TERMOPLASTİK KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM SÖNÜMLEME DAVRANIŞLARI

Burak MATYAR

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMOPLASTİK KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM SÖNÜMLEME DAVRANIŞLARI

Burak MATYAR
0000-0001-6483-8812

Prof. Dr. Murat YAZICI
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMOPLASTİK KOMPOZİT KİRİŞLERİN TİTREŞİM SÖNÜMLEME DAVRANIŞLARI

Burak MATYAR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitler otomotiv başta olmak üzere her tür araç üreticisinin ilgisini çekmektedir. Konvansiyonel kompozitlerdeki gibi yüksek özgül mukavemet ve yüksek özgül rijitlik göstermelerinin yanı sıra, termoplastik matris malzemesinin viskoelastik ve viskoplastik özelliklerinin bir sonucu olarak titreşim sönümleme açısından davranışlarını tespit etmek önemlidir. Yüksek lisans tez çalışması kapsamında termoplastik kompozit yapıların titreşim sönümleme davranışları deneysel ve Sonlu Elemanlar Analiz yöntemi ile incelenmiştir. Titreşim sönümleme davranışlarının incelenmesi için bir çelik kiriş numune ve hacimce %45 sürekli cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit malzemeden üretilen bir kiriş numune kullanılmıştır. Bir ucu ankastre mesnetli diğer ucu serbest kiriş numunelere darbe çekici yöntemi ile modal testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda kirişlerin ilk 3 doğal frekans modu incelenmiştir. Sonlu elemanlar analiz yöntemi ile elde edilen veriler test verileri ile karşılaştırılmıştır. Darbe çekici yöntemi ile modal analiz testlerinden elde edilen veriler üzerinden çelik ve kompozit kiriş numunelerin dinamik sönüm oranları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda çelik kirişin dinamik sönüm oranı 0,012 olarak, kompozit kirişin dinamik sönüm oranı ise 0,02068 olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Darbe çekici, Modal analiz, Termoplastik kompozit, Doğal frekans, Titreşim sönümleme.
2022, viii + 60 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

VIBRATION DAMPING BEHAVIOR OF THE THERMOPLASTIC COMPOSITE BEAMS

Burak MATYAR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

Continuous fiber-reinforced thermoplastic composites attract the attention of all kinds of vehicle manufacturers, especially automotive. In addition to their high specific strength and high specific stiffness as in conventional composites, it is important to determine their behavior in terms of vibration damping as a result of the viscoelastic and viscoplastic properties of the thermoplastic matrix material. Vibration damping behaviors of thermoplastic composite structures were investigated by experimental and Finite Element Analysis method within the scope of the master thesis. A steel beam sample and a beam sample made of 45% continuous glass fiber reinforced polypropylene composite material by volume were used to examine the vibration damping behaviors. Modal tests were carried out with the impact hammer method on cantilever beam specimens, one end of which is fixed and the other end is free. As a result of the tests, the first 3 natural frequency modes of the beams were examined. The data obtained by the finite element analysis method were compared with the test data. The dynamic damping ratios of steel and composite beam samples were calculated based on the data obtained from the modal analysis tests with the impact hammer method. As a result of the calculations, the dynamic damping ratio of the steel beam was found to be 0.012 and the dynamic damping ratio of the composite beam to be 0.02068.

Keywords: Impact hammer, Modal analysis, Thermoplastic composite, Natural frequency, Vibration damping
2022, viii + 60 pages.

TEŞEKKÜR

Bu eserin yazımı sırasında maddi ve manevi katkılarını esirgemeyen, bana bu süreçte her zaman destek olan annem Birgül Matyar‘a, babam Zafer Matyar‘a, kardeşim Barış Matyar‘a teşekkür ederim.
Lisansüstü eğitim hayatımız boyunca bizleri akademik olarak yetiştiren ve her türlü desteğini her zaman yanımda hissettiğim değerli hocam Prof. Dr. Murat Yazıcı’ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu eserin yazımında manevi desteklerinden ötürü kendilerinden çok şey öğrendiğim ağabeylerim, Harun Güçlü, Gönenç Duran, Hakkı Özer ve mesai arkadaşlarım Mehmet Umut Erdaş, Muhammed Dönmez, Mehmet Kopar, Çağatay Özada ve Sami Torbalı’ya teşekkür ederim.
Son olarak manevi desteklerini her zaman bana hissettiren yakın arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Burak Matyar
../../2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ viii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Kompozit Malzemeler 3
2.1.1 Polimer Matrisler 4
2.1.2. Takviye Elemanları 7
2.2. Temel Titreşim Teorisi 10
2.2.1. Titreşim 10
2.2.2. Frekans ve Rezonans 11
2.2.3. Titreşim Analizi 11
2.2.4. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler 12
2.2.4.1 Sönümsüz Serbest Titreşimler 12
2.2.4.2 Sönümlü Serbest Titreşimler 14
2.2.4.3 Sönümsüz Zorlanmış Titreşimler 17
2.2.5. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler 19
2.2.6 Deneysel Modal Analiz ve Titreşim Ölçümü 20
2.2.7. Frekans Cevap Fonksiyonu 23
2.2.8. Kiriş Titreşimi 26
2.2.9. Literatürdeki Çalışmalar 29
3. MATERYAL VE YÖNTEM 32
3.1. Malzemeler 32
3.2. Kompozit Malzeme Üretimi 32
3.3. Modal Test Düzeneği Ekipmanları 34
3.4. Darbe Çekici Yöntemi ile Modal Test Uygulaması 39
3.5. Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi 42
4. BULGULAR 46
4.1. Sonlu Elemanlar Analizleri 46
4.2. Darbe Çekici ile Modal Test Bulguları 51
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 56
KAYNAKLAR 58
ÖZGEÇMİŞ 60

