düzgün epoksi reçinenin ve daha sonra tek yönlü ve çift yönlü sürekli karbon fiber takviyeli epoksi matris kompozitlerinin titreşim sönümleme davranışına katkısını araştırmışlardır. Epoksi / karbon nanotüpler, nanokompozitler ultrasonik çözelti karıştırma yöntemi ile üretmişlrdir. Reçine-infüzyon tekniği ile sürekli karbon fiber takviyeli kompozit laminatlar elde etmişlerdir. Örneklerin titreşim analizi verileri yarı güç bant genişliği yöntemi ile değerlendirilmiş; ve örneklerin mekanik özellikleri, taramalı elektron mikroskobu altında morfolojik analizler de dahil olmak üzere üç noktalı bükme eğilme testleri ile belirlemişlerdir. Genel olarak, düzgün epoksi reçinesine sadece % 0.1 ağırlıkça karbon nanotüpler dahil edildiğinde, sadece mekanik özelliklere (eğilme mukavemeti ve modül) değil, aynı zamanda epoksinin titreşim davranışına (sönümleme oranı) da katkıda bulundukları sonucuna varmışlardır [31].

Albooyeh vd. (2020), silika aerojel/epoksi nanokompozitlerin mekanik, titreşimsel ve morfolojik özellikleri üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Düzgün epoksi, silika aerojel nanopartiküllerinin ağırlıkça % 1, 2 ve 4'ü ile ardışık olarak birleştirmişlerdir. Daha sonra numuneler üzerinde çekme, bükülme, basınç, dinamik mekanik termal, sertlik ve Izod etkisi testleri de dahil olmak üzere bir dizi mekanik özellik testi gerçekleştirmişlerdir. Numuneler üzerinde titreşim ve su alım testleri de yapmışlardır. En yüksek modül ve mukavemet değerleri ağırlıkça %4 SA (silika aerojel) ile nanokompozit numunede, en yüksek tokluk ve uzama değerleri ise ağırlıkça %1 SA (silika aerojel) ile numunede tespit etmişlerdir. Ayrıca, SA (silika aerojel) nanopartiküllerinin epoksiye eklenmesi, epoksi matrisinin enerji emilimini ve sertliğini artırdığını tespit etmişlerdir. Dinamik mekanik termal ve titreşim özelliklerinin testlerinden elde edilen bulgular, numunelerdeki nanopartikül içeriğindeki artışla birlikte, depolama modülü ve doğal frekans değerlerinin arttığını ve sönümleme oranlarının değerlerinin azaldığını göstermişlerdir. Titreşim testinden elde edilen doğal frekans değerleri ile Euler-Bernoulli ışın teorisinden elde edilen değerler arasındaki karşılaştırma, teorik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir anlaşma olduğunu gösterilmiştir [32].

Parida ve Jena (2022), yüksek dereceli kayma deformasyonu teorisini kullanarak uçucu kül/grafen dolgulu lamine kompozit levhaların serbest ve zorlanmış titreşim analizini araştırarak, elle yatırma işlemiyle E-cam elyafı ve dolgu maddeleri üretmişlerdir [33].

Sonuç olarak literatür taramaları incelendiğinde epoksi kompozitlere mekanik ve titreşim özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla birçok katkı maddelerinin eklendiği görülmektedir. Bor karbür takviyeli epoksi kompozitler üzerine çalışmalar az olduğundan grafit, silisyum karbür ve bor karbür katkı malzemesi olarak bu çalışmada ele alınmıştır. Bu çalışmada, epoksi reçinesine %5, %10 ve %15 oranında ayrı ayrı grafit, silisyum karbür ve bor karbür mikropartikülleri ayrı ayrı eklenerek belirli boyutlarda epoksi kompozit numuneler üretilmiştir. Bu malzemelerin mekanik özellikleri ve serbest titreşim analizleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, belirli oranlarda (%5, %10, %15) grafit, silisyum karbür ve bor karbür katkılı epoksi kompozitlerin doğal frekans ve sönüm oranı gibi titreşim özellikleriyle birlikte bunların bazı mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır.

2. EPOKSİ KOMPOZİTLER

2.1 Epoksi Reçinenin Tanımı ve Tarihsel Gelişim Süreci

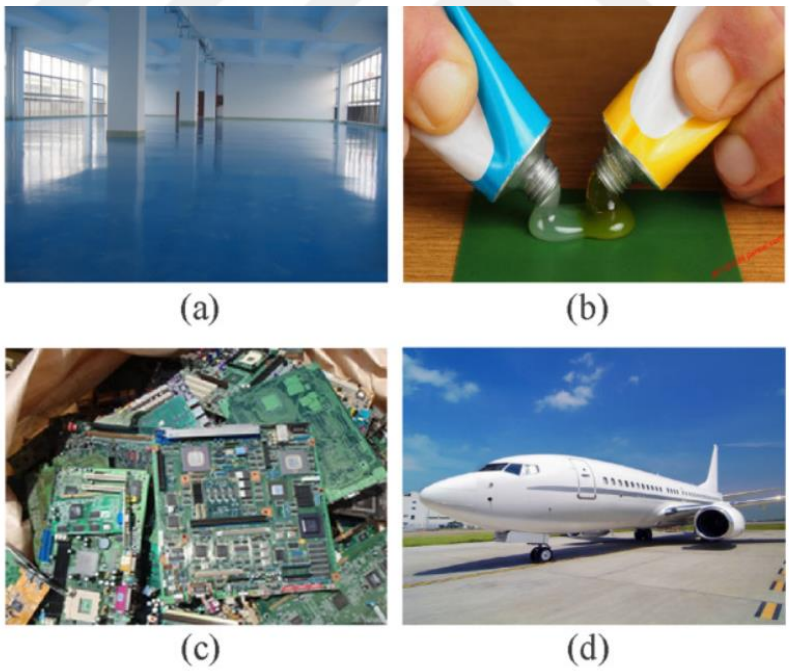
Malzeme bilimlerinde uzun molekül zincirlerine dönüştürülebilen katı veya yüksek akma direncine sahip maddeler olarak tanımlanan epoksi reçineler günlük hayatımızda birçok önemli sektörlerde kullanılır. Ayrıca epoksi reçineler yalnız başlarına kullanılabildiği gibi diğer malzeme türleri ile birlikte kullanıldığında da oldukça üstün özelliklere sahip olduklarından tüm mühendislik alanlarında kullanıma sahiptir.

Epoksi reçinelerin ilk keşfinden günümüze kadar kullanımının tarihsel sürecinden bahsedilecek olunursa:

Avrupa'da epoksit olarak adlandırılan epoksi reçineler 1909'da Rus kimyager Nikolai Alexandrovich Prileschajew tarafından keşfedilmiştir. 2. Dünya Savaşı'ndan önce epoksi reçine bileşenleri yaygın olarak üretilmediğinden yüksek maliyetleri nedeniyle bu ürünlerin ticari önemi ön plana çıkamamıştır. 2. Dünya Savaşı'nın hemen ardından Dr. Sylvan O. Greenlee çeşitli kaplama uygulamalarında kullanmak amacıyla yüksek molekül ağırlıklı epoksi reçine bileşiminin patentini alarak koruyucu yüzey kaplamaları epoksilerin ilk büyük ticari uygulaması olarak kayda geçmiştir (günümüze kadar da aynı eğilim devam etmektedir). 1960'lı yıllarda yüksek sıcaklık uygulamaları için çok fonksiyonelli epoksi reçineler geliştirilip, 1970'lerde ise kaplama uygulamalarındaki gelişmeler epoksilerin pazar payında büyümesini sağlamıştır. 1980'li yıllarda savunma sanayi ve havacılık gibi zorlu uygulama alanlarında kullanımı gerektiren yüksek performanslı epoksi reçineler, özellikle bigisayar ve eloktronik endüstrilerinde kullanılarak gelişime öncülük etmiştir. Olağanüstü özelliklere sahip olduklarından epoksi reçinelere birçok farklı alanda sayısız uygulamaya sahip olmasından ötürü günümüze kadar araştırmacılar aralıksız çalışmalarını sürdürmüşlerdir [34].

2.2 Epoksi Reçinelerin Kullanım Yerleri ve Özellikleri

Yüzey kaplamaları ve boyalar: Epoksi reçineler, kolay işlenebilmeleri, yüksek güvenlikleri, mükemmel çözücü ve kimyasal dirençleri, toklukları, kürlenme sırasında düşük çekmeleri, mekanik ve korozyon dirençleri ve birçok alt tabakaya mükemmel yapışma gibi istisnai özelliklerinden dolayı ağır hizmet tipi korozyon önleyici kaplamalar olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Metal kutular ve kaplar, özellikle domates gibi asitli gıdaları paketlerken paslanmayı önlemek için genellikle epoksi reçinelerle kaplanır. Epoksi reçineler ayrıca terrazzo, yonga ve renkli agregalı döşeme gibi yüksek performanslı ve dekoratif döşeme uygulamalarında da kullanılmaktadır. Şekil 2.1, epoksi reçinelerinin boya ve kaplamalarda (a), yapıştırıcılarda (b), elektronik malzemelerde (c) ve havacılık endüstrisinde (d) kullanılan uygulamalarını göstermektedir [35].



Şekil 2.1 Epoksi reçinelerin uygulama alanları [35].

Yapıştırıcılar: Epoksi yapıştırıcılar, “yapısal yapıştırıcılar” olarak adlandırılan yapıştırıcı sınıfının önemli bir parçasıdır. Bu yüksek performanslı yapıştırıcılar, bisiklet, tekne, uçak, otomobil, golf sopası, kayak ve yüksek mukavemetli bağların gerekli

olduğu diğer uygulamalarda kullanılır. Kriyojenik mühendislik uygulamalarında (yüksek miktarda aşınmayla karşı karşıya kalan malzemelerde aşınma direncini artırmayı sağlayan proses) yapıştırıcı olarak kullanıldığında, hem kriyojenik hem de oda sıcaklığında epoksi kayma mukavemetini optimize etmek gerekir. Ticari epoksi yapıştırıcılar, matrise faz ayrılmış termoplastikler, kauçuk partiküller veya sert inorganik partiküller dahil edilerek optimum dayanıklılık için tasarlanmıştır. Tipik olarak, adezivler, mukavemetlerini arttırmak ve yapıştırıcı arayüzünde kimyasal bağlanmayı etkinleştirmek için yüksek sıcaklıklarda kürlenir.

Endüstriyel alanlar: Epoksi sistemleri, kalıplar, laminatlar, ana modeller, dökümler, demirbaşlar ve diğer endüstriyel üretim yardımcıları üretmek için endüstriyel takım uygulamalarında kullanılır. Bu "plastik aletler" metal, ahşap ve diğer geleneksel malzemelerin yerini alır ve genel olarak, birçok endüstriyel işlem için toplam maliyeti düşürürken veya teslim süresini kısaltırken işlem verimliliğini artırır. Elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin metalik bileşenlerin ve boruların tamirinde etkili olduğu kanıtlanmıştır. Kompozitler ayrıca hidrojen depolama silindirlerinde yük taşıyıcı birimler olarak işlev görür.

Biyomedikal sistemler: Epoksi reçineler biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kollajen bazlı malzemeler, klinik uygulamalarda yara kaplamaları, kalp kapakçıkları, şekil hafızalı polimerik köpüklerde kullanılmaktadır. Ayrıca nanoelmas – epoksi türevleri aşırı derecede sert olmaları, düşük elektriksel iletkenliğe, yüksek ısı iletkenliğine kimyasallarla tepkime vermeye karşı yüksek dirence sahip olmaları nedeniyle biyomedikal alanda geniş kullanım potansiyeline sahiptirler.

Havacılık ve uzay endüstrisi: Epoksi reçineler, düşük maliyetleri ve yüksek yapışma özellikleri nedeniyle havacılık endüstrisinde yapısal yapıştırıcı uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek mukavemetli cam, karbon, Kevlar veya boron lifleri ile güçlendirilmiş epoksi reçineler, havacılık endüstrisinde kullanım için en büyük potansiyele sahiptir.

Elektronik malzemeler: Epoksi reçine formülasyonları elektronik endüstrisinde önemlidir ve motorlarda, jeneratörlerde, transformatörlerde, izolatörlerde, burçlarda ve yalıtkanlarda kullanılır. Epoksi reçineler mükemmel derecede elektriği yalıtırlar ve elektrikli bileşenleri kısa devre, toz ve nem gibi olumsuz etmenlere karşı korurlar. Metal dolgulu polimerler, elektromanyetik parazit koruması için yaygın olarak

kullanılmaktadır. Ayrıca entegre devre cihazlarını mekanik ve fiziksel hasarlara karşı da korurlar. Erimiş silika, cam tozu ve mineral silika gibi partikül dolgu maddeleri içeren epoksi kompozitler, elektrik ve elektronik bileşenlerin kapsülleme ve kaplamasında kullanılmaktadır.

Epoksi reçinelerin özellikleri:

- Düşük maliyet,
- Yüksek mekanik dayanıklılık,
- Yüksek yapışma kabiliyeti,
- Yanmaya karşı dayanıklılık,
- Yüksek kimyasal madde direnci,
- İyi ıslatma kabiliyeti,
- Yüksek nem direnci,
- Korozyon önleyicilik,
- Kürlenme sırasında düşük büzülme oranı,
- Anti manyetik özellik,
- Kolay erişilebilirlik,
- Uçucu olmayan organik bileşikler,
- Boyutsal kararlılık,

gibi birçok özellik sıralanabilir [34- 35].

2.3 Kürleme nedir, nasıl yapılır?

Kürleme, malzeme bilimlerinde polimer zincirlerin birbiriyle çapraz bağlanmasını sağlayan ve böylece malzemenin katı, sert ve tok bir hale gelmesini sağlayan kimyasal işleme denir. Sonuç olarak moleküller arasında üç boyutlu bir ağ yapısı elde edilir [36]. Epoksi kürleme maddeleri, epoksi reçine kürleme reaksiyonunu destekler veya kontrol eder. Epoksi reçine kürü, bir kürleme maddesi eklenerek gerçekleştirilir. Kürlenme sürecinde epoksi reçinesinde geri dönüşü olmayan değişiklikler meydana gelir [35].

2.4 Kürleme Çeşitleri

Oda sıcaklığında kürleme: Oda sıcaklığında kürleme, daha yüksek esneklik, daha yüksek darbe direnci ve daha yüksek elektrik ve termal şok direnci sağlar [37].

Isıl kürleme: Yüksek sıcaklıkta kürleme işlemi genellikle düşük sıcaklıkta ön kürleme aşamasına ve yüksek sıcaklıkta kür sonrası kürleme aşamasına ayrılır. Daha yüksek

sıcaklıklarda kürlenen epoksi reçineler daha yüksek bir geçiş sıcaklığına, daha yüksek gerilme mukavemetine, daha yüksek ısı direncine ve daha yüksek kimyasal dirence sahiptir [38].

Foto kürleme: Epoksi reçineler, bir foto başlatıcı varlığında kızılötesi, ultraviyole ışık veya elektron ışını ışınlaması kullanılarak kürlenebilir. Foto-kürleme, sertleşme süresini saatlerden dakikalara önemli ölçüde azaltır. Ayrıca diğer kürleme işlemlerine göre daha tutarlı ve kontrollü bir süreç sağlar [39-40].

2.5 Epoksi Bazlı Kompozitler

Yüksek düzeyde çapraz bağlı epoksi reçineler, rijit ve kırılgandır ve yapısal malzemeler gibi birçok uygulamada kullanımlarını sınırlayan çatlak başlangıcına ve büyümesine karşı nispeten zayıf bir dirence sahiptir. Çeşitli sertleştirme veya kuvvetlendirme maddeleri kullanılarak fiziksel özelliklerini iyileştirmek için birçok girişimde bulunulmuştur.

Termoplastik katkılı epoksi kompozitler: Epoksi reçinelerin dayanıklılığı, poli(akrilonitril-ko-bütadien-ko-stiren) (ABS), poli(eter sülfonlar) (PES), poli(eter imidler) (PEI) gibi termoplastik bileşenlerin epoksi matrisine polisülfonlar (PSF), poli(eter keton) (PEK) ve poliimidler (PI) dispersiyonuyla geliştirilebilir. Termoplastik modifiye epoksi sistemleri genellikle, başlangıçta epoksi reçine içinde karışabilen ancak polimerizasyon sırasında fazlara ayrılan termoplastik değiştiricinin polimerizasyon kaynaklı faz ayrımı ile hazırlanır. Sistemlerin nihai özellikleri, ortaya çıkan faz-ayrılmış morfoloji ile belirlenir ve toklukta etkili bir gelişme, yalnızca eş-sürekli bir faz veya faz inversiyon yapısı ile elde edilir [35].

Epoksi/ inorganik kompozitler: Kırılma tokluğunu iyileştirmek için epoksi reçinelerine bazı inorganik parçacıklar eklenebilir ve epoksi reçinelere inorganik parçacıkların eklenmesi modülü, sertliği ve kırılma tokluğunu artırır.

Epoksi karbon fiber kompozitler: Yüksek mukavemete ve modüle sahip karbon fiberler, bir dizi matris malzemesine dahil edilebilir. Bir karbon fiber kompozite bir yük uygulandığında, gerilme bir karbon filamandan diğerine matris malzemesi yoluyla aktarılır. Bir fiber-reçine bağı zayıfsa, bu yük transferi, reçine matrisi ve fiber filamanlar arasındaki bağları zayıflatacak veya koparacaktır. Karbon fiberler genellikle, reçine matrisi ile yapışmalarını iyileştirmek için uygulanan polimerik bir solüsyon olan apreleme ile kaplanır. Epoksi/karbon fiber kompozitler, genel olarak yüksek spesifik

sertlik ve dayanıklılık özelliklerinden dolayı yapısal uygulamalar için diğer yüksek performanslı kompozitlerden daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Epoksi kil nanokompozitler: Polimerik nanokompozitlerde katkı malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılan malzemeler arasında kil büyük rol oynar. Kil, tabakalı bir yapıya sahip ve doğada bol miktarda bulunabilmesinden ötürü çok tercih edilir. Ayrıca kolay işlenebilirlik, yüksek iyon değişimi kapasitesi ve yüksek yüzey alanı/ hacim oranı olduğu için de tercih edilmektedir. Nanokompozitle ilgili yapılan çalışmaların sonucunda nanokompozitin elastiklik modülünün artan tanecik içeriği ile arttığı gözlenmiştir [41].

Epoksi karbon nanotüp kompoziter: Karbon nanotüpler (CNT'ler), olağanüstü mekanik, elektronik ve termal özellikler sağlayan, diğer tüm malzemelerden önemli ölçüde daha yüksek uzunluk-çap oranları ile inşa edilir. Bu nedenle, CNT'ler elde edilen kompozitlerin performansını iyileştirmek için faydalı dolgu maddeleri olacaktır. Bununla birlikte, CNT'lerin epoksi matrisler içindeki düşük dağılabilirliği ve zayıf arayüzey etkileşimleri, bu alandaki uygulamalarını sınırlamıştır. Ultrasonik dağıtma ve yüksek kesmeli karıştırma, yaygın olarak kullanılan mekanik yöntemlerin örnekleridir. Fiziksel yöntemler, polimerlerin veya yüzey aktif maddelerin CNT yüzeylerine adsorpsiyonunu ve/veya sarılmasını içerir ve kimyasal yöntemler, polimer zincirlerinin CNT yüzeylerine kovalent kimyasal bağlanmasından oluşur ve bunlar ile epoksi matrisi arasındaki arayüzey etkileşimlerini önemli ölçüde geliştirir. Epoksi reçineleri ile uygun kimyasal etkileşimlere sahip hizalanmış CNT'lerin homojen bir dağılımı, verimli yük aktarımı sağlayabilir ve elektronlar ve fotonlar için iletken bir yol sağlayabilir. Epoksi/CNT kompozitleri benzersiz mekanik, termal ve elektriksel davranışlar sergiler.

Parçacıklı kompozitler: Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunmasıyla elde edilen izotrop yapılardır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklarıdır, ayrıca metal parçacıklar elektriksel ve ısıl iletkenlik sağlar. Parçacıklı kompozitlerde yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. Metal matris içinde seramik parçalar içeren yapıların ise sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımı özelliğine sahiptir. Bu özelliklerden dolayı uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilir [42].

2.6 Kompozit İmalat Yöntemleri

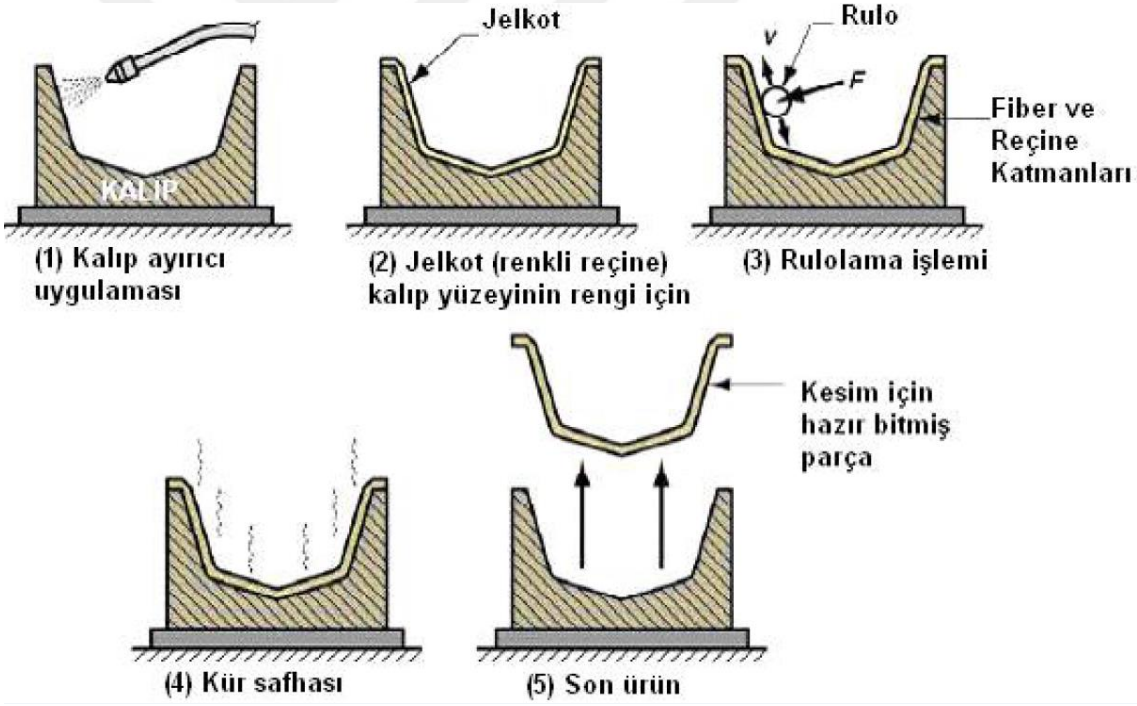
Kompozit imalat yöntemleri iki ana gruba ayrılır.