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
v_0	Başlangıç hızı
[C]	Viskoz sönüm matrisi
[D]	Sönüm matrisi
[K]	Katılık matrisi
[M]	Kütle matrisi
[Z]	Dinamik direngenlik matrisi
A	Alan
b	En
c	Viskoz sönüm katsayısı
E	Elastisite Modülü
f	Frekans
F	Zamandan bağımsız kuvvet
F_0	Harmonik kuvvet
h	Kalınlık
H(ω)	Frekans tepki fonksiyonu
I	Atalet momenti
j	$\sqrt{-1}$
k	Yay katsayısı
k	Yay sabiti
L	Boy
m	Kütle
m	Kütle [kilogram]
t	Zaman
T	Periyot
V	Hacim
X	Titreşim genliği
X	Zamandan bağımsız cevap
x(t)	Zamana bağımlı cevap fonksiyonu
x_0	Başlangıç deplasmanı
α(ω)	Frekans cevap fonksiyonu
δ	Logaritmik azalma oranı
ζ	Dinamik sönüm oranı
λ	Öz değer
ρ	Yoğunluk
τ	Periyot
υ	Poisson oranı
φ	Faz açısı
ω_A	Tahrik frekansı
ω_n	Doğal frekans

Kısaltmalar	Açıklama
cm	Santimetre
CTE	Termal Genleşme Katsayısı

FFT	Fast Fourier Transform
FRF	Frekans Cevap Fonksiyonu
FTF	Frekans Tepki Fonksiyonu
g	Gram
GPa	Gigapascal
Hz	Hertz
kg	Kilogram
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PVC	Poli vinil klorür
s	Saniye
V	Volt

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Matris malzemelerinin sınıflandırılması	4
Şekil 2.2.	Polimer malzemelerde tekrarlayan yapılar a) Polietilen (PE) b) Polivinil klorür (PVC) ve c) Polipropilen (PP)	5
Şekil 2.3.	Takviye malzemelerin yapılarına göre sınıflandırılması	7
Şekil 2.4.	Takviye malzemelerinin orijinlerine göre sınıflandırılması	8
Şekil 2.5.	Sönümsüz serbest titreşim modeli	12
Şekil 2.6.	Sönümlü serbest titreşim modeli	14
Şekil 2.7.	Sönümsüz zorlanmış titreşim modeli	17
Şekil 2.8.	Rezonans durumu	18
Şekil 2.9.	İki serbestlik dereceli sönümsüz sistem modeli	19
Şekil 2.10.	Piezoelektrik ivmeölçerin şematik yapısı	22
Şekil 2.11.	Deneysel Modal Analiz	23
Şekil 2.12.	Euler-Bernoulli ankastre kiriş modeli	26
Şekil 2.13.	Titreşim hareketi sönümlü salınım grafiği	28
Şekil 3.1.	Polipropilen esaslı sürekli cam elyaf takviyeli kompozit kiriş malzeme.	34
Şekil 3.2.	KISTLER Piezotron Type 8778A500 ivmeölçer	35
Şekil 3.3.	KISTLER Type 9722A500 darbe çekici	36
Şekil 3.4.	Geliştirilen veri toplama cihazına ait elektronik kart	37
Şekil 3.5.	Veri toplama cihazı çalışma prensibi akış şeması	38
Şekil 3.6.	Bilgisayarda kullanılan veri analiz programının çalışma prensibi akış şeması	39
Şekil 3.7.	Darbe çekici ile modal test düzeneği A) Kiriş numune, B) İvmeölçer, C) Darbe çekici, D) Güç kaynağı, E) Veri toplama cihazı ve F) Bilgisayar ve veri analiz programı	40
Şekil 3.8.	Test numunesine darbe çekici uygulanması	41
Şekil 3.9.	Analiz programı veri inceleme ekranı	42
Şekil 3.10.	Kiriş tasarım modeli ve ankastre sınır şartı uygulaması	43
Şekil 3.11.	Kiriş sonlu elemanlar modeli	44
Şekil 3.12.	Kompozit malzeme katman gösterimi ve elyaf yönlenmeleri	45
Şekil 4.1.	Çelik kirişin birinci mod doğal frekans davranışı	47
Şekil 4.2.	Çelik kirişin ikinci mod doğal frekans davranışı	47
Şekil 4.3.	Çelik kirişin üçüncü mod doğal frekans davranışı	48
Şekil 4.4.	Kompozit kirişin birinci mod doğal frekans davranışı	49
Şekil 4.5.	Kompozit kirişin ikinci mod doğal frekans davranışı	49
Şekil 4.6.	Kompozit kirişin üçüncü mod doğal frekans davranışı	50
Şekil 4.7.	Çelik kiriş için veri analiz ekranı	51
Şekil 4.8.	Çelik kiriş için doğal frekans modları	52
Şekil 4.9.	Kompozit kiriş için veri analiz ekranı	53
Şekil 4.10.	Kompozit kiriş için doğal frekans modları	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Hacimce %45 sürekli cam elyaf takviyeli polipropilen malzeme özellikleri 33
Çizelge 3.2. Testlerde kullanılan çelik kirişin bazı özellikleri..... 34
Çizelge 4.1. Sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilen doğal frekans modları... 50
Çizelge 4.2. Uygulamalı testler sonucu doğal frekans modları 54
Çizelge 4.3. Çelik ve kompozit kiriş karşılaştırmalı doğal frekans değerleri 54
Çizelge 4.4. Çelik ve kompozit kiriş karşılaştırmalı dinamik sönüm oranları..... 55

1. GİRİŞ

Günümüzde gittikçe gelişen teknoloji, her sektörde olduğu gibi otomotiv sektöründe de artan yeniliklerin sayısını gün geçtikçe çoğaltmaktadır. Artan yenilikler ile birlikte üretilen taşıtlarda da kullanılan birçok farklı sistemde ve üründe istenilen ve dikkat edilen özelliklerin sayısının artmasına yol açmaktadır. Artan bu ilgi araçlarda yüksek güvenlik ve güvenilirlik, yakıt tasarrufu, egzoz emisyonlarının düşüklüğü ve yüksek performans gibi bazı talepleri de beraberinde getirmektedir. Taşıt performansını ve bahsettiğimiz bu talepleri karşılamak adına otomotiv sektöründe yapılan yeniliklerden birisi de metal malzemeler kullanmak yerine alternatif malzemelere yönelmektir. Özellikle elektrikli ve hibrit taşıtların üretimlerinin artması ve insanlar tarafından tercih edilmeye başlamasından sonra taşıt hafifliği önemli bir rol kazanmıştır. Elektrikli ve hibrit taşıtların bataryaları, taşıtın toplam ağırlığının büyük bir kısmını oluşturmaktadırlar. Daha uzun menziller gidebilmek için büyük bataryalara ihtiyaç duymasından kaynaklı taşıt ağırlığı da artmaktadır. Bu sebeplerden ötürü taşıt hafifletme çalışmaları oldukça popüler hale gelmiştir. Bu amaçla metal malzemelerin yerini tutabilecek hem hafifletme sağlayacak hem de mukavemetinden ödün vermeyecek kompozit malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. Otomotiv sektöründe günümüzde en yaygın kullanılan kompozit malzemeler, karbon elyaflı ve cam elyaflı kompozitlerdir. Taşıtların birden fazla bölgesinde aktif olarak sıklıkla kullanılır hale gelmişlerdir. Özellikle çarpışma kutuları, tavan, motor kaputu gibi daha birçok bölgede kompozit malzemelere rastlamak mümkündür.

Taşıtlarda talep edilen belli teknolojik ve performansa dayalı özelliklere ek olarak en çok talep edilen özelliklerden biri de konfordur. İnsanlar tarafından istenilen ve ilgi gören konforun kötüleşmesine yol açan etkenler ise farklı kaynaklardan oluşan titreşimler ve titreşimden kaynaklanan gürültülerdir. Taşıt üzerinde hissedilen titreşimlerin temel kaynakları motor ve aktarma organı titreşimleri, aerodinamik kuvvetler, lastik ve lastiğin bağlı olduğu grubun statik dengesizlikleri ve en önemlisi yol düzgünsüzlüklerinden kaynaklanan titreşimler olarak örneklenebilir. Gövdeye ve özellikle yolculara yansıyan bu titreşimlerin sönümlenmesi taşıt ömrü ve yapısı açısından önemli olduğu gibi aynı zamanda da yolcu sağlığı ve güvenliği açısından da çok önemlidir. Her ne kadar titreşim

sönümleme açısından taşıtlarda süspansiyon grubu parçaları önemli rol oynasa da bu her zaman tek başına yeterli bir seçenek olmamaktadır. Dolayısıyla malzeme hafifletme çalışmalarının yanında kullanılan alternatif malzemelerin de titreşim sönümleme özellikleri üzerine çok sayıda ciddi çalışma yapılmaktadır. Bu alanlarda kullanılan parçaların birçoğu kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Özellikle polipropilen (PP) matrisli termoplastik kompozit malzemelerden üretilen parçalar korozyona karşı koruma, hafiflik, kolay şekillendirilebilme ve dayanım gibi özelliklerin yanı sıra titreşim ve gürültü sönümleme amaçlı da kullanılmaktadırlar.