1. Açık kalıplama yöntemleri (temas yüzeyli kalıplama): Açık kalıplama yönteminde üretim boyunca laminalar ve jelkot hava ile temas halindedir.

2. Kapalı kalıplama yöntemleri: Kapalı kalıplama yönteminde ise üretim vakum torbasıyla ya da çift taraflı kalıplarla gerçekleştirilir.

Açık kalıplama yöntemi

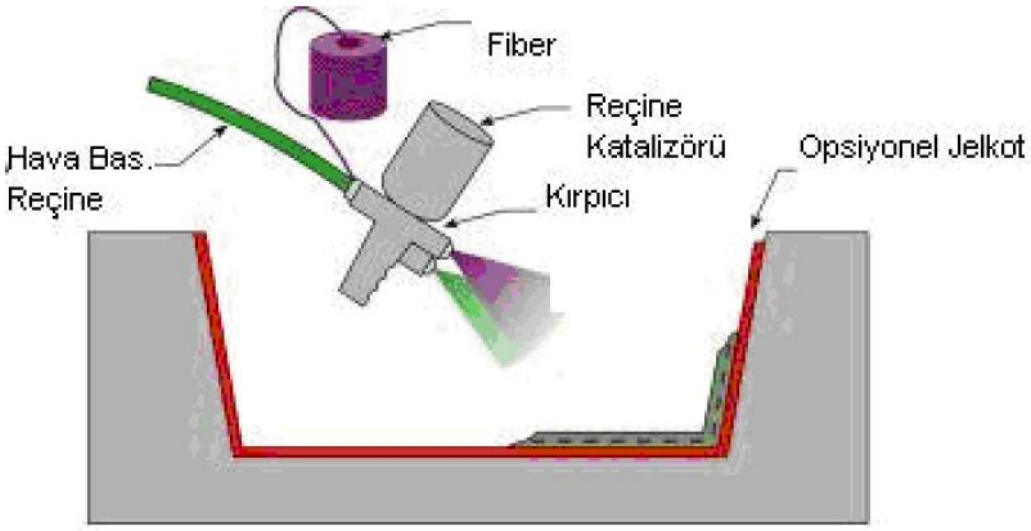
- El yatırması yöntemi: Endüstride sürekli gelişime açık olan, üzerinde çalışılan uygulama alanı çok geniş olan üretim yöntemlerinden biridir. Bu yöntem özellikle yüksek mukavemet gerektiren büyük parçaların ve tek yüzü düzgün istenen parçaların üretimi için uygundur.



Şekil 2.2 El yatırması prosesi adımları.

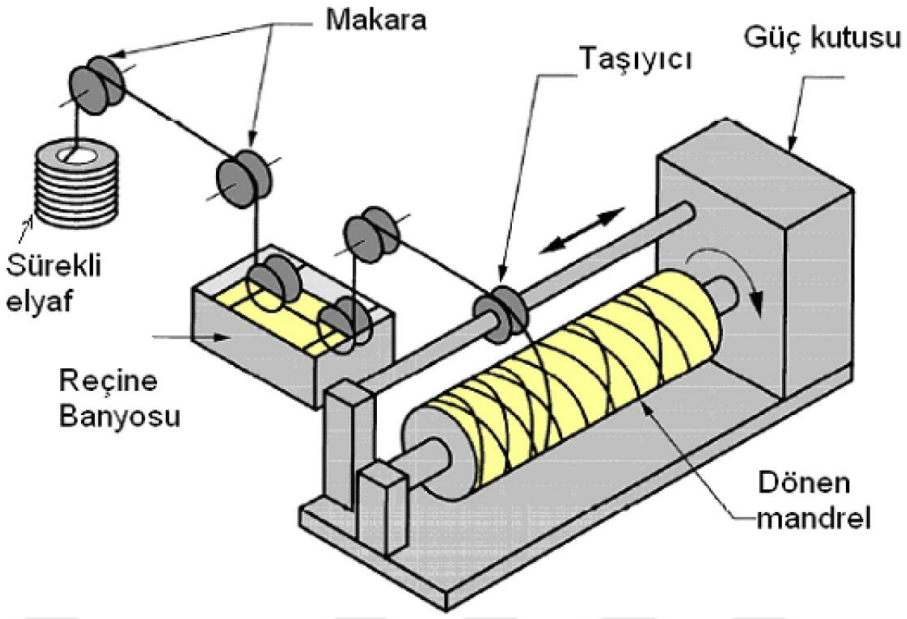
- Püskürtme yöntemi: Püskürtme yöntemi elle yatırma yönteminin aletli biçimi olarak kabul edilebilir. Kırpılmış elyaflar kalıp yüzeyine içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür ve elyafın kırpılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde

yapılır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur.



Şekil 2.3 Püskürtme yöntemi.

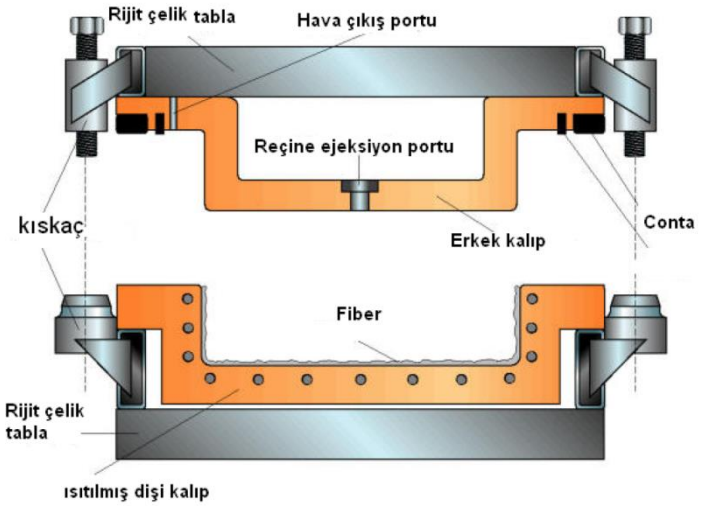
- Elyaf sarma yöntemi: Bu yöntemle özel ürünlerin üretimi yapılır. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıyla gerçekleşir ve sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir, ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle araba şaftları, uçak su tankları, silindirik borular, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır [43-44].



Şekil 2.4 Elyaf sarım prosesi düzeneği [43].

Kapalı kalıplama yöntemi

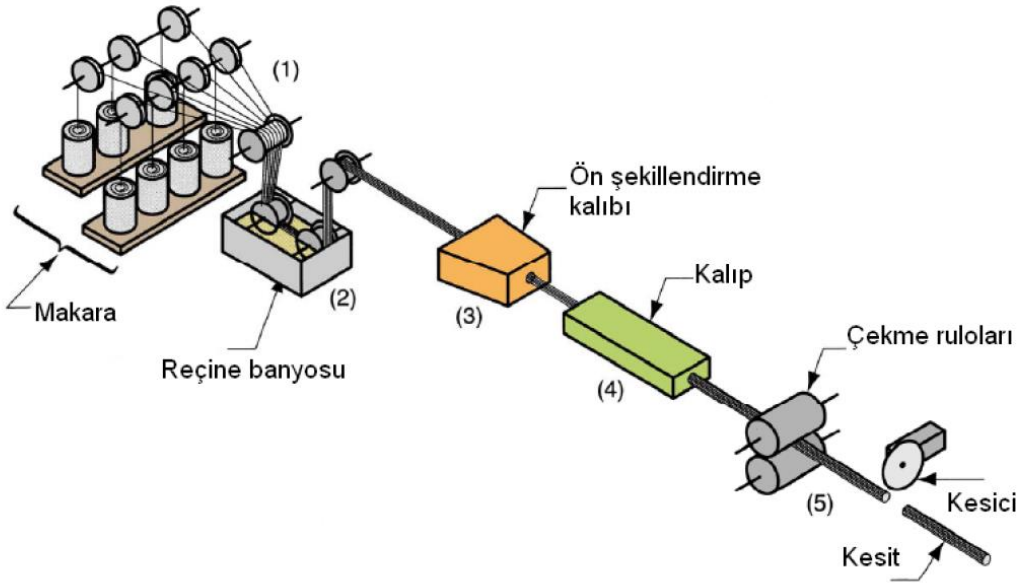
- Reçine transfer yöntemi: Sıvı kalıplama yöntemi olarak da adlandırılan bu yöntem önceden şekillendirilmiş veya kesilmiş takviye malzemelerinin erkek ve dişi kalıp arasına alınarak kapatıldığı bir kapalı kalıplama yöntemidir.



Şekil 2.5 Reçine transfer yöntemi [44].

- Profil çekme (pultruzyon) yöntemi: Pull ve Extrusion kelimelerinden türetilmiş sürekli boru, profil vb. kompozit ürünlerin üretimini sağlayan bir yöntemdir.

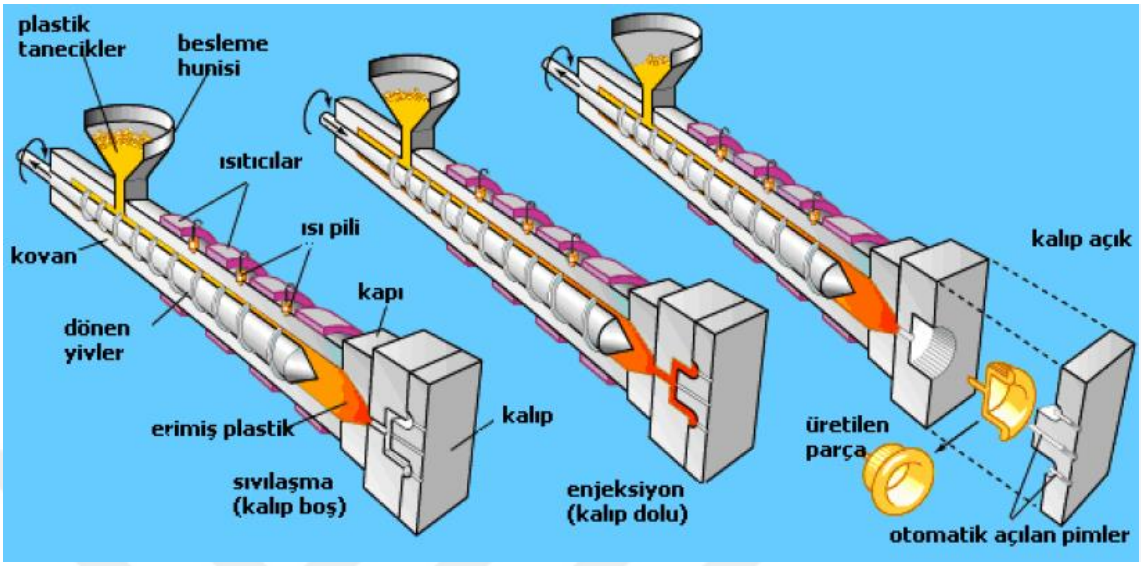
Reçine banyosunda emdirilmiş elyaf fitillerinin ya da kumaşların sıcak kalıplardan geçirilerek şekillendirilmesi ve sertleşmesini takiben makine hattı boyunca çekilmesi ve belirli boyutlarda kesilmesi esasına dayanır [44].



Şekil 2.6 Profil çekme yöntemi düzeneği [43].

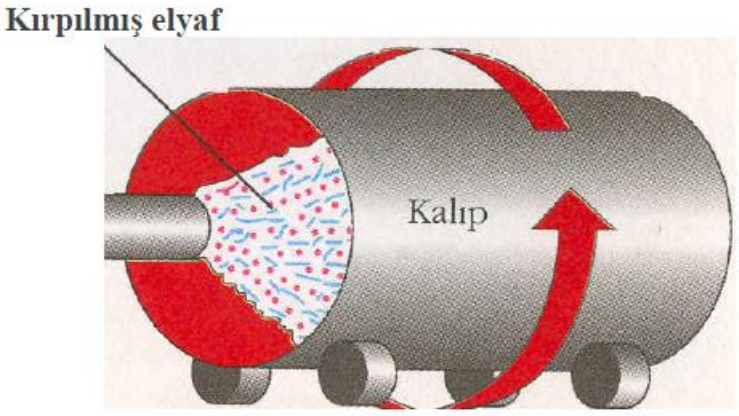
- Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama prosesi (SRIM): Reçine transfer yöntemiyle benzer olup kullanılan reçine ve enjeksiyon karıştırma yöntemi farklıdır. İki reçine bir kamarada yüksek hızda karıştırılarak kalıp içine basılır. Bu üretim yöntemi düşük maliyet ve yüksek hacim gerektiren uygulama alanlarında kullanılır.
- Baskı kalıplama yöntemi: Yüksek üretim kapasitesi gerektiren yerlerde kullanılır ve bu yöntemde dişi ve erkek kalıp kullanılır. Önceden hazırlanmış olan baskı kalıplama maddeleri ısıtılmış kalıp arasına yerleştirilerek, belirli bir basınçta kalıp kapatılarak dolgu malzemesine istenilen şekil verilmiş olur.
- Enjeksiyon kalıplama: Yüksek boyutsal stabiliteli ve karmaşık şekilli ürünlerin kalıplanmasında yaygın olarak kullanılan bir üretim yöntemidir. Yüksek hacimli üretimler için uygundur. Bazı durumlarda, üretim hızı makina başına saatte binlerce adet parçaya çıkabilir. Bu yöntemde elde edilen ürünlerin çoğu takviyesiz termoplastiklerdir. Takviyeli termoplastiklerin kalıplanması için, ekipman ve kalıplama tekniğinde çok küçük değişiklikler yapılması yeterli olmakta hatta bazen hiçbir değişikliğe gerek duyulmamaktadır. Yöntemin temel

prensibi, termoplastiklerin ısıtıldığında yumuşamasına ve soğutulduğunda sertleşmesine dayalıdır [43, 45].



Şekil 2.7 Enjeksiyon kalıplama basamakları [43].

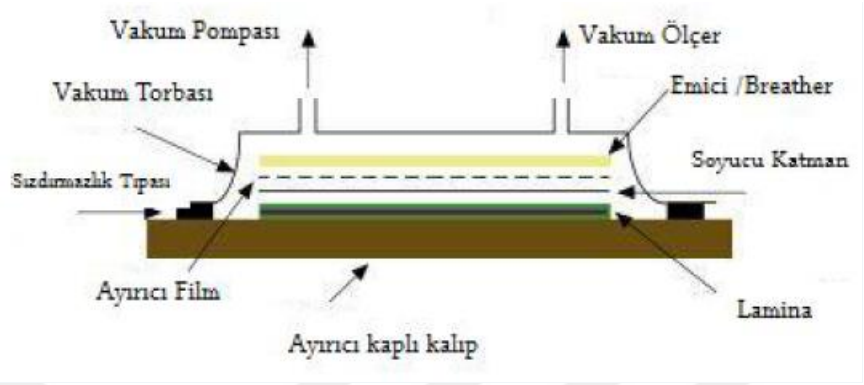
- Savurma döküm santrifüj kalıplama: Depo, boru, direk, tank gibi silindirik yapıların üretiminde kullanılır. İçi boş mandrel (kalıp) içerisine kırpılmış matlar reçineyle birlikte püskürtülür. Yüksek bir çevresel hızla dönen kalıbın oluşturduğu merkezkaç kuvveti, reçine ile temas eden takviye malzemelerin ıslanmasını ve laminatın kalıp yüzeyine yapışmasını sağlamaktadır [45].



Şekil 2.8 Santrifüj kalıplama yöntemi [43].

- Vakum torbası/otoklav prosesi: Vakum torbalama yöntemi ile kompozit imalatında açık kalıp üzerine elle yerleştirme veya püskürtme ile üretilen lamine

bileşen, polimerik bir levha ile kaplanır. El yatırması yöntemiyle benzer yanları vardır. Özel uygulama alanlarında bu yöntem kullanılır. El yatırmasından farkı basınç uygulanmasıdır [44].



Şekil 2.9 Vakum torba kalıplama [43].

3. TİTREŞİM

Titreşim, makine parçalarından büyük yapılara kadar mekanik sistemlerin tekrarlayan hareketiyle ilgilenen mühendislik dalıdır. Titreşim, aynı zamanda nesnelerin durağan referans çerçevesine veya nominal konuma (genellikle denge konumu) göre tekrarlayan hareketinin incelenmesidir. Titreşim her yerde belirgindir ve birçok durumda mühendislik tasarımlarının doğasını büyük ölçüde etkiler. Çoğu kişinin aşina olduğu tipik titreşim örnekleri, bir otomobilin veya motosikletin sürüş kalitesini, bir uçağın kanatlarının hareketini, gitar telinin hareketini ve büyük bir binanın rüzgâr veya deprem nedeniyle sallanmasını içerir [46].

Titreşim çoğu zaman istenmeyen ve önüne geçilmeye çalışılan bir hareket türüdür. Çünkü titreşim makine parçalarının gevşemesine, makinenin görevini düzgün olarak yapamamasına, gürültüye sebep olabilmekte ve yorulma sonucu makinenin tamamen bozulmasına da neden olabilmektedir. Bazen de titreşim yararlı ve arzu edilebilir olabilir. Titreşimli makineler, titreşim test cihazları, titreşimli elekler vb. titreşimin kontrollü olarak üretilmesiyle çalışırlar.

Günümüzde modern teknoloji ince yapılı ve yüksek hızlı sistemlere doğru yönelmektedir. Oysa bu iki durumda titreşimlerin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu nedenle titreşim teorisine hakim olunması kaçınılmaz bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

3.1 Temel Kavramlar

Periyodik hareket: Sürekli kendini tekrarlayan harekete denir.

Periyot: Periyodik bir hareketin bir çevrimi için gereken süreye denir. ‘‘T’’ ile gösterilir.

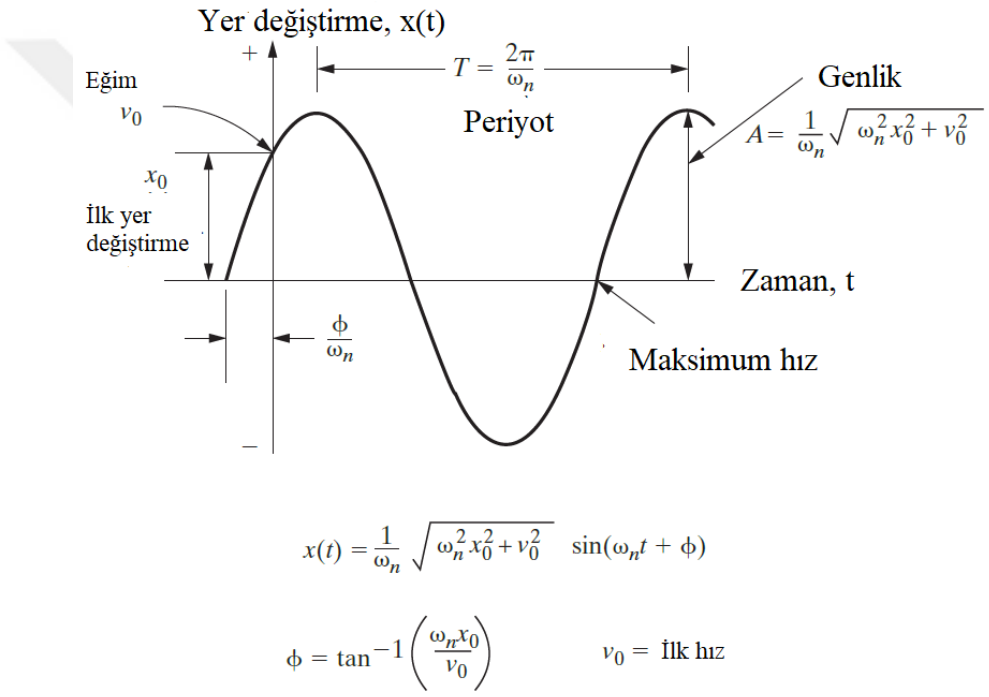
Frekans: Saniyedeki titreşim sayısı olarak tanımlanır. ‘‘f’’ ile gösterilir. Döngü başına saniye sayısı ve frekans, saniyedeki döngü sayısı olduğundan, birbirlerinin tersidirler ve $f = 1/T$ olarak formülü ile ifade edilir.

Doğal frekans: Herhangi bir itici güç veya sönümleme olmadığında sistemin salınım yapma eğiliminde olduğu frekans olarak tanımlanır. ‘‘ω_n’’ ile gösterilir.

Açısal frekans: Periyodik harekette 2π saniyedeki titreşimlerin sayısıdır ve ‘‘ω’’ ile gösterilir. $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ formülü ile ifade edilir.

Genlik: Genellikle merkezden bir tarafa doğru ölçülen titreşim miktarına denir. ‘‘A’’ harfiyle gösterilir.

Basit harmonik hareket: Sistemin konumunu gösteren x koordinatının $x(t) = Xsin(\omega_n t + \phi)$ ya da $x(t) = Xcos(\omega_n t + \phi)$ şeklinde zamanın harmonik bir fonksiyonu olarak değiştiği periyodik titreşim hareketidir. Şekil 3.1. basit bir harmonik harekete ait x(t) yer değiştirme grafiğini göstermektedir.



Şekil 3.1 Basit harmonik hareket.

Rezonans: Titreşimli bir sistemin zorlayıcı kuvvetin frekansının kendi doğal titreşim frekansına yakın olan bir frekansta yüksek genlikler ile zorlanmasıdır.

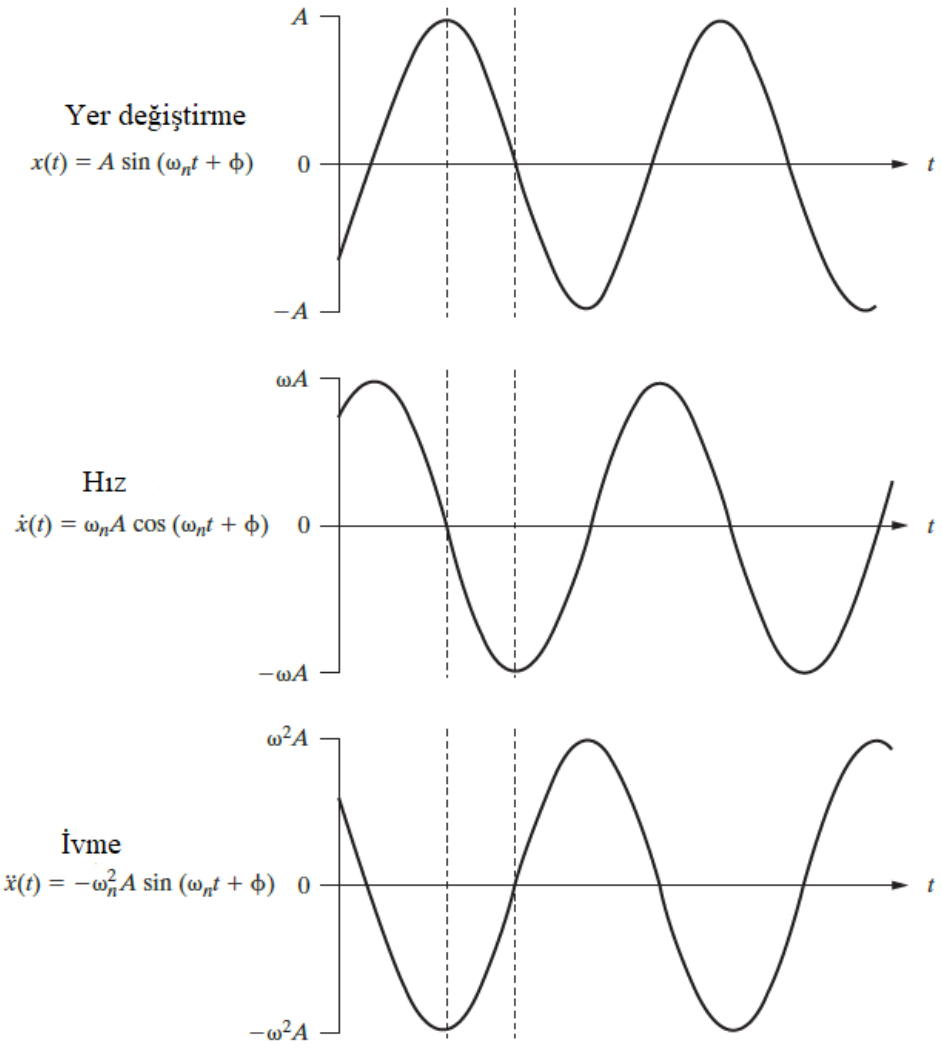
Sönümleme: Bir titreşim enerjisinin ısı enerjisine dağılması veya enerji kaybına neden olmasıdır.

Faz: Sinüs fonksiyonunun başlangıç değerini belirler. ‘‘ϕ’’ ile gösterilir.

Yer değişimi: Bir cismin yaptığı hareketin büyüklüğüne denir. ‘‘x’’ ile gösterilir. Birimi m’dir. En basit durumda yer değişimi basit harmonik hareket olarak düşünülebilir. Böyle bir durumda meydana gelen sinüzoidal hareketin hesaplanması şu formülle gösterilir: $x = Asinwt$.

Hız: Yer değişiminde meydana gelen değişikliğin birim zamandaki sıklığıdır. ‘‘v’’ ile gösterilir. Birimi m/sn’dir. Sinüzoidal bir hareket için hız eşitliği şu şekilde ifade edilir: $v = wAcoswt$.

İvme: Hız değişiminin birim zamandaki sıklığıdır. ‘‘a’’ile gösterilir. Birimi m/s^2’dir. Bu açıdan sinüzoidal bir hareket için hız eşitliği şu şekilde ifade edilir: $a = -w^2Asinwt$.
Şekil 3.2 $x(t) = Xsin(\omega_n t + \phi)$ şeklindeki basit harmonik harekete ait konum, hız ve ivmenin zamana göre değişimlerini grafiksel olarak açıklamaktadır.



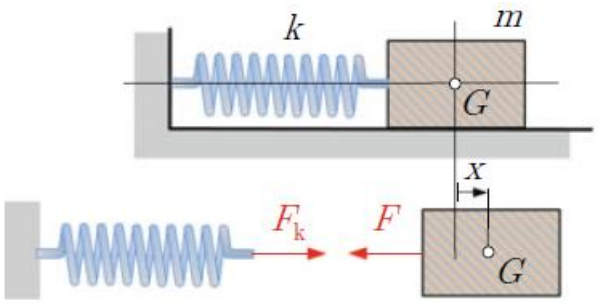
Şekil 3.2 Basit harmonik harekette yer değiştirme, hız ve ivmenin zamanla değişimi.

3.2 Titreşimin Sınıflandırılması

Mekanik bir sistemin titreşimi oluşma sebebine göre iki şekilde sınıflandırılır. Bunlar serbest titreşim veya zorlanmış titreşimdir. Dış dinamik kuvvetlerin etkisi olmadan meydana gelen titreşim hareketlerine serbest titreşimler, dinamik dış kuvvetlerden kaynaklananlara ise zorlanmış titreşimler denir.

Titreşimler esas olarak sönümsüz serbest titreşimler, sönümlü serbest titreşimler ve zorlanmış titreşimler olmak üzere üçe ayrılır.

3.2.1 Sönümsüz serbest titreşim:



Şekil 3.3 Yay karakteristikli yay kütle sistemi [47].

Şekil 3.3, adına uygun olarak bir yay ve bir kütleden (parçacık) oluşan bir yay-kütle sistemini göstermektedir. Kütle merkezi G ile yatay yer değiştirme ise x ile gösterilir. Eğer x=0 ise sistem hareketsizdir, yani yayda kuvvet yoktur. (x>0)[x<0] olduğu zaman yayda uzama veya kısalma olduğu anlaşılmaktadır.

$F_k = kx.$ [3.1]

Denklem [3.1]'de yay karakteristiğinin lineer olduğunu gösteren formül verilmiştir. Burada F_k yay karakteristiği, k [N/m] yay sabitidir.

Şekil 3.3'te parçacığı denge konumundan uzaklaştırırsak o zaman F = -F_k geri getirme kuvvetinin etkisi altında hareket eder. Buradaki amaç hareket yasasını (fonksiyonu) x(t) bulmaktır. Newton'un ikinci yasasını kullanarak hareket denklemini elde ederiz:

$$ma = m\ddot{x} = F = -kx.$$

Bu denklem, ikinci dereceden bir homojen adi diferansiyel denklemdir:

$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0, \quad \omega_n^2 = \frac{k}{m}.$ [3.2]

Burada ω_n [1/s] doğal dairesel (veya açısal) frekanstır. [3.2] diferansiyel denklemin genel çözümü şu şekli alır:

$$x = Acos\omega_n t + Bsin\omega_n t \quad [3.3]$$

Burada A ve B belirlenmemiş entegrasyon sabitleridir. x_0 ve v_0, m parçacığının ilk yer değiştirmesi ve hızı olsun. Belirsiz entegrasyon sabitleri A ve B başlangıç koşullarından belirlenebilir:

A=x_0 ve B=v_0/ω_n entegrasyon sabitleri ile genlik ve faz açısının olduğu formül şu şekildedir:

$$x = x_0 cos\omega_n t + \frac{v_0}{\omega_n} sin\omega_n t = Dsin(\omega_n t + \phi) \quad [3.4]$$

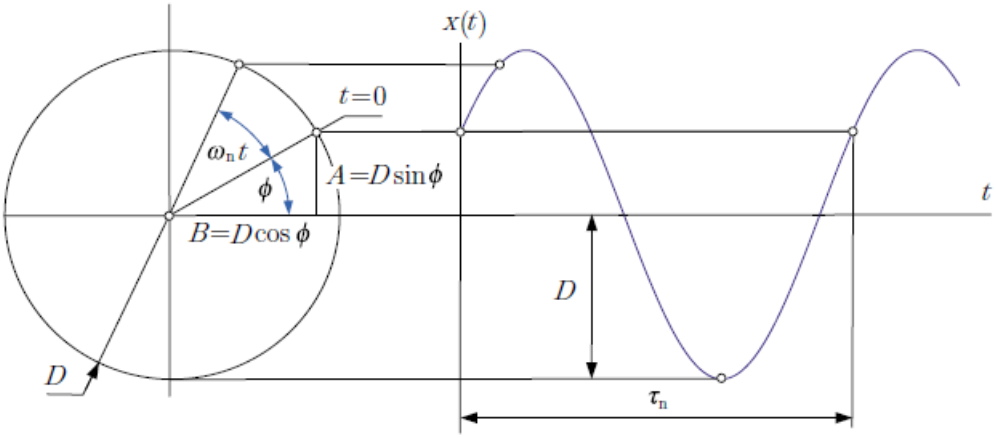
$$D = \sqrt{{x_0}^2 + (\frac{v_0}{\omega_n})^2}\,,\ \phi = \arctan\frac{\omega_n x_0}{v_0} \quad [3.5]$$

$$\tau_n = \tau = 2\pi/\omega_n \quad [3.6]$$

Denklem [3.6] birimi genel olarak 1/s olan yay-kütle sisteminin periyodunu verir. Karşılığı f_n ile gösterilir ve doğal frekans olarak adlandırılır:

$$f_n = \frac{1}{\tau_n} = \omega_n/2\pi. \quad [3.7]$$

Şekil 3.4 yer değiştirme zaman eğrisini göstermektedir.



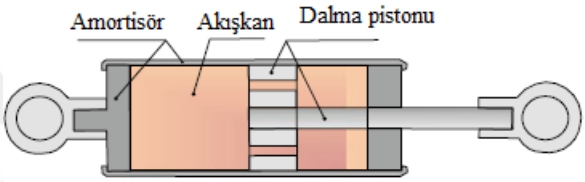
Şekil 3.4 Yer değiştirme-zaman eğrisi.

3.2.2 Sönümlü serbest titreşim

Sönümleme, salınımları azaltma, kısıtlama veya önleme amacıyla yapılmış bir etkiyi kapsar. Sönümleme, genel olarak şunlardan kaynaklanır: Kuru sürtünme veya sıvı sürtünmesi gibi çeşitli sürtünme kuvvetleri - katı bir cisim bir sıvı içinde hareket ederse, üzerine uygulanan kuvvetler hareket hızını azaltır. Sönümlemenin her zaman enerji dağılımıyla ilişkili olduğunu belirtmekte fayda vardır. Parçacığın hızı belirli ve çok yüksek olmayan bir sınırın altında ise, cisme uygulanan sönümleme kuvveti hız ile doğru orantılı ve zıt yönlüdür. Daha sonra sönümleme kuvveti F_c şu şekilde verilebilir:

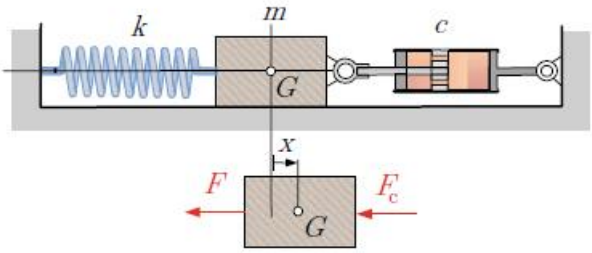
$$F_c = -c\dot{x} \qquad [3.8]$$

burada c [Ns/m] sönümleme katsayısı olarak adlandırılır.



Şekil 3.5 Viskoz sönümleme.

Şekil 3.5 Bir titreşim sönümleyicinin ve ana parçalarının taslağını göstermektedir.



Şekil 3.6 Sönümlü serbest yay-kütle sistemi.

Şekil 3.6 Eğer $\dot{x} > 0$ ve $F_c < 0$ ise bu bir serbestlik derecesine sahip sönümsüz bir sistemdir. Hareket denklemi ise şu şekildedir:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \qquad [3.9]$$

bu denklem yeniden şu şekilde yazılabilir:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_n^2 x = 0,\ 2\beta = \frac{c}{m},\ \omega_n^2 = \frac{k}{m}. \qquad [3.10]$$

$x = e^{\lambda t}$'nin diferansiyel denklemin [3.10] çözümü olduğunu varsayalım. Burada λ karakteristik değerdir. Böylece [3.10] karakteristik denklemi elde edilir.

$$\lambda^2 + 2\beta\lambda + \omega_n^2 = 0 \quad [3.11]$$

bu denklemde,

$$\lambda_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_n^2} = -\beta \pm \mu\,, \quad \mu = \sqrt{\beta^2 - \omega_n^2}. \quad [3.12]$$

Bu denklemde iki kökün farklı olduğunu varsayılsın. Daha sonra,

$$x = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} = Ae^{-(\beta-\mu)t} + Be^{-(\beta+\mu)t} \quad [3.13]$$

genel çözümü elde edilir. Sistemin davranışı sönüm miktarına bağlıdır. Belirsiz entegrasyon sabitleri A ve B, başlangıç koşulları kullanılarak belirlenebilir. Çift kökler varsa, yani μ = 0 ise kritik sönümlemeden bahsedilir. O zaman artık kritik sönümleme katsayısı olarak adlandırılan sönümleme katsayısı keyfi olamaz ve bu sönümleme katsayısı c_n ile gösterilir. μ = 0 ise denklem [3.10] denklemini kullanılarak hesaplanabilir:

$$\beta^2 = \omega_n^2 \rightarrow \left(\frac{c_n}{2m}\right)^2 = \frac{k}{m} \quad [3.14]$$

$$c_n = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega_n. \quad [3.15]$$

Karekök altındaki $\beta^2 - \omega_n^2$ ifadesinin hangi işarete sahip olduğuna bağlı olarak, çözüm üç aşamada incelenir.

a) <u>Aşırı sönüm:</u>

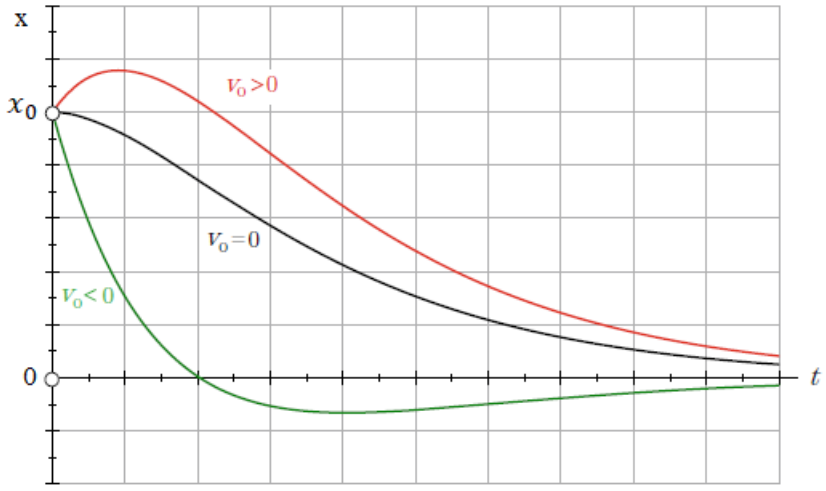
Bu durumda $\beta > \omega_n$ olup iki gerçel kök vardır. $\lambda_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_n^2} = -\beta \pm \mu$, $\mu = \sqrt{\beta^2 - \omega_n^2}$ tanımları ile

$$x(t) = Ae^{-(\beta-\mu)t} + Be^{-(\beta+\mu)t} = e^{-\beta t}(Ae^{\mu t} + Be^{-\mu t})$$
$$= e^{-\beta t}(A\cosh\mu t + B\sinh\mu t) \quad [3.16]$$

çözümünde t=0 anındaki ilk konum x_0 ve ilk hız v_0 değerlendirildiğinde

$$x(t) = e^{-\beta t}\left(x_0\cosh\mu t + \frac{v_0 + \beta x_0}{\mu}\sinh\mu t\right) \quad [3.17]$$

şeklinde çözüm elde edilir. Şekil 3.7 Denklem [3.17] ile verilmiş olan yer değiştirmenin ilk şartlara bağlı olarak zamana göre konumunu göstermektedir.



Şekil 3.7 Aşırı sönümde yer değiştirme grafiği.

Şekil 3.7'den aşırı sönümlü olan bu hareketin bir titreşim hareketi olmayan bir salınım hareketi olduğu anlaşılmaktadır [47].

b) Kritik sönüm:

Burada $\beta = \omega_n$, $c = c_n$ ise çift kökler olup çözüm şu formu alır:

$$x = (A + Bt)e^{-\beta t} = [x_0 + (\beta x_0 + v_0)t]e^{-\beta t} \quad [3.18]$$

Bu çözüm aynı zamanda titreşimsizdir. Grafik gösterimi, Şekil 3.7.'de gösterilenle aşağı yukarı aynıdır. $c = c_n$ koşulu titreşimli ve titreşimsiz çözümleri ayırdığından, sönüm kritik olarak adlandırılır.

c) Zayıf sönüm:

Eğer $\beta < \omega_n$,$c = c_n$ ise hafif sönümlemedir. λ için çözümler karmaşık ve eşleniktir:

$$\lambda_{1,2} = -\beta \pm i\sqrt{\omega_n^2 - \beta^2} = -\beta \pm i\omega_d \quad [3.19]$$

$$\omega_d^2 = \omega_n^2 - \beta^2 = \frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2 = \frac{k}{m}\left(1 - \frac{c}{c_n^2}\right) = \omega_n^2(1 - \frac{c^2}{c_n^2}) \quad [3.20]$$

buradan,

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \frac{c^2}{c_n^2}} = \omega_n\sqrt{1 - \xi^2} \quad [3.21]$$

formülü ile ifade edilir.

Burada ω_d, sönümlenmiş titreşimlerin doğal dairesel frekansıdır (özfrekans) ve

$$\xi = \frac{c}{c_n} \qquad [3.22]$$

sönümleme faktörüdür. x için gerçek çözüm şu şekildedir:

$$x = e^{-\beta t}(A cos\omega_d t + B sin\omega_d t) = e^{-\beta t}(x_0 cos\omega_d t + \frac{v_0 + \beta x_0}{\omega_d} sin\omega_d t) \qquad [3.23]$$

veya

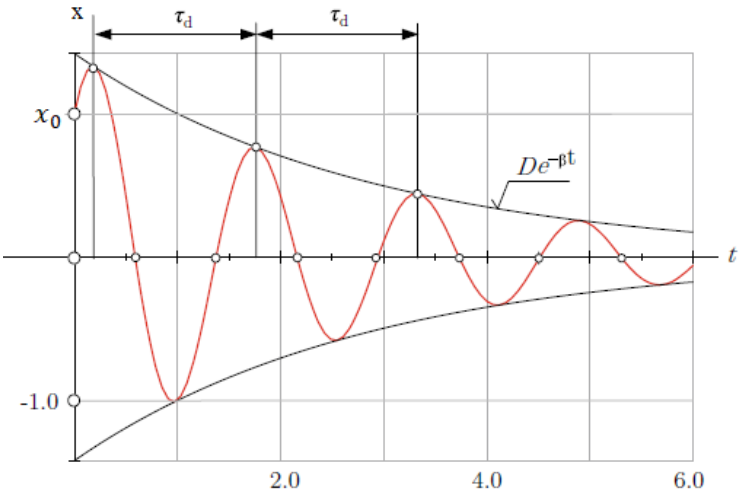
$$x = e^{-\beta t}\left(x_0 cos\omega_d t + \frac{v_0+\beta x_0}{\omega_d} sin\omega_d t\right) = e^{-\beta t} D\ cos(\omega_d t - \phi)\ , \qquad [3.24]$$

$$D = x_0\sqrt{1 + (\frac{v_0+\beta x_0}{\omega_d})^2}\ \ \widehat{D} = \sqrt{1 + (\frac{v_0+\beta x_0}{\omega_d})^2}\ \text{ve}\ \ \phi = \arctan\frac{v_0+\beta x_0}{\omega_d x_0}. \qquad [3.25]$$

Denklem [3.24], azalan genliğe ve zaman aralığına sahip bir titreşim hareketini tanımlar.

$$\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n}\frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} = \tau_n \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} > \tau_n \qquad [3.26]$$

denklemin sınırlayıcı eğrilerden birine temas ettiği iki ardışık noktayı ayıran zaman aralığı olup Şekil 3.8'de gösterilmiştir. τ_d, sönümlü titreşim periyodu olarak bilinir.



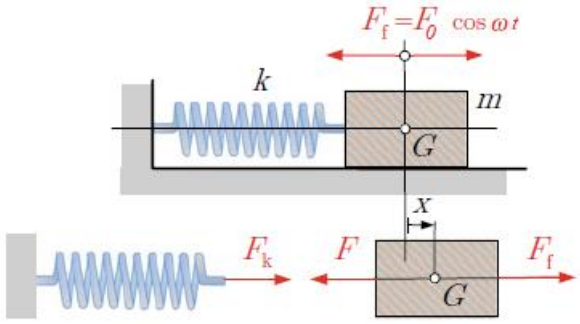
Şekil 3.8 Zayıf sönümde yer değiştirme grafiği [47].

Logaritmik azalma λ aşağıdaki denklem [3.27] ile tanımlıdır. λ, τ_d ve m ile sönüm katsayısı hesaplanabilir.

$$\lambda = ln\frac{x(t)}{x(t+\tau_d)} = lne^{\frac{c}{2m}\tau_d} = \frac{c}{2m}\tau_d \qquad [3.27]$$

3.2.3 Sönümsüz Zorlanmış Titreşimler

Bu titreşimlere genellikle sistem üzerine uygulanan periyodik bir kuvvet (uyarma kuvveti) neden olur. Zorlanma kuvvetinin genellikle harmonik olduğu varsayılır. Şekil 3.9'da gösterilen yay-kütle sistemini ele alınırsa sistem, $F(t) = F_0 cos\omega t$ harmonik bir dış kuvvete tabidir; burada F_0, zorlama kuvvetinin genliğidir, ω ise kuvvet frekansı olarak adlandırılır.



Şekil 3.9 Yay - kütle sisteminin harmonik kuvvetle tahrik edilmesi.