Bu tez kapsamında çelik ve kompozit kirişlerin darbe çekici yöntemi ile modal analizi gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada PP matrisli cam elyaf takviyeli bir kompozit malzeme üretilmiştir. İkinci aşamada bir çelik kiriş numuneye ve üretilen kompozit kiriş numunesine darbe çekici yöntemi ile modal analiz uygulanmıştır. Bu testlerden kirişlerin doğal frekansları ve dinamik sönüm katsayıları hesaplanmıştır. Üçüncü aşamada ise aynı testler bir sonlu elemanlar programı yardımı ile modellenmiş ve analiz edilmiştir. Son olarak teorik hesaplamalar, yapılan test sonuçları ve sonlu elemanlar yardımı ile bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, takviye malzemesi, matris malzemesi ve katkı maddeleri olmak üzere iki veya daha fazla bileşenden oluşabilen, birbiri içerisinde çözünmeden bir arada duran yapı malzemelerine denir. Matris sürekli bir fazdır ve takviye malzemelerini bir arada tutmaya yarar. Takviye fazı ise lif, elyaf, partikül ve pul formlarında bulunabilir. İki veya daha fazla bileşenin birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler, kendini oluşturan malzemelerin özelliklerinden daha iyidir ve daha dayanıklı sonuçlar verir (Kaw, 2006).

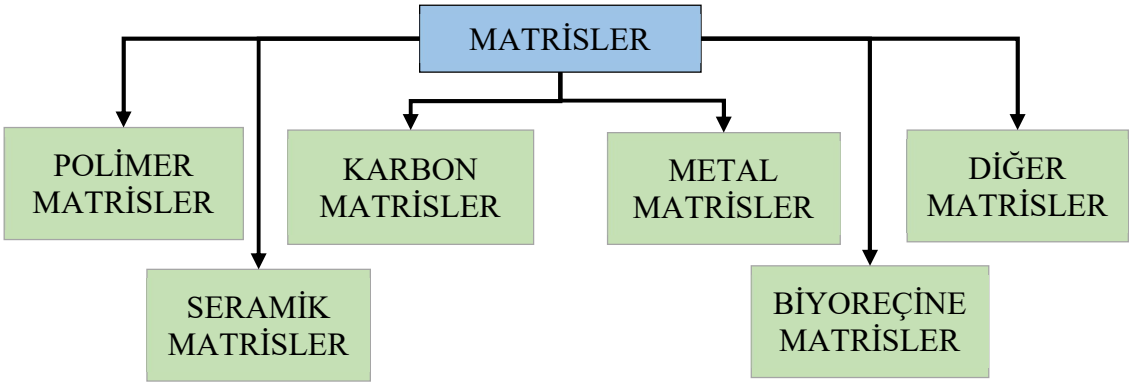
Kompozit malzemelerde kullanılan takviye fazının özellikleri şunlardır:

1. Kompozit malzemeye uygulanan kuvvetin büyük çoğunluğunu bu faz taşır.
2. Mukavemet, termal stabilite ve sertlik sağlar.
3. Takviye malzemesinin yapısına bağlı olarak elektriksel iletkenlik ya da yalıtım sağlar (Mazumdar, 2002).

Kompozit malzemeyi oluşturan matris fazı da takviye kadar önemli özelliklere sahiptir. Bu fazın özellikleri ise şunlardır:

1. Matris malzemesi takviye malzemelerini birbirine bağlar ve yükü takviye elemanlarına dağıtır.
2. Takviye elemanlarının bir arada durmasını sağlar ve tek başına hareket etmelerini engeller.
3. İyi bir yüzey kalitesi sağlar.
4. Matris malzemesi, mekanik hasarlar ve çeşitli kimyasal etkilere karşı takviye malzemelerini korur.
5. Seçilen matris malzemesine bağlı olarak malzemenin bazı özellikleri (süneklik, darbe dayanımı, vb.) etkilenir. Daha sünek bir matris, yapının tokluğunu arttırır. Daha yüksek tokluk gereksinimleri için ise termoplastik bazlı kompozit malzemeler tercih edilmelidir. (Mazumdar, 2002).

Matris elemanları Şekil 2.1'de görüldüğü gibi polimer, metal, seramik gibi malzemelerden meydana gelmektedir.