Şekil 3.9'daki sistem için Newton'un ikinci yasası kullanılarak hareket denklemi şu şekilde elde edilir:

$$m\ddot{x} = -F + F_f = -kx + F_0 cos\omega t \quad [3.28]$$

veya

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = \frac{F_0}{m} cos\omega t \; , \; \omega_n^2 = \frac{k}{m} \, , \quad [3.29]$$

bu hareket denklemi sabit katsayılı homojen olmayan bir diferansiyel denklemdir. Genel çözümü şu şekilde ifade edilebilir:

$$x = x_{hom}(t) + x_{part}(t) \quad [3.30]$$

$$x_{hom}(t) = Acos\omega_n t + Bsin\omega_n t \quad [3.31]$$

homojen diferansiyel denklemin çözümü,

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad [3.32]$$

ve partiküler (özel) çözüm

$$x_{part} = xcos\omega t = \frac{x_0}{|1 - \eta^2|} cos\omega t \quad [3.33]$$

şeklindedir. Burada η frekanslar oranı

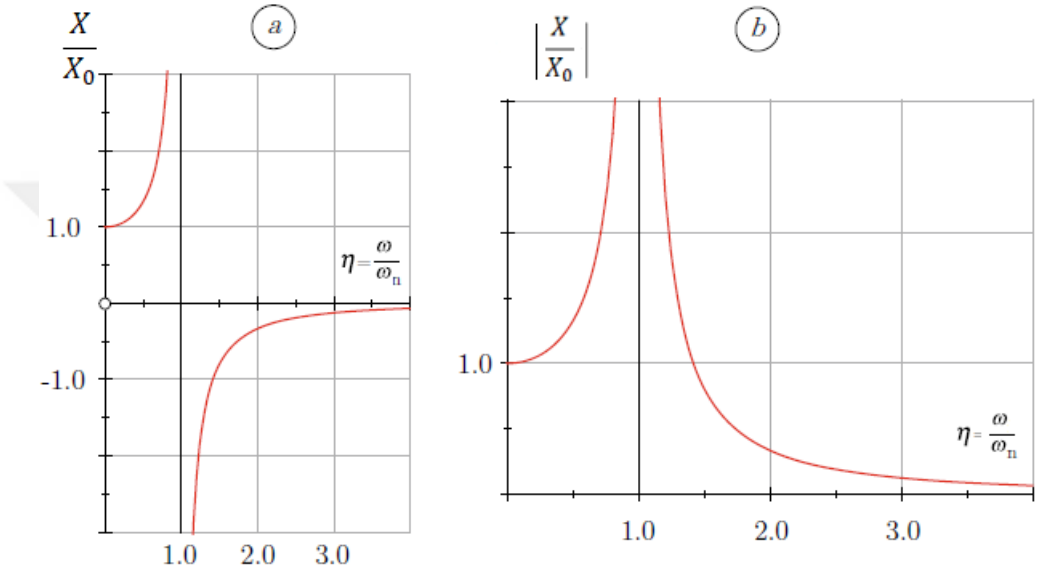
$$\eta = \frac{\omega}{\omega_n} \quad [3.34]$$

şeklinde olup, bu durumda genel çözüm

$$x(t) = A\cos\omega_n t + B\sin\omega_n t + \frac{x_0}{|1-\eta^2|}\cos\omega t \qquad [3.35]$$

olarak elde edilir. Buradaki ikinci terim kuvvet tarafından ortaya çıkan kararlı titreşimleri temsil eder. Herhangi bir andaki yer değiştirmenin başlangıçtaki yer değiştirmeye oranına ($\frac{x}{x_0}$) büyütme faktörü denir ve Denklem [3.36] ile ifade edilir.

$$\left|\frac{x}{x_0}\right| = \frac{1}{|1-\eta^2|} \qquad [3.36]$$

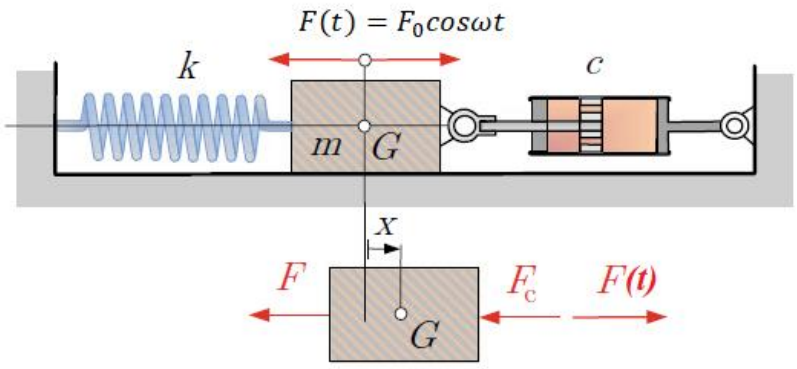


Şekil 3.10 Rezonans eğrisi(büyütme faktörü).

Şekil 3.10, büyütme faktörünü ve büyüklüğünün boyutsuz parametre η'ye göre değişimini göstermektedir [47].

3.2.4 Sönümlü zorlanmış titreşimler

Şekil 3.5'te gösterilen sönümlü tek serbestlik dereceli sistem, $F(t) = F_0\cos\omega t$ harmonik uyarma kuvvetine tabi tutulursa, zorunlu sönümlü titreşimlerden söz ederiz.



Şekil 3.11 Sönümlü bir yay-kütle sisteminin tahrik edilmesi.

Sönümlü zorlanmış titreşimler için hareket denklemi, harmonik olarak uyarılmış ve sönümlenmiş tek serbestlik dereceli bir sistemi gösteren Şekil 3.11'deki gösterimlerden yararlanılırsa kolayca kurulabilir:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 cos\omega t \qquad [3.37]$$

[3.36] denkleminin genel çözümü ve partiküler (özel) çözümü

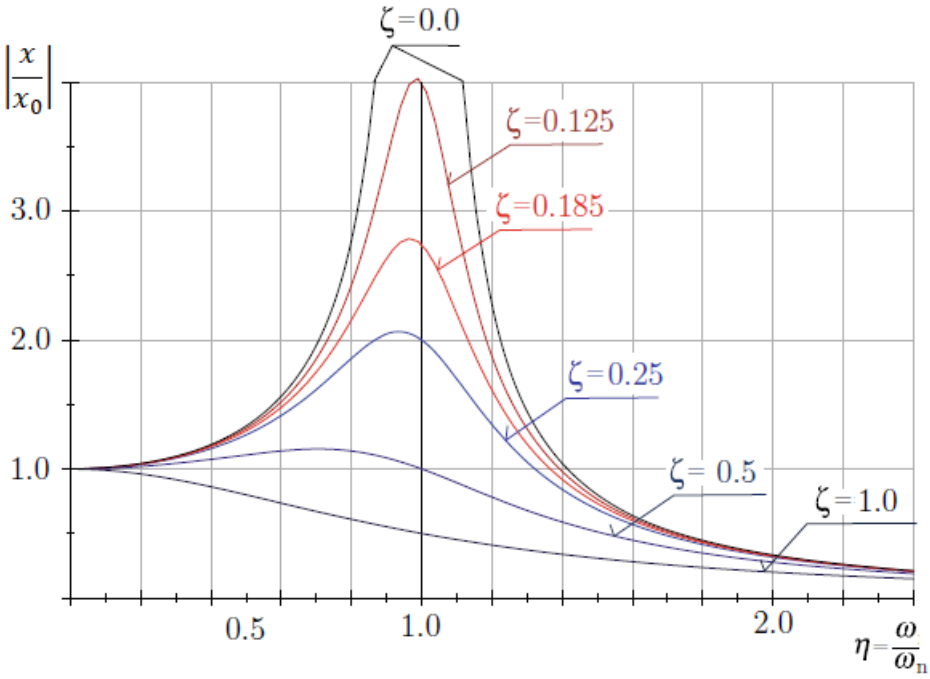
$$x(t) = e^{-\beta t}(Acos\omega_d t + Bsin\omega_d t) + X\cos(\omega t + \phi) \qquad [3.38]$$

şeklindedir. Burada birinci terim genel çözümü, ikinci terim harmonik özel çözümü göstermektedir.

$$\frac{X}{X_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2\xi\eta)^2}} \qquad [3.39]$$

$$\phi = arctan\frac{2\xi\eta}{\eta^2 - 1} \qquad [3.40]$$

Bu denklemlerde X kararlı titreşimlerin genliğini, X_0 sistemin ilk konumunu, ϕ ise sistemdeki hareketin faz açısını belirtmektedir.



Şekil 3.12 Sönümlü bir sistem için büyütme faktörü [47].

Şekil 3.12 sönüm faktörü ξ'nin farklı değerleri için büyütme faktörünün değişimini η frekanslar oranına göre göstermektedir.

3.3 Titreşim Ölçümü

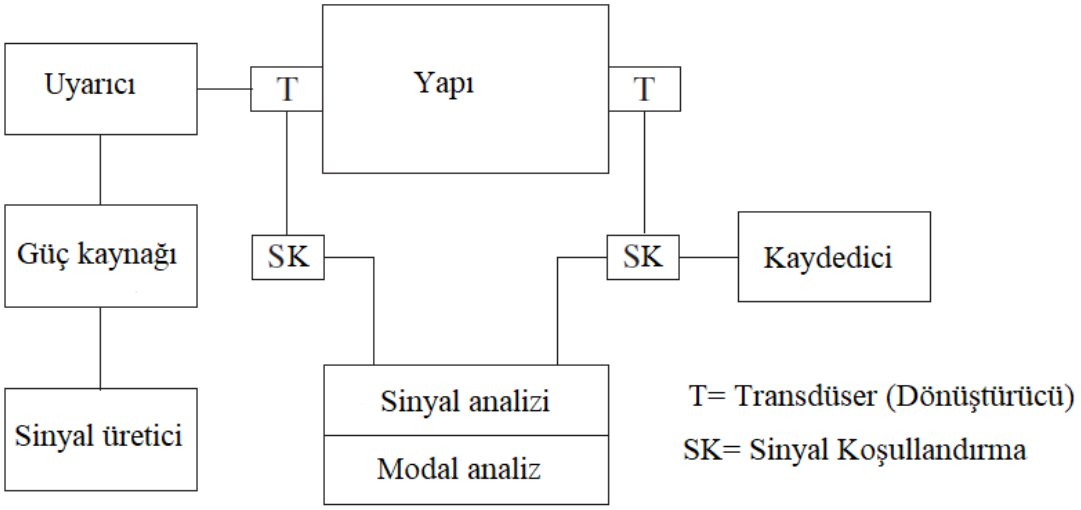
Bu bölümde, çeşitli cihaz ve yapıların deneysel modellerini elde etmek için yararlı olan test etme ve ölçme yöntemleri ele alınmıştır.

Bir yapının veya makinenin doğal frekansları, bir sistemin dinamik davranışını tahmin etmede ve anlamada son derece önemlidir. Bu nedenle, bir sistemin titreşim testini gerçekleştirmenin ana nedeni, sistemin doğal frekanslarını belirlemektir. Titreşim testinin bir başka nedeni de test sistemi için önerilen bir analitik modeli doğrulamaktır. Titreşim testinin bir diğer önemli kullanımı da belirli bir cihazın dinamik dayanıklılığını deneysel olarak belirlemektir. Bu durumda, bir test maddesi belirli bir süre boyunca belirli girdilerle çalıştırılır veya titreşmeye zorlanır. Test bittiğinde, test parçası hala orijinal görevini yerine getirmelidir. Bu tür testlerin amacı, bir makine parçasının veya yapısının belirli bir dinamik ortamda hayatta kalabileceğine dair deneysel kanıtlar sağlamaktır.

Veri toplama ve sinyal işleme donanımı, son on yılda önemli ölçüde değişti ve katı hal ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerin bir sonucu olarak hızla değişmeye devam etmektedir. Bu nedenle, belirli donanım yetenekleri çok hızlı değişmekte olup burada yalnızca genel donanım elemanları ele alınmıştır.

3.4 Titreşim Ölçüm Donanımı

Bir titreşim ölçümü genellikle birkaç donanım bileşeni gerektirir. Gerekli olan temel donanım elemanları, bir tahrik edici kaynaktan yapıya bilinen veya kontrollü bir giriş kuvveti sağlayan uyarıcı (exciter), yapının mekanik hareketini bir elektrik sinyaline dönüştüren dönüştürücü (transducer), dönüştürücünün özelliklerini dijital veri toplama sisteminin giriş elektroniğiyle eşleştirmek için bir sinyal koşullandırma amplifikatörü (yükseltici) ve içinde sinyal işleme ve modal analiz bilgisayar programlarının bulunduğu bir analiz sisteminden (analizör) oluşur. Böyle bir sistem donanımı Şekil 3.13'te gösterilmiştir.

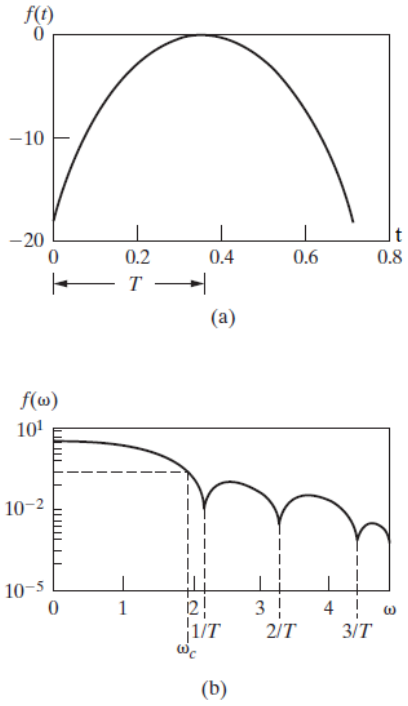


Şekil 3.13 Titreşim testinin gerçekleştirilmesinde kullanılan bir donanım şeması.

İlk önce sisteme istenen girdiye ve test yapısının fiziksel özelliklerine bağlı olarak bir tahrik ettirici kuvvet uygulanır. Modal testte en sık kullanılan iki uyarıcı, sarsıcı (elektromanyetik veya elektrohidrolik) ve darbe çekici olup en çok elektromanyetik sarsıcılar tercih edilmektedir. Elektromanyetik sarsıcı temel olarak manyetik bir alanda bir şaftı çevreleyen tel bobinlerinden oluşan doğrusal bir elektrik motorudur. Test edilen yapıya uygun uyarma sinyali, sinüzoidal, rastgele veya başka bir uygun sinyal olabilir.

Sarsıcı yapıya bir stinger aracılığıyla bağlanır. Stinger, sarsıcının tahrik noktasından doğrudan yapıya monte edilmiş bir kuvvet dönüştürücüye giden kısa, ince bir çubuktan (genellikle çelik veya naylondan) oluşur. Stinger, sarsıcıyı yapıdan izole etmeye yarar, eklenen kütleyi azaltır ve kuvvetin stinger boyunca eksenel olarak iletilmesine neden olarak uygulanan kuvvetin yönünü daha kesin olarak kontrol eder.

Son yıllarda, darbe çekici popüler bir uyarma cihazı haline geldi. Bir darbe çekicinin kullanılması, kütle yükleme problemini ortadan kaldırır ve kullanımı bir sarsıcıdan çok daha hızlıdır. Bir darbeli çekiç, çekicin kafasına yerleştirilmiş bir kuvvet dönüştürücüye sahip bir çekiçten oluşur. Çekiç daha sonra test yapısına vurmak ve böylece geniş bir frekans aralığında tahrik etmek için kullanılır. En yüksek darbe kuvveti, çekiç başı kütlesi ve darbe hızı ile neredeyse orantılıdır. Çekicin başındaki kuvvet dönüştürücü darbe kuvvetinin ölçülmesini sağlar.

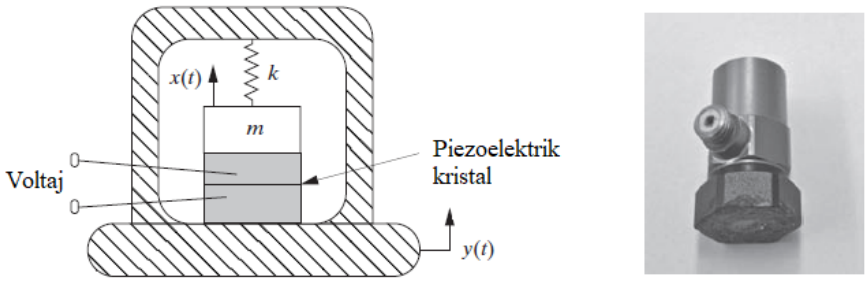


Şekil 3.14 Bir darbe çekici vuruşunun zaman (a) ve frekans (b) cevabı.

Şekil 3.14, tipik bir çekiç vuruşunun hem zaman hem de karşılık gelen frekans tepkisini göstermektedir. Frekans tepkisi, tam bir darbenin dönüşümü ile gösterildiği gibi düz bir çizgi değil, Şekil 3.14'te verilen periyodik forma sahiptir. Şekil 3.14'te gösterilen ω_c kesme frekansı, çekiç darbesiyle oldukça iyi uyarılan en büyük frekans değeridir.

Ardından, darbe kuvvetinin yanı sıra yapının tepkisini ölçmek için dönüştürücüler kullanılır. En popüler ve yaygın olarak kullanılan dönüştürücüler, piezoelektrik kristallerden yapılır. Piezoelektrik malzemeler gerildiğinde elektrik yükü üretir.

İvmeölçerler, aslında bir piezoelektrik malzeme ile ayrılmış, biri yapıya bağlı iki kütleden oluşur (Şekil 3.15). Piezoelektrik malzeme çok sert bir yay gibi davranır.



Şekil 3.15 Piezoelektrik ivmeölçerin şeması ve fotoğrafı.

Gerinim ölçerler (strain gauges), titreşim tepkilerini almak için de kullanılabilir. Gerinim ölçer, bir gerilime maruz kaldığında elektrik direncinde bir değişiklik sergileyen metalik veya yarı iletken bir malzemedir. Gerinim ölçerler, iletken bir telin çok küçük bir yüzey üzerinde serpantin bir şekilde ileri geri bükülmesiyle yapılır ve daha sonra ölçülecek cihaza veya yapıya bağlanır. Yapı gerildikçe serpantin telin direnci değişir. Gösterge, göstergenin direnç değişimini ve dolayısıyla test numunesindeki gerilimi ölçmek için kullanılan bir Wheatstone köprü devresinin parçasıdır. Gerinim ölçerler ayrıca yük hücreleri oluşturmak için de kullanılır.

Çoğu dönüştürücünün çıkış empedansı, sinyal analiz ekipmanına doğrudan giriş için pek uygun değildir. Bu nedenle, şarj yükselticileri veya voltaj yükselticileri olabilen sinyal koşullayıcılar, sinyali analiz etmeden önce sinyalleri eşleştirir ve sıklıkla yükseltir. İvmeölçerler birçok uygulama için uygun olmakla birlikte, hız veya yer değiştirme açısından oluşan düşük frekanslı titreşimlerle ilgileniyorsanız zayıf sinyaller sağlarlar. Gerinim ölçerler ve potansiyometreler ile çeşitli optik, kapasitif ve endüktif dönüştürücüler, düşük frekanslı hareket ölçümü için genellikle ivmeölçerlerden daha uygundur.

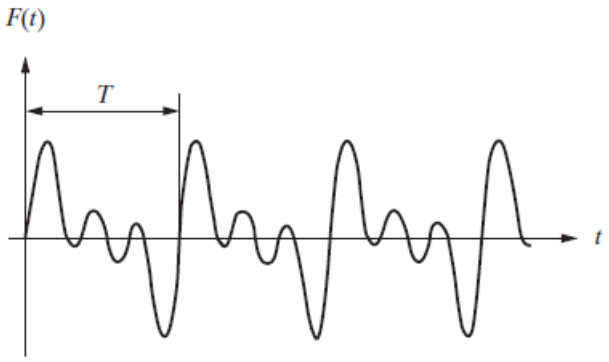
Yanıt sinyali uygun şekilde koşullandırıldıktan sonra, sinyal işleme için bir analizöre yönlendirilir. Kullanımda olan çeşitli analizör türleri vardır. Standart haline gelen tür, dijital Fourier çözümleyici olarak adlandırılır ve aynı zamanda hızlı Fourier dönüşümü (FFT) çözümleyici olarak da adlandırılır. Temel olarak analizör, bir sinyal koşullandırma amplifikatöründen gelen ivmeyi (kuvvet, hız, yer değiştirme veya gerinim) temsil eden analog voltaj sinyallerini kabul eder. Bu sinyal, hesaplama için filtrelenir ve sayısallaştırılır. Giriş ve çeşitli çıkışlar arasındaki bireysel sinyallerin ve çapraz spektrumların ayrık frekans spektrumları hesaplanır. Analiz edilen sinyaller daha sonra doğal frekanslar, sönümleme oranları ve sayısal veya grafik görüntülerde mod şekilleri gibi bilgileri üretmek için çeşitli şekillerde manipüle edilebilir.

Yüksek uzamsal yoğunluklu titreşim ölçümleri elde etmek için nispeten yeni bir araç, taramalı lazer Doppler vibrometredir (SlDV). SlDV, test nesnesinin hızını belirlemek için yansıyan bir lazer ışınındaki Doppler kaymasını kullanır. Lazer sensörü temassızdır, ancak yansıyan sinyalin yeterli yoğunluğunu elde etmek için genellikle yapıların yansıtıcı boya ile boyanması gerekir. SlDV, 250 KHz'lik frekanslara kadar ve nanometre aralığındaki genliklerde titreşimi ölçebilir. Sistem yazılımı ve bir video

kamera, yapı üzerinde bir ağ örgü modeli oluşturmayı ve görüntülemeyi sağlar. Lazer, tüm ağ noktalarındaki titreşimi ölçmek ve titreşimi zaman tepkileri, Fourier dönüşümleri, frekans tepki fonksiyonları (FRF'ler), spektral yoğunluklar, tutarlılık fonksiyonları veya operasyonel yer değiştirme şekilleri (ODS'ler) olarak görüntülemek üzere programlanmıştır. Piezoseramik yama gibi yüksek bant genişliğine sahip bir aktüatör ile kullanıldığında, bir yapının son derece hassas titreşim modelleri veya ODS'leri üretilebilir. ODS, yapıların yeniden tasarlanmasına ve yapılardaki kusurların veya hasarların tespit edilmesine yardımcı olabilir.

3.5 Titreşim Analizi

Modal testte yapılan analizlerin çoğu, analizör içindeki frekans alanında gerçekleştirilir. Analizörün görevi, analog zaman alanlı sinyalleri dijital hesaplama ile uyumlu dijital frekans alanlı bilgilere dönüştürmek ve daha sonra bu sinyallerle gerekli hesaplamaları yapmaktır. Bir analog x(t) sinyalini frekans alanı bilgisine dönüştürmede [3.45] ve [3.45] denklemleriyle tanımlanan Fourier dönüşümü veya [3.41] ila [3.44] denklemleriyle tanımlanan bir Fourier serisidir. Fourier tarafından geliştirilen teoriye göre, Şekil 3.16'daki gibi T periyoduna sahip herhangi bir $F(t)$ periyodik fonksiyonu, sonsuz bir seri formuyla temsil edilebilir.



Şekil 3.16 Genel bir $F(t)$ periyodik fonksiyonu örneği.

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \, cosn\omega_T t + b_n sinn\omega_T t) \qquad [3.41]$$

Burada $\omega_T = 2\pi/T$, a_0, a_n ve b_n katsayıları verilen periyodik fonksiyon $F(t)$ ile [3.41-43] denklemleriyle hesaplanır.

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T F(t)\,dt \quad [3.42]$$

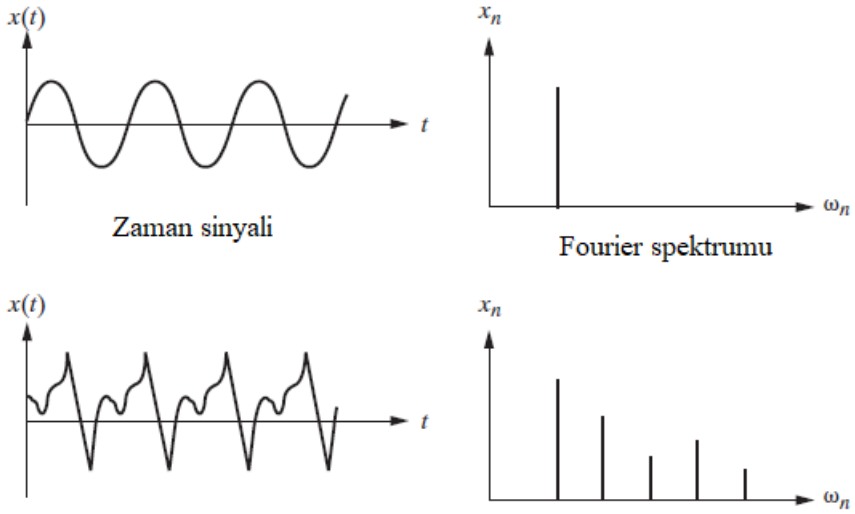
$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T F(t)cosn\omega_T t\,dt \quad n = 1,2,.... \quad [3.43]$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T F(t)sinn\omega_T t\,dt \quad n = 1,2,.... \quad [3.44]$$

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t}dt \quad [3.45]$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t}d\omega \quad [3.46]$$

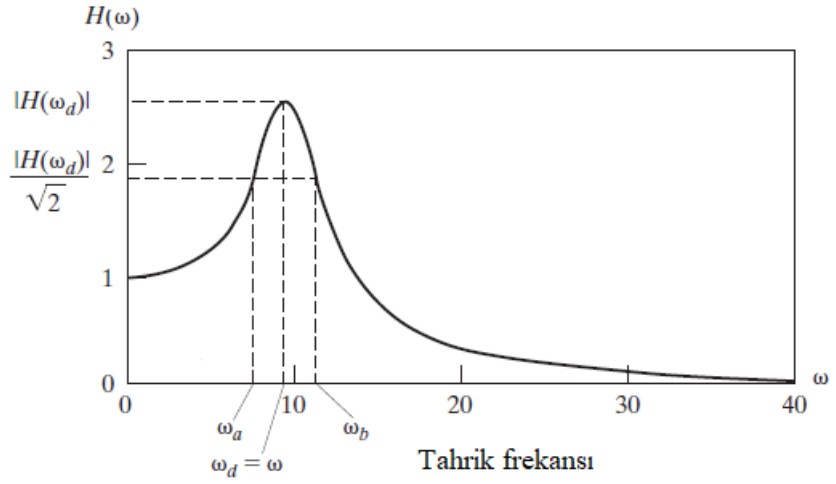
Şekil 3.17 ise titreşim ölçümüyle alınmış birkaç sinyal ve onların Fourier spektrum grafiklerini göstermektedir.



Şekil 3.17 Birkaç sinyal ve onların Fourier spektrumu.

Her titreşim için modal sönüm oranlarının elde edilmesinde, Şekil 3.18'de gösterilen frekans cevap fonksiyonları (H(ω)) grafiğinde iki noktaya karşılık gelen frekanslar ile denklem [3.48] kullanılır.

Burada ω_d, rezonanstaki sönümlü doğal frekanstır ve ω_a ve ω_b [3.47] denklemini sağlayan frekanslardır. [3.47] denkleminin koşulu aynı zamanda logaritmik ölçekte 3 dB düşüş noktası olarak da bilinir. Çizelge 3.1 kütle- yay- sönüm sisteminin frekans cevap fonksiyonunu ve dönüşümünü açıklamaktadır.

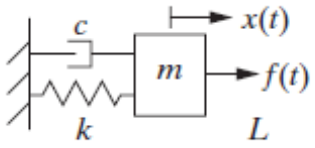


Şekil 3.18 Modal sönüm oranının hesaplanmasını gösteren frekans cevap fonksiyonu.

$$|H(\omega_a)| = |H(\omega_b)| = \frac{|H(\omega_d)|}{\sqrt{2}} \qquad [3.47]$$

$$\xi = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_d} \qquad [3.48]$$

Çizelge 3.1 Kütle- yay- sönüm sisteminin cevap fonksiyonları ve dönüşümü



Transfer Fonksiyonu	$\mathrm{G(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k}$
Frekans Cevap Fonksiyonu	$\mathrm{G}(j\omega) = \mathrm{H}(\omega) = \frac{1}{k - m\omega^2 + c\omega j}$
Darbe Cevap Fonksiyonu	$\mathrm{h(t)} = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\xi\omega_n t} sin\omega_d t$
Laplace Dönüşümü	$\mathrm{L[h(t)]} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} = \mathrm{G(s)}$

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde epoksi kompozitlerin nasıl üretildiği, üretimde kullanılan kalıp ve bu kalıbın boyutları, üretilen epoksi kompozitlerin titreşim ölçüm değerlerinin nasıl incelendiği, titreşim ölçümü için kullanılan deney düzeneğinden bahsedilmektedir.

4.1 Epoksi Kompozitlerin Üretimi

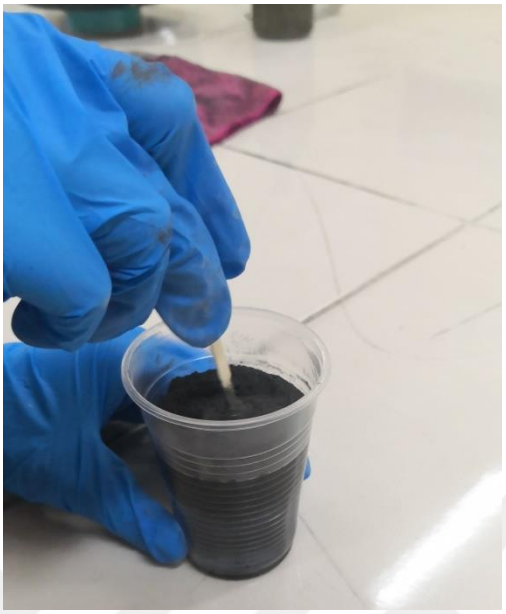
Katkısız/ katkılı epoksi numunelerin üretimi Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla epoksi reçine (F-1564) ve sertleştirici (F-3487), ürün kataloğunda belirtilen oranda (100:34) Ohaus marka CT600-S model hassas tartı kullanılarak ayrı kaplarda tartılmıştır (Şekil 4.1). Tartılan epoksi reçine ve sertleştirici bir kaba aktarılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında kabarcık oluşumunun en az olması için, karıştırma işlemi mümkün olduğunca yavaş (yaklaşık 7 dakika süreyle) yapılmıştır.



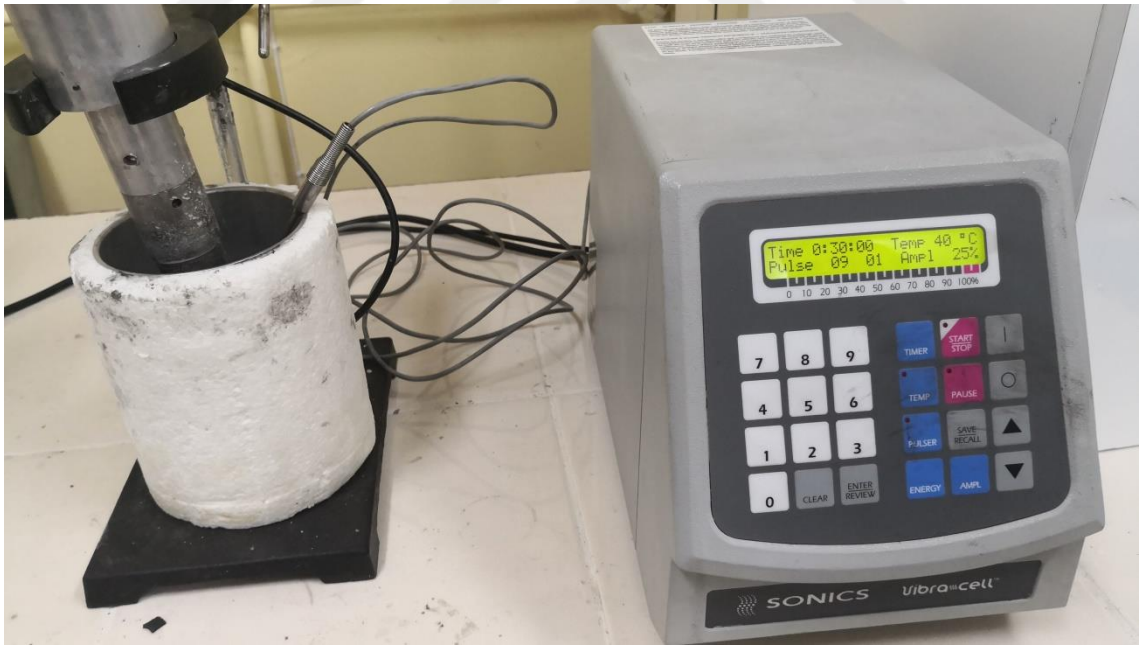
Şekil 4.1 Hassas tartı.

Benzer şekilde katkılı epoksi kompozit numuneleri hazırlamak için epoksi reçineye katkı oranı olarak ayrı ayrı ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında mikro boyutta grafit (C), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) tozları eklenerek önce elde (Şekil 4.2), daha sonra bölümümüzün laboratuvarında bulunan Sonics marka Vibra Cell model homojenizatörde %25 kapasitede 10 dakika süreyle karıştırılmıştır (Şekil 4.3). Homojenizatördeki ultrasonik karıştırma işlemi sırasında numunede ve probta meydana gelen ısınmayı en aza indirmek için buz kullanılmıştır (Şekil 4.4). Katkı maddeleri

epoksi reçineyle karıştırıldıktan sonra katkısız numunelerde olduğu gibi sertleştiriciyle karıştırılmıştır.



Şekil 4.2 Katkı maddelerinin epoksi reçineye eklenmesi.



Şekil 4.3 Katkı maddelerinin homojenizatörde karıştırılması.



Şekil 4.4 Karışım ve probu soğutmak için kullanılan buzlu kap.

Epoksi reçine ve sertleştirici karışımlarının kürlenmesini ve istenen boyutta numune üretimlerini gerçekleştirmek için pleksiglas plakalar kullanılmıştır. Bu pleksiglas plaklar lazer kesim ile kesilerek vidalı bağlantı ile kalıp oluşturulmuştur (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Pleksiglas kalıp.

Hazırlanan karışımlar pleksiglas malzemeden imal edilen kalıplara dökülmüştür (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Karışımların pleksiglas malzemeye dökülmesi.

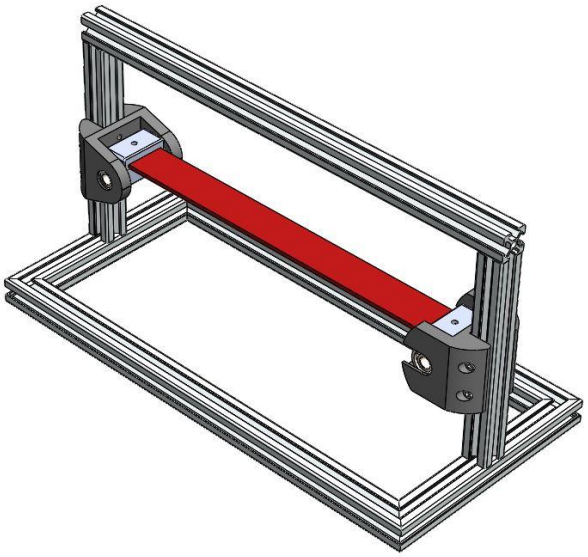
Dökülen karışımın kalıba yapışmaması için 100 cSt viskoziteye sahip silikon yağı kullanılmıştır. Ayrıca, vidalı bağlantı olması sızdırmazlık ve numunelerin çıkarılmasında kolaylık sağlamıştır. Karışımın kürlenmesi için oda sıcaklığında 3 gün süreyle bekletilmiştir. Daha sonra kürlenen malzemeler kalıptan çıkarılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin boyutları 270x30x3 mm'dir. Deneylerin tekrarlanması ve olası aksilik durumunda yedek numune bulunması amacıyla her bir karışım oranında dörder adet numune üretilmiştir (Şekil 4.7). Üç farklı malzemenin üç farklı katkı oranı ve katkısız epoksi olmak üzere 4x10=40 adet epoksi kompozit numuneler elde edilmiştir.



Şekil 4.7 Üretilen katkısız epoksi numune ve katkılı epoksi kompozit numuneler.

4.2 Deney Düzeneği ve Titreşim Ölçüm Testi

Titreşim testi için iki ucu basit mesnetlenmiş bir düzenek düşünülmüş ve bu deney düzeneğinin SolidWorks programındaki tasarımı Şekil 4.8'de verilmiştir. Belli oranlarda mikro parçacık katkılı üretilen epoksi kompozit numuneler bu deney düzeneğine yerleştirilerek dinamik davranışları ölçülmüştür.



Şekil 4.8 Deney düzeneğinin SolidWorks programında çizimi.

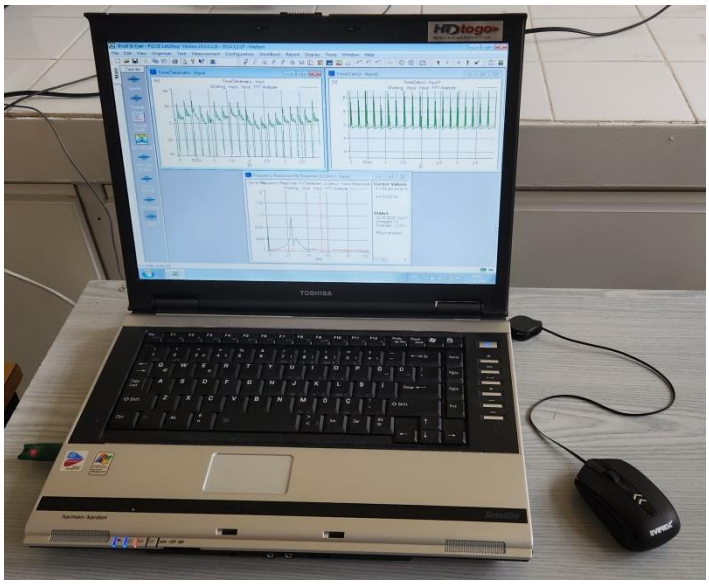
Titreşim testlerinde Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü titreşim laboratuvarında yer alan Bruel&Kjaer titreşim test cihazları ve çok kanallı Pulse sistemi ve yazılımı kullanılmıştır. Deneylerde ivmeölçer (Şekil 4.9), genel amaçlı modal çekiç (Şekil 4.10) ve LabShop yazılımı (Şekil 4.11) yardımıyla titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğine numunenin, ivmeölçerin ve çekicin nasıl kullanıldığı Şekil 4.12'de; titreşim testinin yapıldığı bütün cihazlar ve deney düzeneği ise Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Pulse yazılımı ve sistemi ile çıkış sinyalleri, kuvvet sinyalleri, ivme ve frekans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin titreşim ve sönüm ölçümleri ASTM E756 standartlarına uygun olarak yapılmıştır.



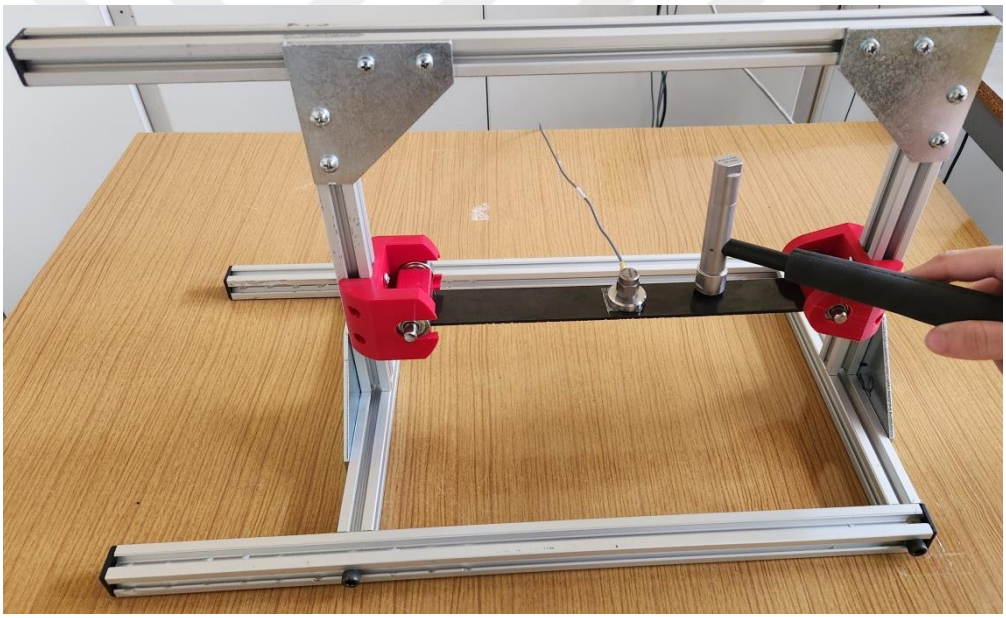
Şekil 4.9 İvmeölçer.



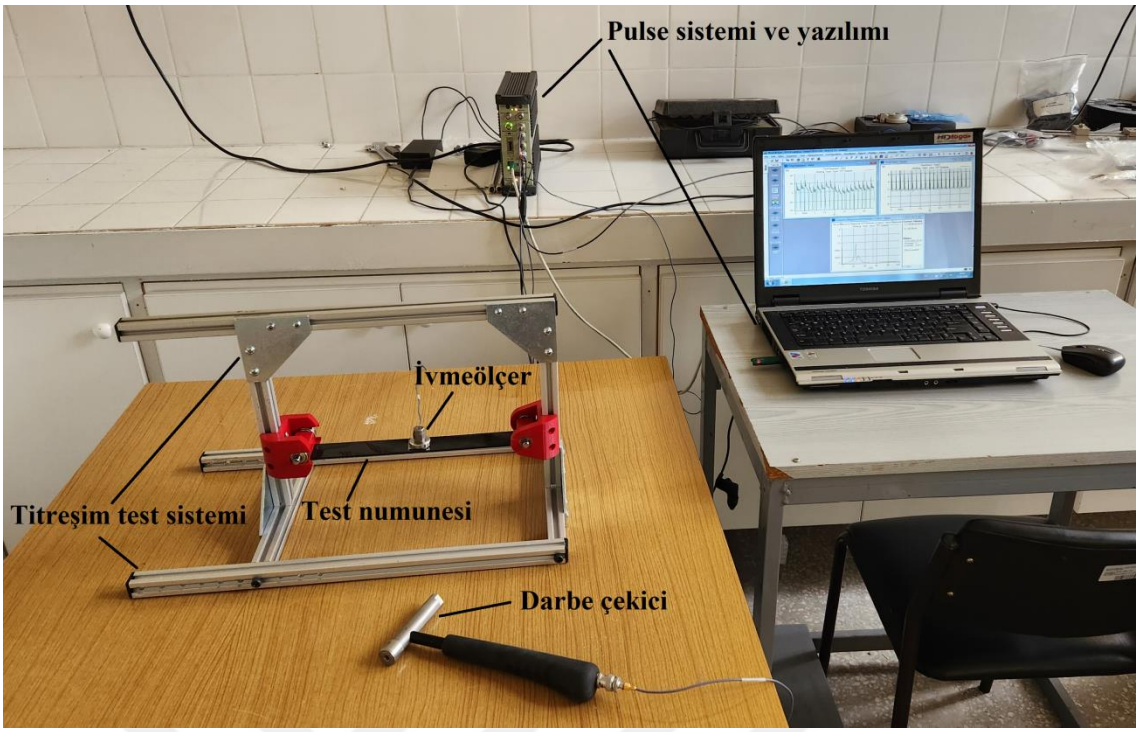
Şekil 4.10 Genel amaçlı modal çekiç.



Şekil 4.11 LabShop yazılımı.



Şekil 4.12 Deney düzeneğine yerleştirilen numuneden çekiçle ölçüm alınması.



Şekil 4.13 Deneysel kurulum ve titreşim sistemi

Pulse yazılımı ve sistemi ile çıkış sinyalleri, kuvvet sinyali, ivme ve frekans ölçümleri yapılmıştır. Sistemin sönüm cevaplarının ölçülmesinde yarı güç bant yöntemi ile numunelerin ilk doğal frekansları bulunmuştur. Yarı güç bant yöntemi, frekans alanından sönüm oranını belirlemek için kullanılır. Bu yöntem, iki yarım güç aralığı arasındaki frekans aralığının yarısının bu modda doğal frekansa oranı olarak tanımlanır. Sistemin sönüm cevaplarının ölçülmesinde yarı güç genişlik metodu ile numunelerin ilk doğal frekansları bulunmuştur. Sönüm oranları ise o sistemin reseptansının frekans spektrumundan elde edilmiştir. Bunun için cevap sinyalinin tepe noktasının 0,707 katı genlikteki alt ve üst frekans değerleri ile doğal frekans değeri kullanılarak sönüm oranları titreşim bölümünde bahsedilen denklem [4.1] ile bulunmuştur. Burada $\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega$ bant genişliği, ω_n sistemin doğal frekansı, ξ sönüm oranıdır. Aynı zamanda sistemin doğal frekansları (ω_i) teorik olarak denklem [4.2] formülüyle de hesaplanır.

$$\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} = \frac{\Delta\omega}{2\omega_n} \qquad [4.1]$$

$$\omega_i = \frac{{\beta_i}^2}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} \qquad [4.2]$$

Burada ω_i i. modun doğal frekansı olup E elastisite modülü, I kesit atalet momenti, ρ malzemenin yoğunluğu, L numunenin boyu, β_i ise sınır şartlarına bağlı katsayılardır. Basit mesnetlenmiş sınır şartları için $\beta_i = i\pi$ (i= 1,2,3,…) dir. Numunelere çekme testleri uygulanarak elastisite modülleri ve yoğunlukları bulunmuştur. Deneysel olarak cevap frekans spektrumlarından bulunan doğal frekans değerleri, teorik olarak Denklem [4.2] ile hesaplanan doğal frekans değerleriyle karşılaştırılmıştır. Hem deneysel hem de teorik doğal frekans değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

4.3 Çekme Testi

Üretilen epoksi kompozit numunelerin çeşitli durumlarda nasıl davrandıklarının belirlenmesi için mekanik özelliklerin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla numuneler, Shimadzu AG-X serisi 250 kN kapasiteli çekme test cihazında çekme testine tabi tutulmuştur. Bu numunelere ASTM D638 standartlarına göre çekme testleri uygulanmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Çekme cihazına bağlanan numune.

Çekme testlerinden epoksi kompozit numunelerin elastisite modülleri, çekme dayanımları ve kopma birim uzamaları elde edilmiştir. Numunelerin yoğunluk değerleri Arşimet Prensibi yardımıyla bulunmuştur (Şekil 4.15). Elde edilen E ve ρ değerleri ile Denklem [4.2] kullanılarak grafit, silisyum karbür ve bor karbür takviyeli (%5, %10, %15) epoksi kompozitlerin doğal frekansları teorik olarak ayrı ayrı hesaplanmıştır.