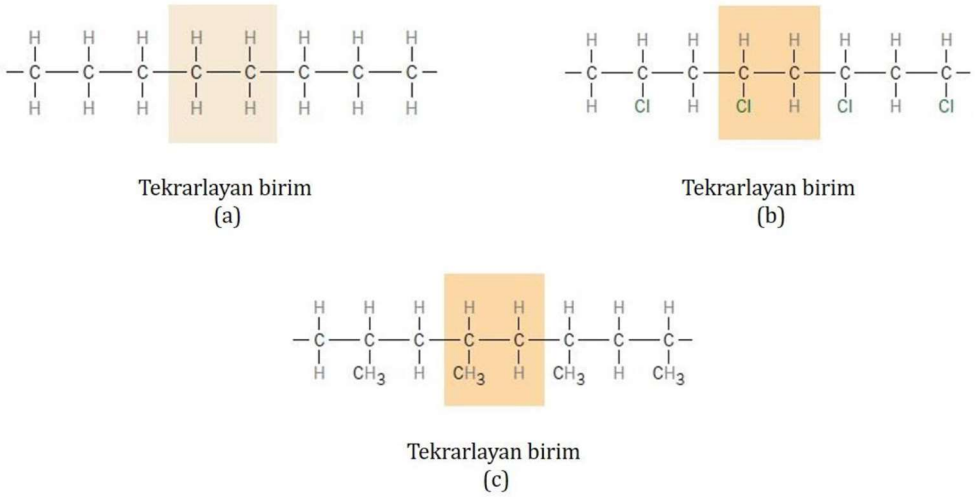


Şekil 2.1. Matris malzemelerinin sınıflandırılması (Beşergil, 2016)

Kompozit malzemeler arasında en yaygın ve en gelişmiş olanı polimer matrisli kompozit malzemelerdir. Bunun nedenleri arasında maliyetinin diğer matris malzemelerine göre düşük olması, yüksek mukavemet değerleri elde edilebilmesi ve basit üretim yöntemleri olması bulunur.

2.1.1 Polimer Matrisler

Polimerler, monomer adı verilen küçük moleküllerden oluşmaktadırlar. Bu monomerler kimyasal bağlar yardımı ile birbirine bağlanırlar. Bu sayede makromoleküler boyutta yeni bir malzeme meydana gelir. Monomerlerin oluşturduğu bu malzemelere polimer malzemeler adı verilir. Polimer matrisli malzemelerde matris malzemesi olarak polimerler kullanılmaktadır. Polimer kelime anlamı olarak Yunancada poli (çok) ve mer (tekrarlayan birim) kelimelerinin birleşiminden oluşmaktadır. Monomerler de polimerlerin tekrarlar halinde birbirine eklenmesi ile oluşur. Şekil 2.2 de bazı polimerlerin zincir yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Polimer malzemelerde tekrarlayan yapılar **a)** Polietilen (PE) **b)** Polivinil klorür (PVC) ve **c)** Polipropilen (PP) (Callister & Rethwish, 2009)

Termoset malzemeler, ısıyla sertleşen ve geri dönüştürülemez malzemelerdir. Bu malzemelerin sertleşmesi ısı, kızılötesi ve ultraviyole ışıkları, kimyasal reaksiyonlar gibi faktörler ile gerçekleşebilir. Bu tepkime ve reaksiyonların ardından ise malzemenin tekrar kullanılmak üzere geri dönüşümü mümkün değildir. Termoset malzemeler, ucuz oluşu ve kolay işlenmesiyle sıklıkla kullanılmıştır.

Termoset malzemelerin avantajları arasında, yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı olması, esnekliği yüksek olması, yüksek boyutsal kararlılık seviyeleri, ilk yatırım maliyetlerinin daha ucuz olması gösterilebilir. Dezavantajları arasında ise, geri dönüştürülemez olması ve şekilsel deformasyona uğraması durumunda yeniden şekillendirilip düzeltilemez olması gösterilebilir.

Sektörde sık kullanılan termoset reçineler aşağıda verilmiştir.

- ✓ Epoksi, vinilester, fenolikler, silikonlar, poliüretanlar, siyanat esterler, polimitler, stiren-bütadien kopolimerleri

Günümüzde termoplastik malzemeler daha ön plana çıkmaktadır. Çapraz bağlı olmayan termoplastik matris malzemeleri, geri dönüştürüldükten sonra yeniden kullanılabilir olmasıyla tercihler arasında önemli yer tutmaktadır. Termoset malzemelere göre birçok üstünlüğü bulunan termoplastikler, kürleşme prosesine ihtiyaç duymaması, darbe

dayanımı, sıfır emisyon değeri ve seri üretime olan uygunluğuyla öne çıkmaktadır. Bunun yanında, diğer termoplastikler malzemeler ile kolay bağ kurma yapısına sahip olmaları da kullanışlılığını artırır. (Park, 2018)

Termoplastik malzemelerin avantajları arasında, geri dönüşüme uygunluk, yüksek darbe dayanımı, yeniden şekillendirme, kimyasallara karşı yüksek dayanım, yüzeysel açıdan daha estetik olmaları gösterilebilir. Dezavantajları arasında ise, ilk yatırım ve kalıp maliyetlerinin yüksek olması gösterilebilir.

Sektörde sık kullanılan termoplastik reçineler aşağıda verilmiştir.