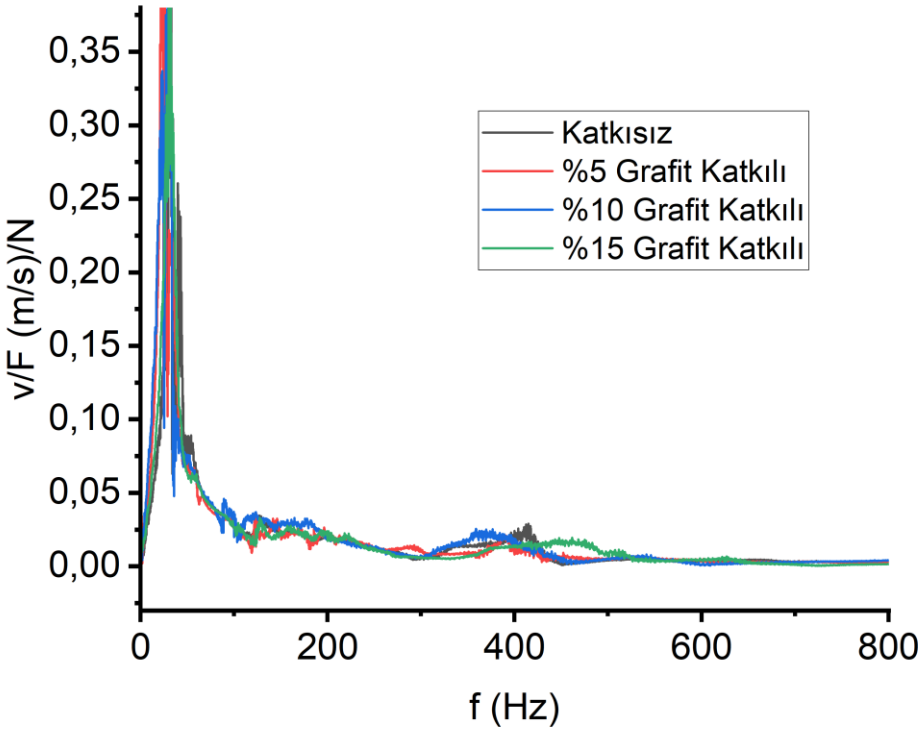
Şekil 4.15 Numunenin yoğunluk ölçümü.

5. SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRMELER

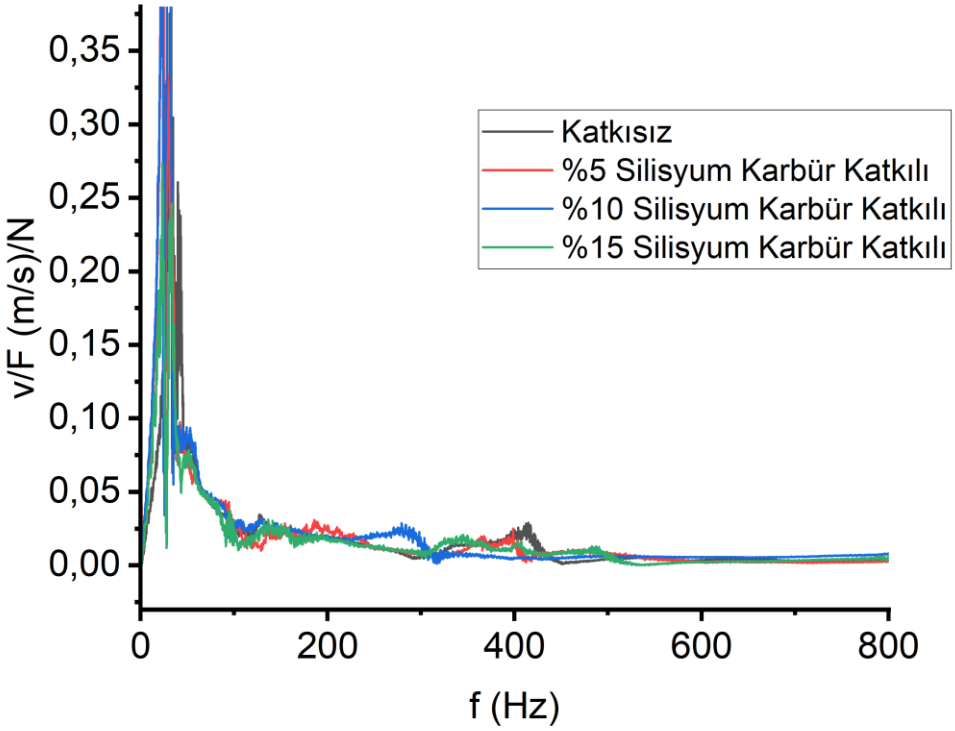
Deney düzeneğinde saf epoksi, grafit, silisyum karbür ve bor karbür katkılı (ağırlıkça %5, %10 ve %15) epoksi kompozitlerin titreşim özellikleri deneysel modal analiz yöntemi ile ayrı ayrı belirlenmiştir. Numunelerin frekans cevap eğrileri, Pulse sistemi ve LabShop yazılımı kullanılarak elde edildi.

5.1 Sonuçlar

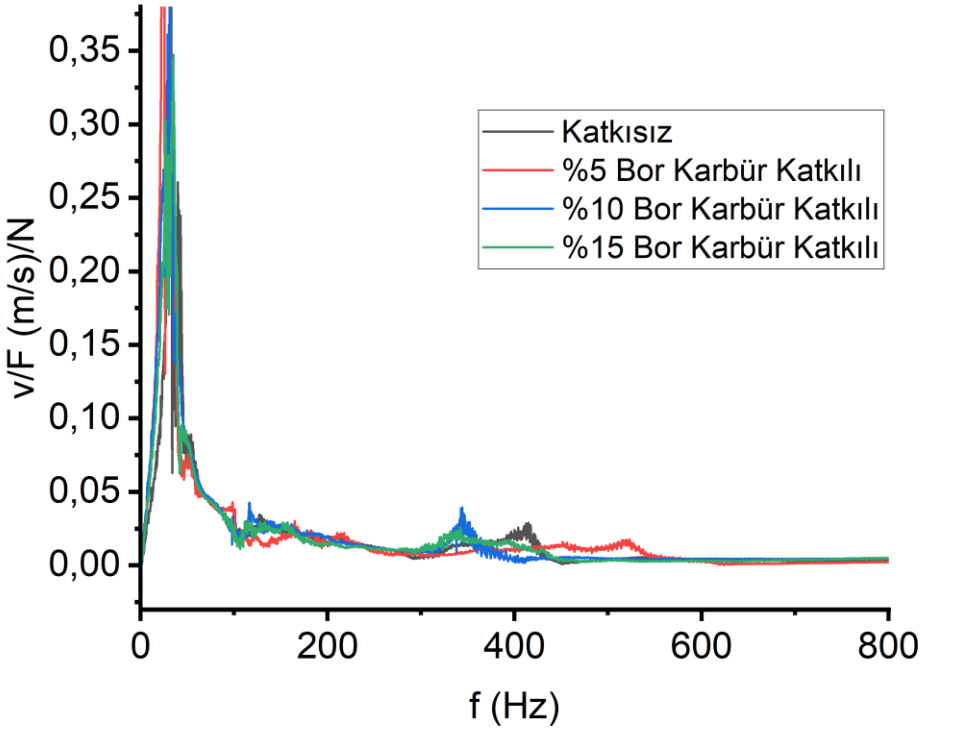
Tüm numunelerin frekans cevap grafikleri Şekil 5.1-5.3'te gösterilmiştir. Şekil 5.1 grafit katkılı, Şekil 5.2 silisyum karbür katkılı ve Şekil 5.3 bor karbür katkılı epoksi kompozitlerin epoksi reçineye göre frekans spektrumlarını katkı oranlarına göre göstermektedir.



Şekil 5.1 Grafit katkılı kompozit numunelerin frekans spektrumu.

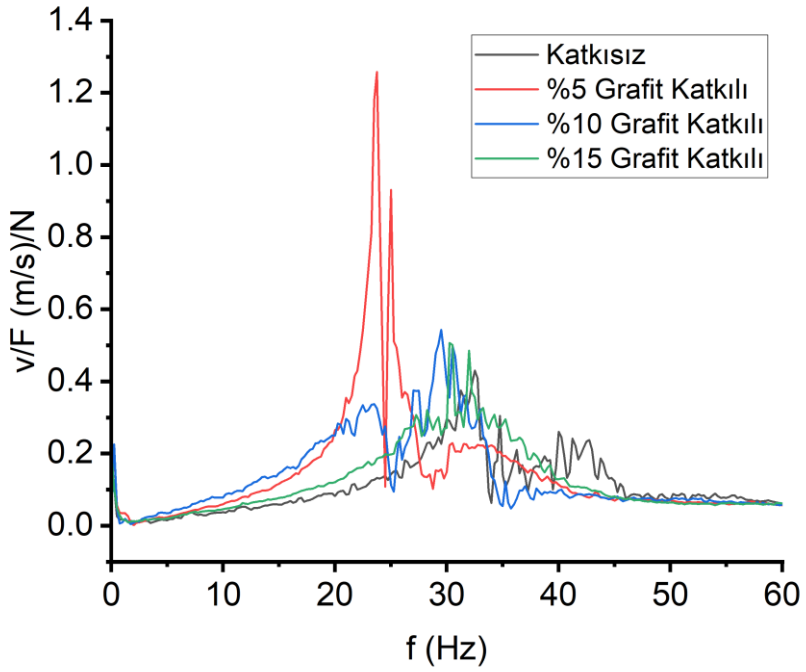


Şekil 5.2 Silisyum karbür katkılı kompozit numunelerin frekans spektrumu.



Şekil 5.3 Bor karbür katkılı kompozit numunelerin frekans spektrumu.

Katkı malzemeleri ve oranlarının birinci doğal frekansa etkilerini daha net görmek için bu frekans spektrum grafikleri düzenlenerek Şekil 5.4-5.6'da birinci doğal frekans civarında gösterilmiştir. Şekil 5.4 grafit takviyeli, Şekil 5.5 silisyum karbür takviyeli ve Şekil 5.6 bor karbür takviyeli epoksi kompozitlerin epoksi reçineye göre frekans spektrumlarını katkı oranlarına göre göstermektedir. Şekil 5.4 detaylı incelendiğinde grafit katkılı numunelerin tamamında birinci doğal frekansın düştüğü, en yüksek düşüşün ise %5 grafit katkılı numunede meydana geldiği görülmektedir.

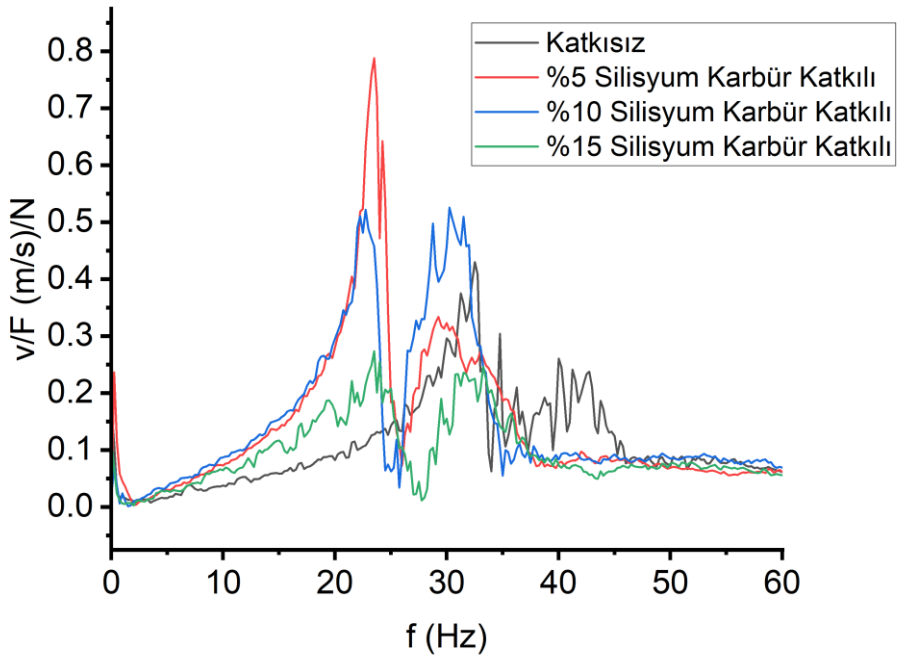


Şekil 5.4 Grafit katkılı kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu.

Doğal frekansın doğrudan malzeme sertliği ile ilgili olduğu bilinen bir gerçektir. Grafit ile saf epoksi hibridizasyonu tam olarak daha sert/rijit bir yapı oluşturamadığı için grafit takviyeli numunelerin doğal frekanslarında düşüşler gözlenmiştir. Ayrıca Şekil 5.4'ten de görülebileceği gibi, grafit katkı oranı %5'ten büyük olduğunda grafit takviyeli epoksi kompozit numunelerin birinci doğal frekansındaki azalmaların bir miktar arttığı görülmektedir.

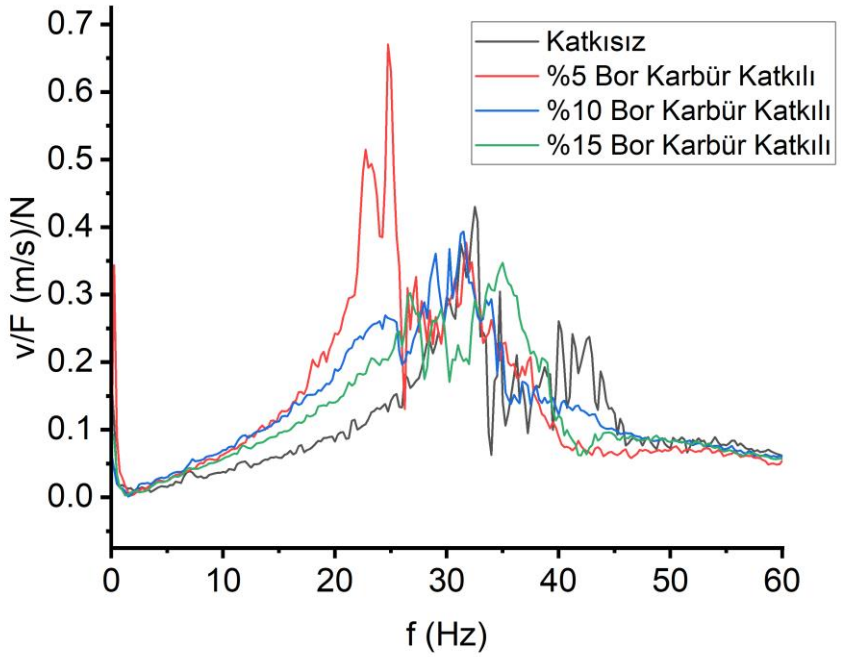
Benzer bir durum Şekil 5.5'teki grafikte de görülmektedir. Yine Şekil 5.5'ten görülebileceği gibi silisyum karbür katkılı tüm numunelerde birinci doğal frekansın düştüğü, en yüksek düşüşün %5 silisyum karbür katkılı olan numunelerde meydana

geldiği görülmüştür. % 15 silisyum karbür katkılı numunede ilk doğal frekansın çok az değiştiği görülmüştür. Şekil 5.5'ten silisyum karbür katkı oranı arttıkça epoksi kompozit numunenin birinci doğal frekansının arttığı ancak yine de saf epoksi numunesinin birinci doğal frekansının altında kaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum silisyum karbür takviyeli epoksi reçinenin daha sert, daha rijit bir yapıya sahip olmaması ile açıklanabilir.



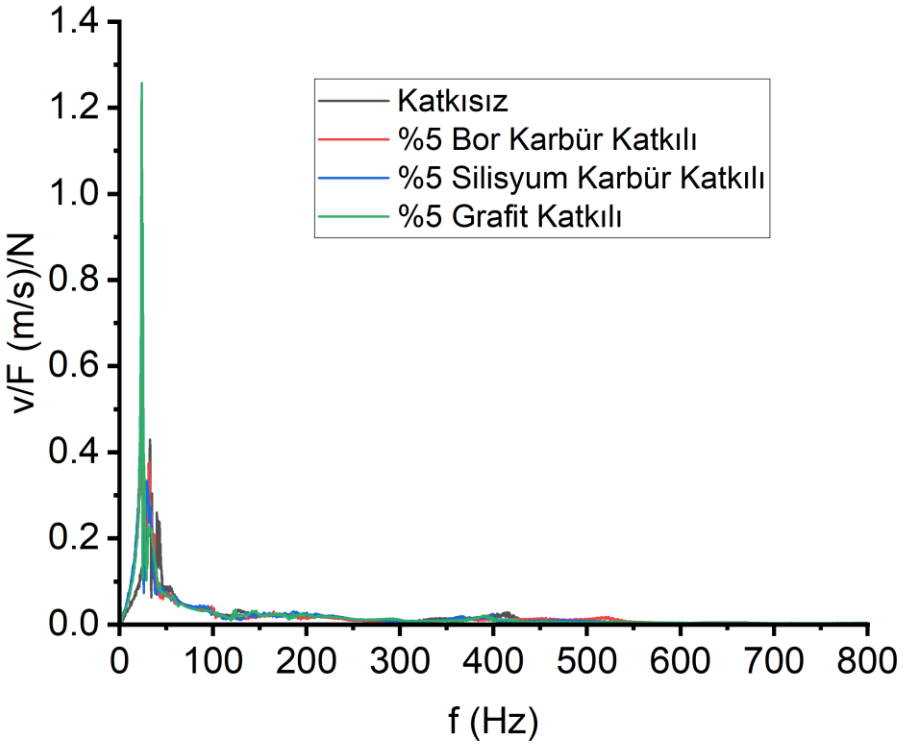
Şekil 5.5 Silisyum karbür katkılı kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu.

Şekil 5.6 dikkatlice incelendiğinde bor karbür katkılı numunelerin birinci doğal frekansının en fazla %5 takviyeli numunede düştüğü, %10 takviyeli numunede daha az azaldığı, fakat %15 takviyeli numunede ise arttığı anlaşılmaktadır. Belirli oranda bor karbür ile saf epoksi hibridizasyonu daha sert/rijit bir yapı oluşturduğundan, %15 bor karbür takviyeli numunenin doğal frekansında hafif bir artış gözlenmiştir. Bu nedenle, bor karbür katkı oranı %5'in altında seçilirse, bor karbür takviyeli epoksi kompozitlerin birinci doğal frekansında önemli bir azalma beklenir.

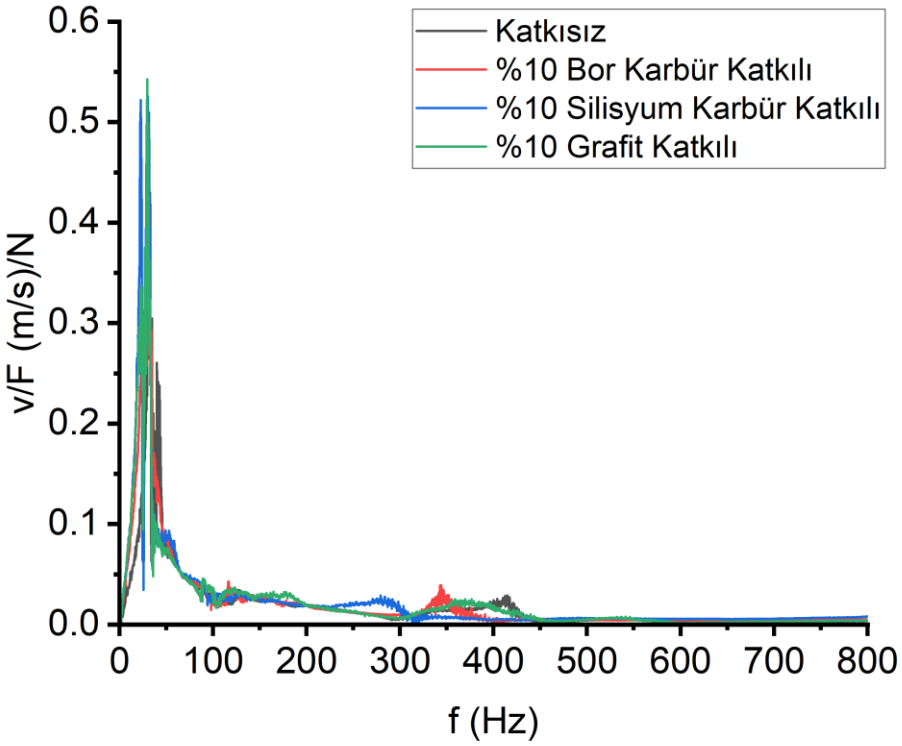


Şekil 5.6 Bor karbür katkılı kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu.

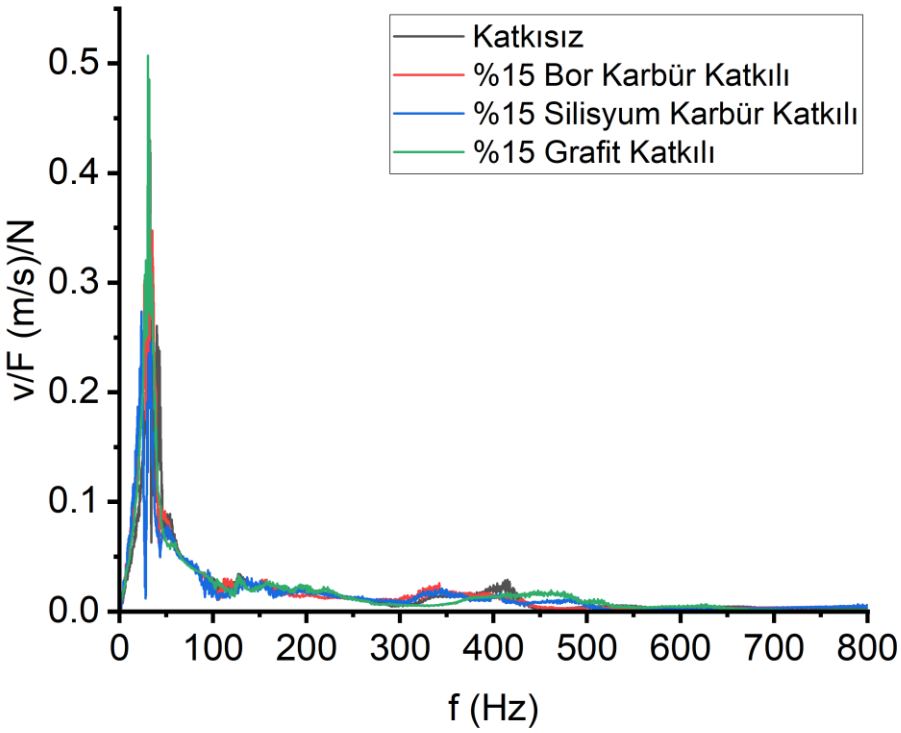
Aynı katkı oranlarında katkı malzemelerinin üretilen epoksi kompozit numunelerin titreşim özelliklerine etkilerini görmek için frekans cevap grafikleri Şekil 5.7-5.9'te gösterilmiştir. Katkı malzemesi olarak ayrı ayrı grafit, silisyum karbür ve bor karbür kullanıldığı epoksi kompozit numunelerin Şekil 5.7 %5 katkı oranlı, Şekil 5.8 %10 katkı oranlı ve Şekil 5.9 %15 katkı oranlı frekans spektrumlarını epoksi reçineye göre göstermektedir.



Şekil 5.7 %5 katkılı epoksi kompozit numunelerin frekans spektrumu.



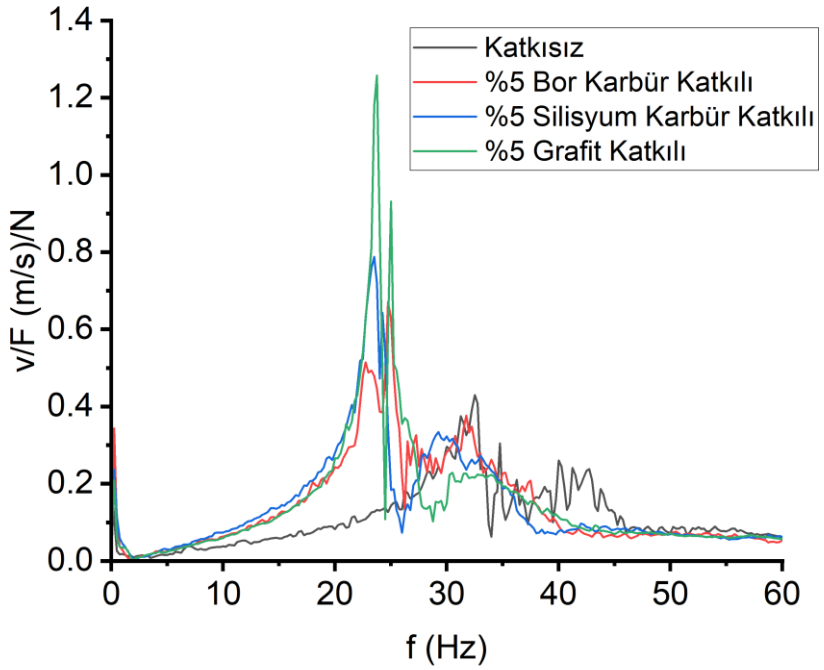
Şekil 5.8 %10 katkılı epoksi kompozit numunelerin frekans spektrumu.



Şekil 5.9 %15 katkılı epoksi kompozit numunelerin frekans spektrumu.

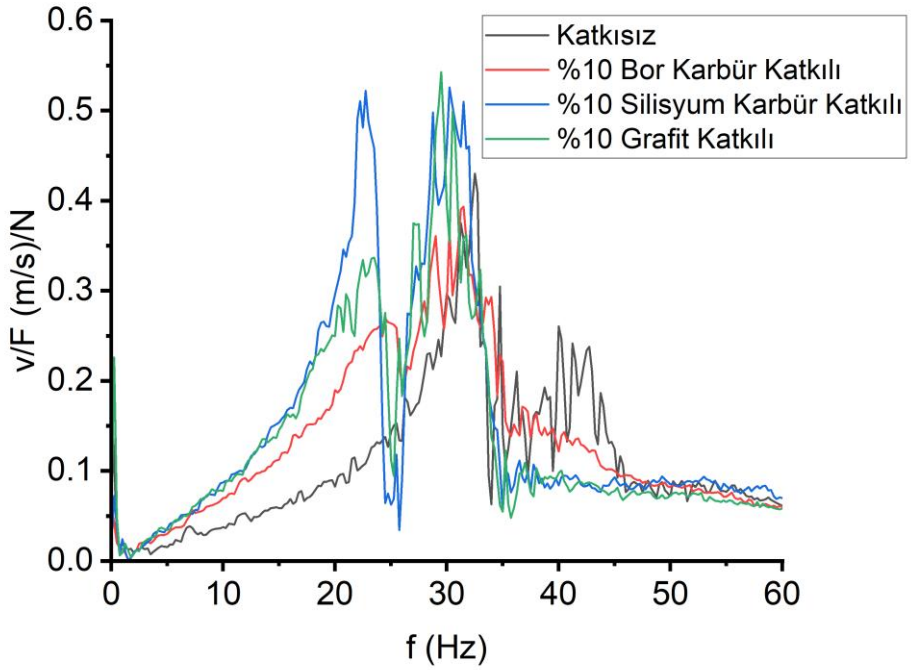
Aynı katkı oranlarında katkı malzemelerinin birinci doğal frekansa etkilerini daha net ve belirgin tespit edebilmek için Şekil 5.7-5.9 frekans spektrum grafikleri düzenlenerek Şekil 5.10-5.12'de birinci doğal frekans civarında yeniden elde edilmiştir. Şekil 5.10 %5 katkı oranlı, Şekil 5.11 %10 katkı oranlı ve Şekil 5.12 %15 katkı oranlı epoksi kompozitlerin frekans spektrumlarını birinci doğal frekans civarında epoksi reçineye göre detaylı bir şekilde göstermektedir.

%5 katkı oranına göre çizdirilmiş Şekil 5.10 incelendiğinde, katkı malzemelerinin genel olarak birinci doğal frekansı düşürdüğü anlaşılmaktadır. Doğal frekanstaki en fazla düşüş silisyum karbür ve grafit katkı malzemeli epoksi kompozitlerde görülürken, bor karbür katkı malzemeli epoksi kompozitlerde bu düşme nispeten daha az seviyededir.

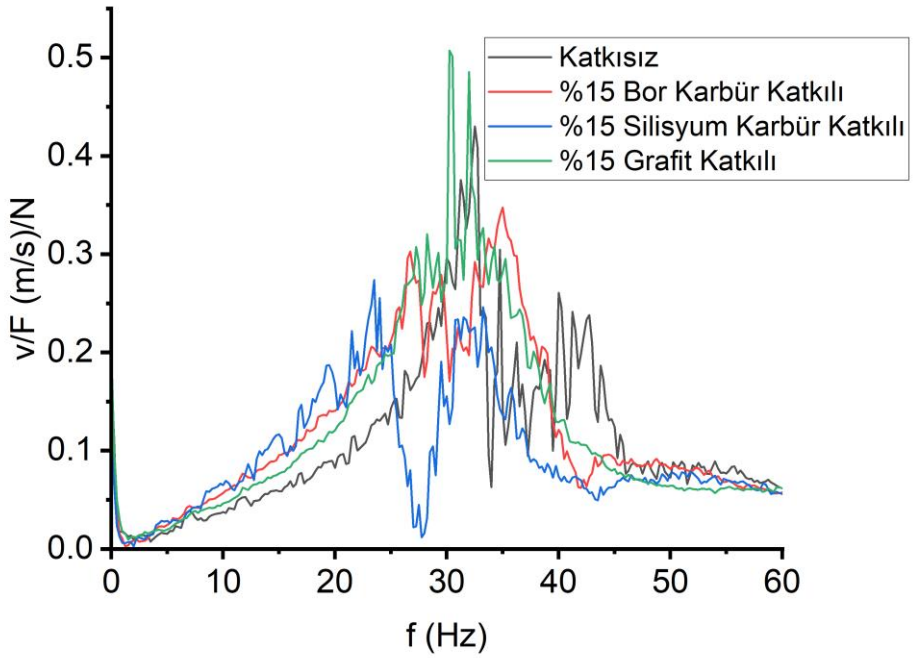


Şekil 5.10 %5 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu.

Benzer bir durum %10 katkı oranlı Şekil 5.11 grafiklerinde de görülmektedir. Yine, katkı malzemelerinin genel olarak birinci doğal frekansı düşürdüğü anlaşılmaktadır. Ancak birinci doğal frekanstaki en belirgin düşme silisyum karbür katkılı numunede olurken, grafit katkılı numunede biraz daha az ve bor karbür katkılı numunede ise en az düşme gözlenmiştir.



Şekil 5.11 %10 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu.



Şekil 5.12 %15 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin ilk doğal frekans civarındaki frekans spektrumu.

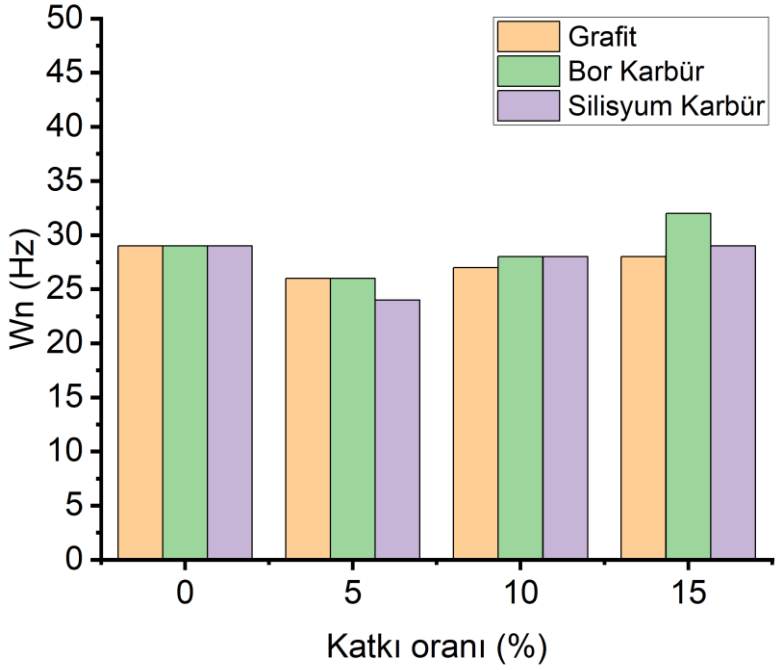
%15 katkı oranlı şekil 5.12 dikkatli incelendiğinde, silisyum karbür katkılı numunede birinci doğal frekanstaki düşme en fazla, grafit katkılı numunede biraz daha az düşme görülürken, bor karbür katkılı numunede ise birinci doğal frekansta bir miktar artma görülmektedir.

Şekil 5.10-5.12 birlikte değerlendirildiğinde grafit, silisyum karbür ve bor karbür katkı malzemeleri aynı katkı oranında ayrı ayrı eklendiğinde, %5 , %10 ve %15 katkı oranlarında genel olarak birinci doğal frekanslarda düşmeler gözlenmiştir. Yalnızca %15 bor karbür katkılı epoksi kompozit numunelerin birinci doğal frekanslarında artmalar görülmüştür. Ancak %5, %10 ve %15 katkı oranlı tüm numunelerde silisyum karbür katkı malzemeli olanlarda doğal frekanslar en fazla düşmekte, grafit katkı malzemeli olanlarda doğal frekanslar biraz daha düşmekte ve bor karbür katkı malzemeli olanlarda ise doğal frekanslarda en az düşmeler görülmektedir.

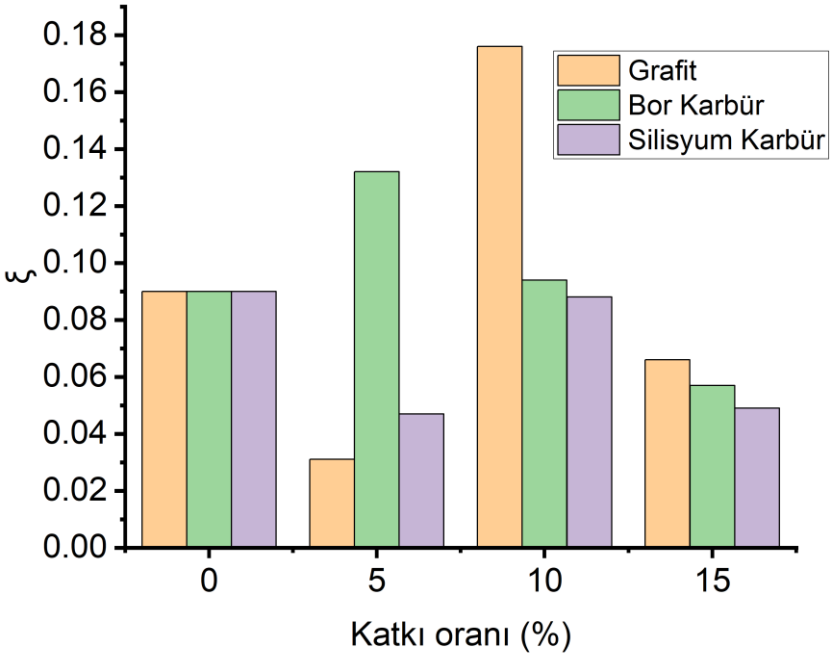
Daha sonra elde edilen frekans spektrumundan Denklem 4.2 kullanılarak yarı güç bant genişliği yöntemi ile sönüm oranları hesaplanmıştır. Deneysel olarak bulunan ilk doğal frekans değerleri Denklem 4.2 ile teorik olarak hesaplanan ilk doğal frekans değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 5.1, üretilen kompozit numunelerin teorik ve deneysel ilk doğal frekanslarını ve sönüm oranlarını karşılaştırmaktadır. Çizelge 5.1'de hem deneysel hem de teorik doğal frekans değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.
Numunelerin sönüm oranı değerleri incelendiğinde, %10 grafit ve %5 bor karbür katkılı epoksi kompozitlerde sönüm oranının saf epoksiye göre arttığı, diğer kompozit numunelerde ise azaldığı tespit edilmiştir.

Şekil 5.13 katkı oranına göre birinci doğal frekansın değişimini ve Şekil 5.14 katkı oranına göre sönüm oranının değişimini göstermektedir. Şekil 5.10-5.13 birlikte değerlendirildiğinde, elde edilen takviyeli epoksi kompozitlerin birinci doğal frekanslarının değişiminde benzer eğilimler gösterdiği anlaşılmaktadır. Şekil 5.13'ten görülebileceği gibi, mikropartikül katkılı epoksi kompozitlerin ilk doğal frekansları genel olarak azalırken, sadece %15 bor karbür katkılı epoksi kompozitlerin ilk doğal frekansları artmıştır. Yine Şekil 5.13'ten, ilk doğal frekanslar, %5 katkı oranı ile tüm epoksi kompozit numuneler içinde en düşük seviyededir. Grafit, silisyum karbür ve bor karbür katkı oranları daha da artarsa bu numunelerin ilk doğal frekansları da artar. Ayrıca silisyum karbür takviyeli numunelerin tüm katkı oranlarında birinci doğal

frekansı düşürmede grafit ve bor karbür takviyeli numunelere göre genel olarak daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.13 Katkı oranına göre doğal frekansın değişimi.



Şekil 5.14 Katkı oranına göre sönümleme oranının değişimi.

Benzer şekilde Şekil 5.14 ve Çizelge 5.1 birlikte değerlendirildiğinde, elde edilen katkılı epoksi kompozitlerin sönüm oranlarındaki değişimin aynı olduğu görülmüştür. Şekil 5.14'te görüldüğü gibi, %5 bor karbür katkılı ve %10 grafit katkılı epoksi kompozit numunelerin sönüm oranları önemli ölçüde artmış, ancak diğer tüm durumlarda sönüm oranları düşmüştür. Şekil 5.14 ve Çizelge 5.1'deki sönüm oranları birlikte incelendiğinde en iyi sönüm oranının %5 katkı oranlarında bor karbür, %10 ve %15 oranlarında grafit olduğu anlaşılmaktadır. Yine Şekil 5.14'ten silisyum karbürün sönümleme oranını iyileştirmede grafit ve bor karbüre göre daha düşük kaldığı görülmektedir. Saf/takviyeli epoksi malzemelerin mekanik özellikleri için numunelere çekme testleri uygulanmış ve numunelerin elastisite modülü (E), kopma mukavemeti (σ_k) ve birim uzama yüzdeleri (% ϵ) elde edilmiştir. Numunelerin yoğunluk değerleri (ρ) Arşimet Prensibine göre hesaplanmıştır. Numunelerin bu mekanik özellikleri katkı oranlarına göre Çizelge 5.2'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

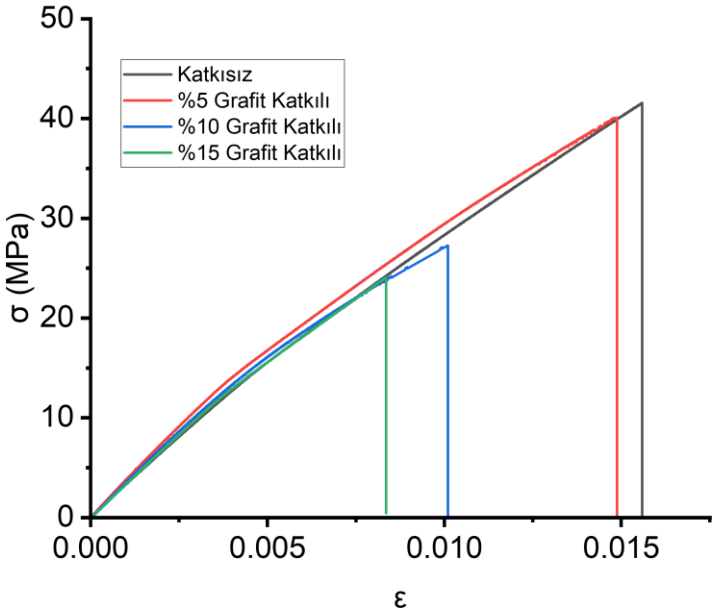
Çizelge 5.1 Kompozit numunelerin ilk doğal frekansları ve sönüm oranları

	w_n (rad/sn) Deneysel	w_n (rad/sn) Teorik Denklem [4.2]	ξ
Saf epoksi	29±0.5	29.30	0.090±0.011
%5 Grafit katkılı	26±0.7	26.55	0.031±0.010
%10 Grafit katkılı	27±0.6	27.52	0.176±0.012
%15 Grafit katkılı	28±0.3	28.50	0.066±0.011
%5 Silisyum karbür katkılı	24±0.5	24.59	0.047±0.012
%10 Silisyum karbür katkılı	28±0.3	28.42	0.088±0.010
%15 Silisyum karbür katkılı	29±0.6	29.60	0.049±0.011
%5 Bor karbür katkılı	26±0.9	26.83	0.132±0.015
%10 Bor karbür katkılı	28±1.0	28.95	0.094±0.016
%15 Bor karbür katkılı	32±1.1	30.98	0.057±0.018

Çizelge 5.1 'de verilen teorik birinci doğal frekans değerleri dışında, Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de verilen tüm değerler, üretilen takviyeli epoksi kompozitlerin birkaç numunesinin ölçüm değerlerinin ortalamaları ile yaklaşık olarak tolerans sınırları içinde ele alınarak gösterilmiştir. Çizelge 5.2'de numunelerin elastisite modülleri incelendiğinde grafit, silisyum karbür ve bor karbür katkı maddelerinin genel olarak epoksi kompozitlerin elastisite modülünü arttırdığı ancak bu artışın düzgün ve doğrusal olmadığı görülmüştür. Yine Çizelge 5.2'den bu kompozit numunelerin kopma dayanımlarının (σ_k) genel olarak saf epoksiye göre azaldığı, ancak sadece %5 silisyum karbür katkılı epoksi kompozitte arttığı anlaşılmaktadır. Üretilen bu katkılı epoksi numunelerin yoğunluk (ρ) ve yüzde birim uzama değerleri (% ϵ) de Çizelge 5.2'de verilmektedir.

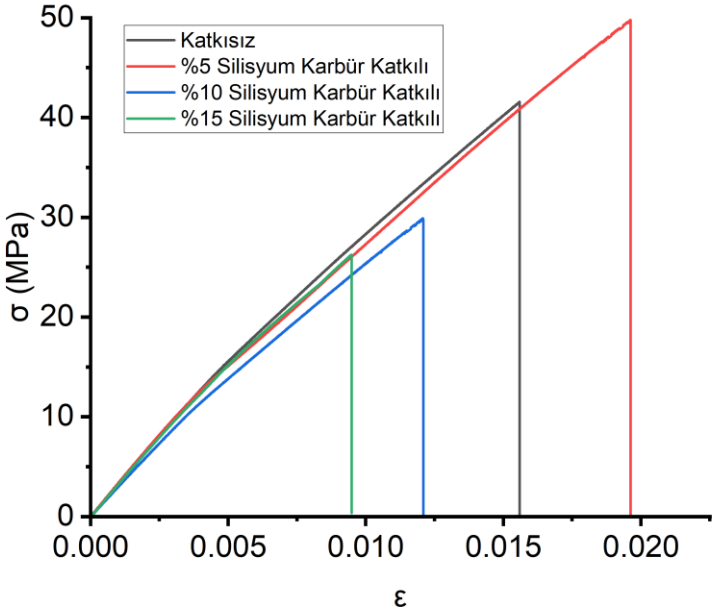
Çizelge 5.2 Üretilen kompozit numunelerin bazı mekanik özellikleri

	E (GPa)	ρ (kg/m^3)	σ_k (MPa)	% ϵ
Saf epoksi	2.467±0.011	1152±2	40.25±1.1	1.601±0,05
%5 Grafit katkılı	2.684±0.009	1146±2	39.13±1.2	1.534±0.02
%10 Grafit katkılı	2.516±0.010	1156±2	27.27±1.0	1.182±0.06
%15 Grafit katkılı	3.105±0.008	1206±2	23.11±1.4	0.764±0.04
%5 Silisyum karbür katkılı	2.656±0.012	1180±2	50.38±1.5	2.012±0.05
%10 Silisyum karbür katkılı	2.704±0.009	1216±2	28.44±1.3	1.056±0.04
%15 Silisyum karbür katkılı	2.615±0.013	1258±2	26.86±0.9	1.148±0.07
%5 Bor karbür katkılı	2.650±0.011	1191±2	37.17±1.1	1.285±0.08
%10 Bor karbür katkılı	2.908±0.012	1208±2	18.50±0.5	0.878±0.05
%15 Bor karbür katkılı	2.964±0.013	1148±2	20.12±0.4	0.793±0.04

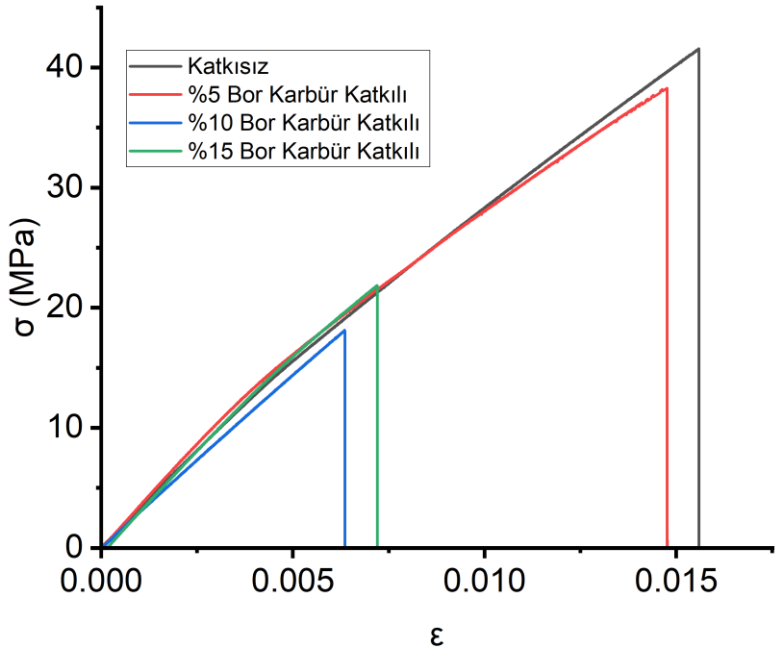


Şekil 5.15 Grafit katkılı epoksi kompozitlerin çekme gerilimi- birim uzama eğrileri (σ-ϵ).

Numunelere çekme testi uygulandıktan sonra incelenen numunelerin gerilme-birim uzama eğrileri grafit katkılı için Şekil 5.15'da, silisyum karbür katkılı için Şekil 5.16'da ve bor karbür katkılı epoksi kompozitler için Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5.16 Silisyum karbür katkılı epoksi kompozitlerin çekme gerilimi- birim uzama eğrileri (σ-ϵ).