- ✓ Polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistiren, akrilik polimer, polikarbonat, poliamid, polietilen tereftalat, asetaller

- **Polipropilen (PP)**

Polipropilen, maliyeti düşük olan, düşük yoğunluklu, çok yönlü kullanılabilen bir plastik türüdür. Termoplastik malzemeler içerisinde en düşük yoğunluğa (ortalama 0.9 g / cm^3) sahiptir. Yüksek sertlik, iyi kimyasal direnç ve yorulma direnci açısından kullanıma uygun bir malzemedir. Elektrik iletkenliği de oldukça düşüktür. Polipropilen, makine parçaları, otomobil parçaları (fanlar, pano panelleri vb.) ve diğer ev eşyaları için sıklıkla tercih edilir ve ayrıca çeşitli takviyelerle donatılabilir. Ayrıca kalıplanabilme özelliğine sahip olduğundan dolayı, otomotiv sektöründe otomobillerde kullanılan tüm plastik malzemelerin yarısından fazlasını oluşturur (Mazumdar, 2002).

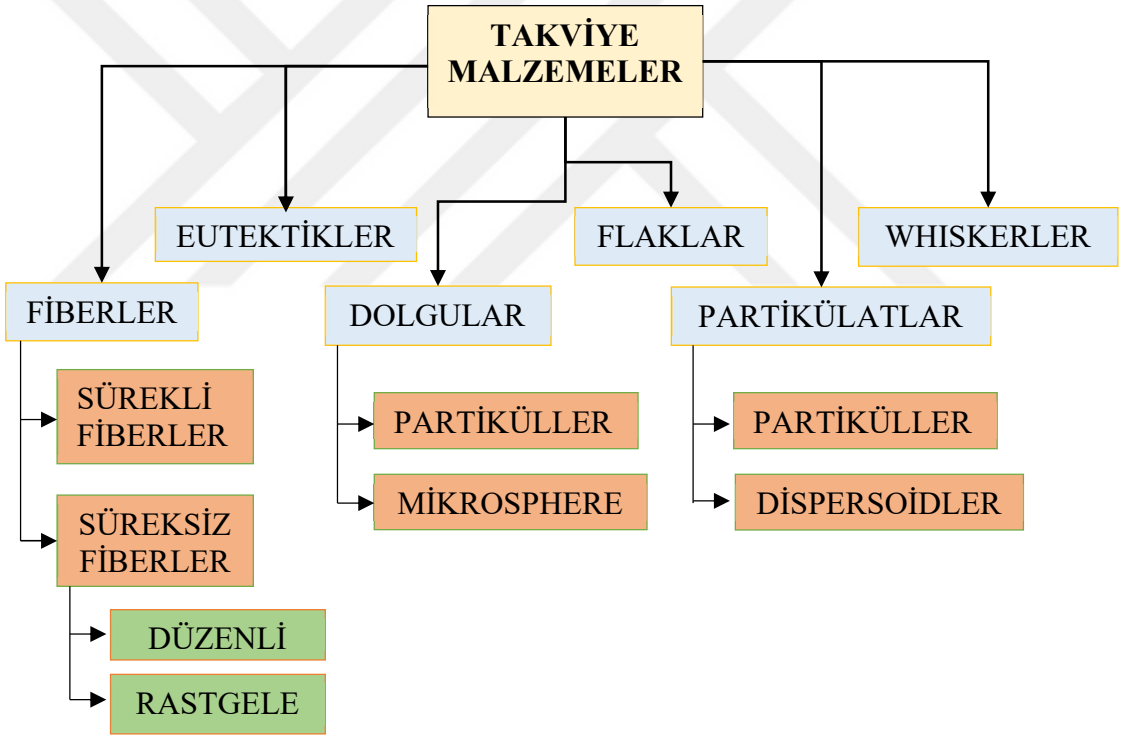
2017 yılında yayınlanan Türkiye Otomotiv Plastikleri Sektör Raporu'na göre 2010-2016 yılları arasında otomotiv sektöründe kullanılan plastik hammaddeler arasında polipropilen %23,3 tüketim yüzdesine sahiptir. Polipropilenden sonra en çok kullanılan malzemeler, %17 ile poliüretan ve %12,3 ile poliamid olmuştur. Bu rapordan da görüleceği üzere polipropilen malzeme otomotiv sektöründeki diğer plastik malzemelere oranla en çok tüketilen malzeme olmuştur (Pagev, 2017).

Reçine esaslı otomotiv parçalarında, düşük ağırlık, daha iyi tasarım ve kalıplanabilme özelliği talep edilmektedir. Bu taleplere karşılık verebilecek olan PP bileşikleri üzerinde çeşitli uygulamalar yapılarak malzeme özellikleri iyileştirilmiştir. Şimdiye kadar yapılan iyileştirmeler arasında sertlik, darbe dayanımı ve akışkanlığı arttırmaya yönelik çalışmalar yer almaktadır. İstenen özelliklerin karşılanabilmesi için polipropilen

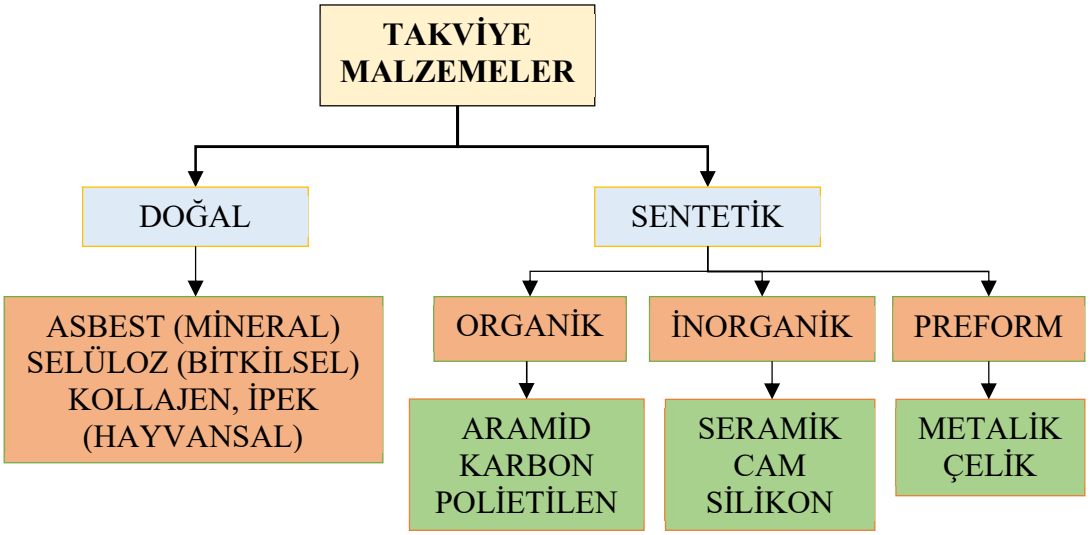
malzemelere çeşitli malzemeler takviye edilmesinin yanı sıra üretim yöntemlerinde de gelişmeler sağlanmaktadır. (Moritomi, 2010)

2.1.2. Takviye Elemanları

Kompozit malzemelerin temel bileşenlerinden olan takviye elemanları, temel olarak matris malzemesinin dayanımını artırmak için kullanılmaktadır. Takviye fazı olarak adlandırılan bu faz, matris içinde dağınık ya da düzenli yerleştirilmiş şekillerde bulunabilir. Matris ile çözünmeden birbirine bağlanan bu elemanlar, yapılarına ve orijinlerine göre sınıflandırılırlar. Yapılarına ve orijinlerine göre sınıflandırılan bu takviye elemanlarına Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te yer verilmiştir.



Şekil 2.3. Takviye malzemelerin yapılarına göre sınıflandırılması (Kuzu, 2021)



Şekil 2.4. Takviye malzemelerinin orijinlerine göre sınıflandırılması (Kuzu, 2021)

Kompozit hazırlamada kullanılan liflere cam elyaflar, karbon elyaflar, aramid elyaflar, bor, polietilen, poliamit, poliester, doğal lifler veya dokumalar örnek olarak verilebilir. Bu lifler arasında cam elyaflar daha çok genel amaçlı ticari kompozitlerde kullanılmaktadır. İleri kompozit malzemelerde ise karbon elyaflar ve aramid elyaflar tercih edilmektedir (Bodur, 2016).

Ağırlıklarının hafif olması ve metalik malzemelere göre özgül mukavemetlerinin üstün olması nedeniyle fiber takviyeli kompozitler dikkat çeken malzemeler olmuşlardır. Bu sebeple kompozit malzemeler, havacılık, otomotiv ve inşaat endüstrileri gibi çok sayıda mühendislik alanında sıklıkla kullanılmaktadır.

- **Karbon Elyaflar**

Mukavemetlerinin yüksek olması, sert ve hafif malzemeler olması yönünden öne çıkan karbon fiberler, kompozit malzemeler arasında önemli bir takviye malzemesi haline gelmiştir.

Termal ve elektrik iletkenlikleri iyi olan karbon fiberlerin, fiber yönündeki CTE değeri negatiftir. Yüksek modüllü karbon fiberler kusurlara karşı daha hassastır ve kuvvetleri daha düşüktür.

Karbon fiberlerin bazı genel özellikleri:

- 1800 kg/m^3 yoğunluğu olan karbon fiberler, diğer takviye lifleri arasında en yüksek özgül modül ve özgül kuvvete sahiptir.
- Karbon fiberler, yüksek gerilme modülü ve gerilme kuvveti özelliklerini yüksek sıcaklıklarda da sürdürürler. Yüksek sıcaklıklarda oksitlenme sorunları ortaya çıkarabilir.
- Nemden oda sıcaklığında etkilenmeyen karbon fiberler, farklı özellikteki çözücülerin, asitlerin ve bazların birçoğuna karşı dayanıklıdır.
- Karbon fiber ile üretilen kompozitler çok çeşitli fiziksel ve mekanik özellikte olabilirler. Bu çeşitliliği sağlaması bakımından karbon fiber malzemeler, bu alanda önemli olduğunu kanıtlamaktadır.