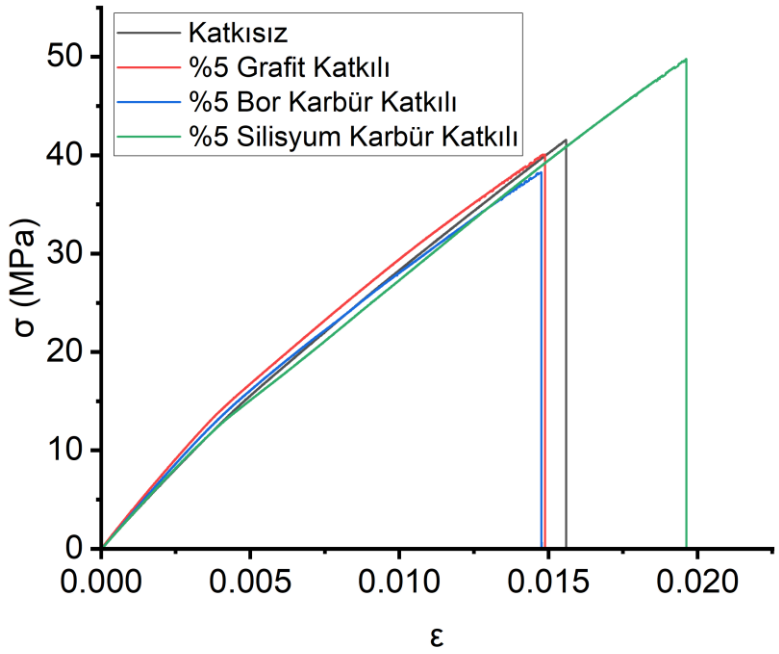


Şekil 5.17 Bor karbür katkılı epoksi kompozitlerin çekme gerilimi- birim uzama eğrileri (σ-ϵ).

Şekil 5.15 – 5.17 incelendiğinde bu numunelerin çekme dayanımı saf epoksiye göre genel olarak azalmıştır. Şekil 5.16'dan yalnızca %5 silisyum karbür ilave edilen numunenin kopma mukavemetinin arttığı görülmüştür. Silisyum karbür veya grafit katkılı numunelerde katkı oranı arttıkça numunelerin kopma mukavemeti sürekli olarak azalmaktadır. Ancak bor karbür katkılı numunelerde katkı oranı arttıkça bu numunelerin kopma mukavemetindeki değişim doğrusal değildir. Numunelerin çekme dayanımı değerleri, katkı oranı %5'in üzerinde olan numunelerde daha da düşmektedir. Bu nedenle yüksek dayanımlı epoksi kompozitler elde etmek için bu malzemelerin katkı oranlarının %5'i geçmemesi tercih edilmelidir. Ayrıca katkı oranı %5'ten fazla olan katkılı epoksi kompozitlerde malzemenin kürlenmesi ve hibritleşmesi zorlaşmaktadır. Güçlendirilmiş epoksi kompozitlerin çekme mukavemetindeki bu azalma, katkı maddesi ile reçine arasındaki zayıf bağlanmaya bağlı olabilir. Aynı şekilde yüksek katkı oranlarında çekme dayanımının düşmesi, epoksi reçine ile bu katkıların arasındaki bağ gücünün düşük olmasıyla açıklanabilir.

Aynı katkı oranlarında farklı katkı malzemelerinin (grafit, silisyum karbür, bor karbür) epoksi kompozit numunelerin mekanik özelliklerine etkilerini daha iyi görebilmek için çekme gerilmeleri-birim uzama grafikleri Şekil 5.18-5.20'de gösterilmiştir. Şekil 5.18

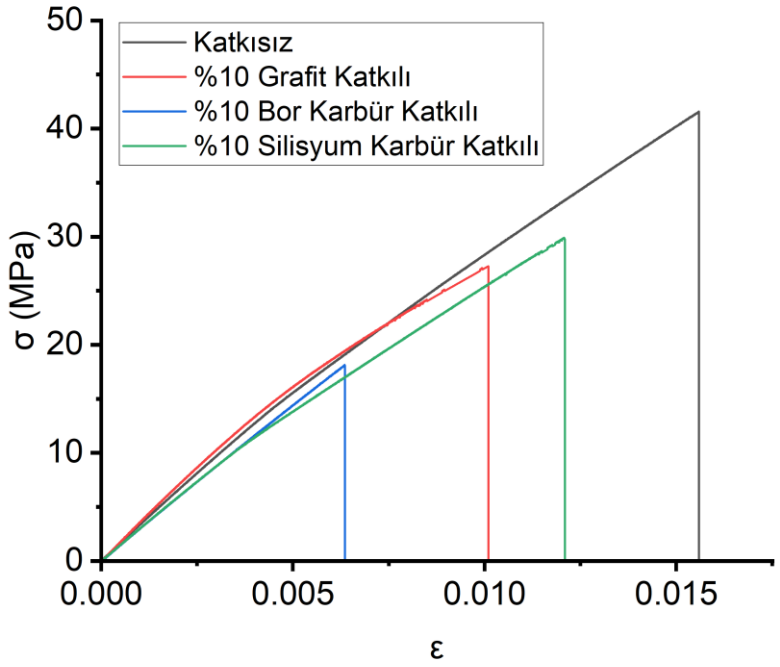
%5 katkı oranlı, Şekil 5.19 %10 katkı oranlı ve Şekil 5.20 %15 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin çekme gerilmeleri-birim uzama eğrilerini (σ-ϵ) vermektedir.



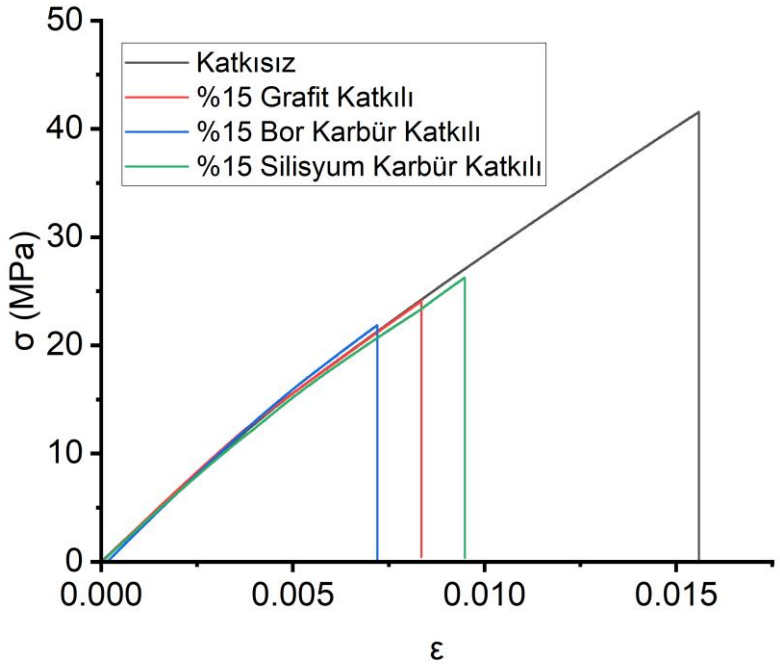
Şekil 5.18 %5 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin çekme gerilmeleri-birim uzama eğrileri (σ-ϵ).

Şekil 5.18'den %5 katkı oranlı bor karbür ve grafit katkılı numunelerin kopma mukavemeti değerleri biraz düşme, buna karşılık silisyum karbür katkılı numunede ise bir miktar artma görülmektedir. Çizelge 5.2 ve Şekil 5.18 birlikte incelendiğinde %5 katkı oranlı tüm numunelerde elastisite modüllerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları da anlaşılmaktadır.

Şekil 5.19'dan görüldüğü gibi %10 katkı oranlı üretilen tüm epoksi kompozit numunelerin kopma mukavemet değerleri düşmüştür. En fazla düşme bor karbür katkılı numunede, en az düşme ise silisyum karbür katkılı numunede gerçekleşmiştir.
Benzer şekilde Şekil 5.20'den anlaşılacağı üzere %15 katkı oranlı üretilen tüm epoksi kompozit numunelerin kopma mukavemet değerleri düşmüştür. Bu düşme tüm katkı malzemelerinde yaklaşık olarak aynıdır.



Şekil 5.19 %10 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin çekme gerilmeleri-birim uzama eğrileri (σ-ϵ).



Şekil 5.20 %15 katkı oranlı epoksi kompozit numunelerin çekme gerilmeleri-birim uzama eğrileri (σ-ϵ).

Saf epoksiye %5 katkı oranlı grafit, silisyum karbür ve bor karbür ayrı ayrı eklenirse, mukavemet açısından %5 katkı oranlı numunelerin %10 ve %15 katkı oranlı numunelere göre daha iyi sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Bu yüzden bu katkı malzemelerinin katkı oranlarının %5 seviyesini geçmemesi dayanım açısından dikkate alınmalıdır.

5.2 Genel Değerlendirmeler

Bu çalışmada, epoksi reçineye ayrı ayrı ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında grafit (C), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B_4C) mikropartikülleri eklenerek belirli boyutlarda epoksi kompozit numuneler üretilmiştir. Bu malzemelerden basit mesnetli titreşim deney düzeneğinde üretilen kompozit numunelerin serbest titreşimleri modal analiz yöntemi ile incelenmiş ve bunların frekans spektrumları ve sönüm oranları elde edilmiştir. Ayrıca bu numunelere çekme testi uygulanarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Belirli oranlardaki bu mikro partikül katkı maddelerinin, üretilen katkılı epoksi kompozitlerin doğal frekans ve sönüm oranları gibi titreşim özellikleri ile mekanik özellikleri üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Ağırlıkça %5, %10, %15 grafit, silisyum karbür ve bor karbür katkılı epoksi kompozitlerin serbest titreşimleri ve mekanik özellikleri ile ilgili sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Bu epoksi kompozitlerin frekans spektrumundan %5, %10, %15 katkı oranlarında grafit, silisyum karbür ve bor karbür ile güçlendirilmiş epoksi kompozitlerin ilk doğal frekansları genel olarak azalmış ve maksimum düşüş her bir %5 oranlı katkılı kompozitlerde gözlenmiştir. %15 bor karbür katkılı epoksi kompozitin sadece ilk doğal frekansı biraz arttığı gözlenmiştir. Grafit, silisyum karbür ve bor karbür katkı oranları daha da artarsa bu numunelerin ilk doğal frekansları da artar. Ayrıca silisyum karbür katkılı numunelerin tüm katkı oranlarında birinci doğal frekansı düşürmede grafit ve bor karbür takviyeli numunelere göre daha iyi olduğu görülmektedir.
- Sönüm oranı %10 grafit ve %5 bor karbür katkılı epoksi kompozitlerde saf epoksiye göre artmış, diğer kompozit numunelerde ise azalmıştır. En iyi sönümleme oranının %5 katkı oranlarında bor karbür, %10 ve %15 oranlarında grafit olduğu anlaşılmaktadır. Silisyum karbürün sönümleme oranını iyileştirmede grafit ve bor karbürden daha düşük kaldığı görülmektedir.

- Bu epoksi kompozitlerin çekme testinden grafit, silisyum karbür ve bor karbür katkı maddelerinin genel olarak bu epoksi kompozitlerin elastisite modülünü arttırdığı ancak bu artışın düzgün ve doğrusal olmadığı belirlenmiştir.
- Bu kompozit numunelerin genel olarak kopma mukavemeti saf epoksiye göre genel olarak azalırken, sadece %5 silisyum karbür katkılı epoksi kompozitte artmaktadır. Silisyum karbür veya grafit katkılı numunelerde katkı oranı arttıkça numunelerin kopma mukavemeti sürekli olarak azalmaktadır. Ancak bor karbür katkılı numunelerde katkı oranı arttıkça bu numunelerin kopma mukavemetindeki değişim doğrusal değildir. %5'ten fazla katkı içeren numunelerin kopma mukavemeti çok düşük olduğundan, kopma mukavemeti açısından bu malzemelerin katkı oranlarının %5'i geçmemesine dikkat edilmelidir.
- Saf epoksiye grafit, silisyum karbür veya bor karbür ayrı ayrı eklenirse, bu kompozit malzemelerin genel olarak titreşim özellikleri iyileşir ve kopma dayanımları azalır. %5'ten fazla katkıların kullanılması mukavemeti daha da düşüreceğinden, bu katkıların %5'ten fazla kullanılmaması tavsiye edilir.

KAYNAKLAR

[1] **Ramakrishnan, S., Krishnamurthy, K., Rajeshkumar, G., Asim, M.** (2021). Dynamic Mechanical Properties and Free Vibration Characteristics of Surface Modified Jute Fiber/Nano-Clay Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(4), 1076–1088.

[2] **Miritoiu, C. M., Stanescu, M. M., Bolcu, D., Radoi, A. I., Nicolicescu, C., Dinita, A.** (2021). A Study About Some Mechanical Properties for Composites Reinforced with Corn Cob Powder. *Materıale Plastıce*, 58(4), 1–8.

[3] **Rafiee, M., Nitzsche, F., Labrosse, M. R.** (2019). Processing, manufacturing, and characterization of vibration damping in epoxy composites modified with graphene nanoplatelets. *Polymer Composites*, 40(10), 3914–3922.

[4] **Aizat, M., Karim, A., Zaman, I.** (2019). Vibration Control of Structure using Vibration Absorber Made from Polymer Reinforced Natural Fibers. *Advanced Research in Natural Fibers*, 1(1), 1–6.

[5] **Sumesh, K. R., Kanthavel, K.** (2020). Synergy of fiber content, Al_2O_3 nanopowder, NaOH treatment and compression pressure on free vibration and damping behavior of natural hybrid-based epoxy composites. *Polymer Bulletin*, 77(3), 1581–1604.

[6] **Abdellah, M. Y., Mohamed, A. F., Hasan, M. K.** (2019). Characteristic analysis: Vibration behaviour of composite laminated structures compared to monotonic materials. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 19(1), 57–69.

[7] **Partheeban, C. M. A., Jeevanantham, P.** (2018). Mechanical Properties and Vibration Damping Characteristics of Carbon / Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Polymer Composites. *International Research Journal of Automotive Technology (Irjat)*, 1(6), 101–109.

[8] **Erkliğ, A., Bulut, M., Fayzulla, B.** (2018). Toughening Effect of Microscale Particles on the Tensile and Vibration Properties of S-Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Composites. *Mechanics of Composite Materials*, 54(1), 119–128.

[9] **Khan, S. U., Li, C. Y., Siddiqui, N. A., Kim, J. K.** (2011). Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 71(12), 1486–1494.

[10] **Piratelli-Filho, A., Levy-Neto, F.** (2010). Behavior of Granite-Epoxy Composite Beams Subjected to Mechanical Vibrations. *Materıals Research-Ibero-Amerıcan Journal of Materıals*, 13(4), 497–503.

[11] **Keyte, J., Pancholi, K., Njuguna, J.** (2019). Recent Developments in Graphene Oxide/Epoxy Carbon Fiber-Reinforced Composites. *Frontıers In Materıals*, 6.

[12] **Liu, C., Li, M., Shen, Q., Chen, H.** (2021). Preparation and Tribological Properties of Modified MoS2/SiC/Epoxy Composites. *Materıals*, 14(7).

[13] **Su, Y., Shi, Q., Xie, Y., Shi, S., Lei, H.** (2021). Preparation and Properties of BN/Si_3N_4/Epoxy Composites. *Journal Of Macromolecular Scıence Part B-Physıcs*, 60(7), 461–471.

[14] **Gimenez, R., Serrano, B., San-Miguel, V., Carlos Cabanelas, J.** (2022). Recent Advances in MXene/Epoxy Composites: Trends and Prospects. *Polymers*, 14(6).

[15] **Yohanes, Sekiguchi, Y.** (2018). Synergistic Effects of Mixed Silica Micro-nanoparticles on Compressive Dynamic Stiffness and Damping of Epoxy Adhesive. *Journal Of Dynamıc Behavıor Of Materıals*, 4(2), 190–200.

[16] **D'Mello, J., D'Souza, A. G., Gowda, S. H., Pinto, D.** (2019). Experimental Investigation of Compression, Flexural Strength and Damping Behaviour of Granite Particulate Epoxy Matrix Composite. In B. K. Gopalakrishna and S. Mudradi (Eds.), *Emergıng Trends In Mechanıcal Engıneerıng 2018* (Vol. 2080).

[17] **Bozkurt, O. Y., Bulut, M., Erklig, A., Faydh, W. A.** (2019). Axial and lateral buckling analysis of fiber reinforced S-glass/epoxy composites containing nano-clay particles. *Composıtes Part B-Engıneerıng*, 158, 82–91.

[18] **Piratelli-Filho, A., Shimabukuro, F.** (2008). Characterization of Compression Strength of Granite-epoxy Composites Using Design of Experiments. *Materıals Research-Ibero-Amerıcan Journal of Materıals*, 11(4), 399–404.

[19] **Ghosh, P. K., Kumar, K., Kumar, A.** (2015). Studies on Thermal and Mechanical Properties of Epoxy-Silicon Oxide Hybrid Materials. *Journal Of Materıals Engıneerıng And Performance*, 24(11), 4440–4448.

[20] **Abdullah, S. I., Ansari, M. N. M.** (2020). Preparation and characterization of electrical properties of graphene oxide (GO)/epoxy composites. *Materıals Today-Proceedıngs*, 20(4), 474–477.

[21] **Kurita, H., Ishigami, R., Wu, C., Narita, F.** (2020). Experimental Evaluation of Tensile Properties of Epoxy Composites with Added Cellulose Nanofiber Slurry. *Strength Of Materıals*, 52(5), 798–804.

[22] **Bhatia, S., Angra, S., Khan, S.** (2021). A review on mechanical and tribological characterization of boron carbide reinforced epoxy composite. *Advanced Composıte Materıals*, 30(4), 307–337.

[23] **Bharadwaja, K., Rao, S. S., Rao, T. B.** (2021). Investigation of tensile and flexural behavior of epoxy and SiO2 composite: An experimental study. *Materıals Today-Proceedıngs*, 45(2), 2649–2652.

[24] **Fouly, A., Abdo, H. S., Seikh, A. H., Alluhydan, K., Alkhammash, H. I., Alnaser, I. A., Abdo, M. S.** (2021). Evaluation of Mechanical and Tribological Properties of Corn Cob-Reinforced Epoxy-Based Composites-Theoretical and Experimental Study. *Polymers*, 13(24).

[25] **Wang, Y., Yao, D., He, Z., Wang, D., Zheng, Y.** (2022). Enhanced mechanical and damping properties of epoxy using aggregated nanoparticles organic-inorganic hybrid as a filler. *Composıte Interfaces*, 29(5), 523–536.

[26] **Wei, Y., Li, H., Yang, H., Ma, Y., Cheng, J., Gao, P., Shi, J., Yu, B., Lin, F.** (2023). Damping and Mechanical Properties of Epoxy/316L Metallic Lattice Composites. *Materıals*, 16(1).

[27] **Stanescu, M. M., Bolcu, D., Pastrama, S. D., Ciuca, I., Manea, I., Baciu, F.** (2010). Determination of Damping Factor at the Vibrations of Composite Bars Reinforced with Carbon and Kevlar Texture. *Materıale Plastıce*, 47(4), 492–496.

[28] **de Borbon, F., Ambrosini, D., Curadelli, O.** (2014). Damping response of composites beams with carbon nanotubes. *Composıtes Part B-Engıneerıng*, 60, 106–110.

[29] **Rafiee, M., Nitzsche, F., Labrosse, M. R.** (2018). Effect of functionalization of carbon nanotubes on vibration and damping characteristics of epoxy nanocomposites. *Polymer Testıng*, 69, 385–395.

[30] **Bulut, M., Erklig, A., Kanmaz, P.** (2019). Vibration-damping characterization of the basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets. *Scıence And Engıneerıng Of Composıte Materıals*, 26(1), 147–153.

[31] **Avil, E., Kadioglu, F., Kaynak, C.** (2020). Contribution of carbon nanotubes to vibration damping behavior of epoxy and its carbon fiber composites. *Journal Of Reınforced Plastıcs And Composıtes*, 39(7–8), 311–323.

[32] **Albooyeh, A., Bayat, M., Rafieian, P., Dadrasi, A., Khatibi, M. M.** (2020). Silica aerogel/epoxy nanocomposites: Mechanical, vibrational, and morphological properties. *Journal Of Applıed Polymer Scıence*, 137(43).

[33] **Parida, S. P., Jena, P. C.** (2022). Free and forced vibration analysis of flyash/graphene filled laminated composite plates using higher order shear deformation theory. *Proceedıngs Of The Instıtutıon Of Mechanıcal Engıneers Part C-Journal Of Mechanıcal Engıneerıng Scıence*, 236(9), 4648–4659.

[34] **Baydemir, T.** (2020). Epoksi Reçine Teknolojileri. *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*, Aralık 2020, 24-33.

[35] **Jin, F.L., Li, X., Park, S.J.** (2015) "Synthesis and application of epoxy resins: A review", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 1-11.

[36] **Jin, F.-L., Park, S.-J.** (2008). Interfacial toughness properties of trifunctional epoxy resins/calcium carbonate nanocomposites. *Materials Science and Engineering: A*, 475(1), 190–193.

[37] **Ahmad, Z., Ansell, M. P., Smedley, D.** (2010). Effect of nano- and micro-particle additions on moisture absorption in thixotropic room temperature cure epoxy-based adhesives for bonded-in timber connections. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(6), 448–455.

[38] **Jin, F.-L., Park, S.-J.** (2012). Thermal properties of epoxy resin/filler hybrid composites. *Polymer Degradation and Stability*, 97(11), 2148–2153.

[39] **Morselli, D., Bondioli, F., Sangermano, M., Messori, M.** (2012). Photo-cured epoxy networks reinforced with TiO_2 in-situ generated by means of non-hydrolytic sol–gel process. *Polymer*, 53(2), 283–290.

[40] **Foix, D., Ramis, X., Serra, A., Sangermano, M.** (2011). UV generation of a multifunctional hyperbranched thermal crosslinker to cure epoxy resins. *Polymer*, 52(15), 3269–3276.

[41] **Url-1** <https://prezi.com/q7yyb93_ioko/polimer-kil-nanokompozitler >, 20.04.2023 tarihinde erişildi.

[42] **Yıldırım, H.** (2009). Değişik kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının incelenmesi. *Fırat üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 69s, Elazığ.

[43] **Işık, A.** (2008). Kompozit malzemelerden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 92s, İstanbul.

[44] **Url-2** < https://www.ceyrekmuhendis.com/kompozit-uretim-yontemleri/ >, 21.04.2023 tarihinde erişildi.

[45] **Url-3** < https://levtems.com/kompozit-malzemelerin-uretim-yontemleri/>, 22.04.2023 tarihinde erişildi.

[46] **Inman, D. J.** (2014). Engineering vibration (Vol. 4). *University of Michigan*, 707p, USA.

[47] **Szeidl, G., Kiss, L. P.** (2020). Mechanical Vibrations. *Springer International Publishing*, 448p, Switzerland.