Karbon (grafit) fiberlerin önemli bir dezavantajı kırılgan olmalarıdır. Karbon fiberler tümüyle kristalin yapıda değildir, grafitik ve non-kristalin bölgelerin her ikisini de içerir; kristalin olmayan bölgelerde, grafit için karakteristik olan üç boyutlu hekzagonal karbon ağ yapısı bulunmaz (Beşergil, 2021).

- **Cam Elyaflar**

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler arasında takviye malzemesi olarak en çok tercih edilen malzemelerden biri olan cam elyaflar, amorf bir malzeme olup polimer yapıya sahiptir. Cam elyaflar sıradan şişelerin kullanımından saflık oranı yüksek malzemelere kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu elyaflar, yüksek mukavemet, kimyasal zararlara karşı direnç, sertlik, esneklik gibi birçok önemli özelliğiyle öne çıkar. Cam elyafların sıklıkla tercih edilme sebepleri aşağıda verilmiştir.

- Özgül mukavemet ve çekme mukavemeti değerleri çelikten daha yüksektir.
- Kimyasal malzemelere karşı dirençlidir.
- Elektriği iletmediği için yalıtımın önem kazandığı durumlarda öne çıkabilirler.
- Isıl direnci düşüktür. Yüksek sıcaklıkta yumuşama durumu gösterirler ancak yanmazlar.
- Nem absorbe etme özelliği yoktur. Matris ile elyaf arasında nemden kaynaklı çözülme görülebilir. Elyaf kaplama yöntemleri ile bu durumun üstesinden gelinebilir. (Özer, 2015)

- **Aramid Elyaflar**

Aramid kelimesi “aromatik poliamid” in kısaltılmış adı olarak kullanılmaktadır. Yüksek fiziksel, kimyasal, mekanik özellikleri sayesinde öne çıkar. Birçok kumaştan daha iyi özgül sertliğe ve özgül mukavemete sahiptir. Havacılık, otomotiv ve askeri alanlardaki çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. (Kuzu, 2021)

Aramid elyafların tercih edilme sebepleri ve bazı dezavantajları aşağıda verilmiştir.

- Aramid, grafit elyaflarda olduğu gibi elyaf ekseni doğrultusunda çok iyi mekanik özellik sergilerken elyaflara dik doğrultuda düşük mekanik değerlere sahiptir.
- Aramid elyaflar ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerine sahiptir.
- Darbe direnci yüksektir, gevrekliği grafitin gevrekliğinin yarısı kadardır. Bu nedenle kolay sekil verilebilir.
- Doğal kimyasallara dirençlidir ancak asit ve alkalilerden etkilenir.
- Üstün mekanik özellikleri, konforu ve hareket kabiliyeti nedeniyle kurşun geçirmez malzemelerde kullanılmaktadır. (Özer, 2015)

2.2. Temel Titreşim Teorisi

2.2.1. Titreşim

Titreşim, cisimlerin sabit bir referans eksene göre tekrarlanan salınım hareketi olarak ifade edilir. Bu salınım, bir sarkaç hareketi gibi periyodik şekilde olabileceği gibi, pürüzlü yüzeyde hareket eden bir cismin titreşimi gibi rastgele de olabilir. Titreşim teorisi cisimlerin ve bu cisimler üzerindeki kuvvetlerin salınımlı hareketleri ile ilgilenir. Titreşimin en basit hali olan harmonik hareket $x(t) = Xcos(\omega t)$ ya da $x(t) = Xsin\,(\omega t)$ şeklindeki matematiksel formüller ile ifade edilir. Bu eşitlikte X hareketin genliğini, ω frekansını ve t de zamanı ifade etmektedir.

2.2.2. Frekans ve Rezonans

Frekans, periyodik bir hareketin belirli aralıkta kaç kez tekrarlandığını ölçen bir büyüklük şeklinde ifade edilir. Bu büyüklük Hertz (Hz) ile ölçülür ve s^{-1} olarak ifade edilir. Pratikte her elemanın fiziksel özelliklerine bağlı olarak belirli titreşim frekans değerleri mevcuttur. Bu frekans değerlerine doğal frekans denir.

Rezonans, mekanik, akustik ya da elektriksel titreşim yapan sistemlerin, kendi doğal frekanslarına yakın frekans değerlerinde titreşim yapmaları durumu şeklinde ifade edilir. Periyodik etki altındaki sistemlerde titreşim frekans değeri, sistem frekansı ile eşit olduğunda sistem rezonansa girer ve titreşim genlikleri çok yüksek olur. Bu istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkar. Rüzgara maruz kalan köprülerde, deprem anında binalarda meydana gelebilecek bir durumdur.

2.2.3. Titreşim Analizi

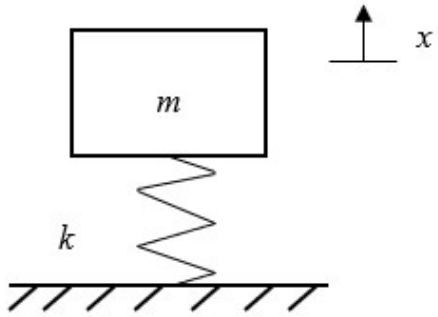
Titreşim analizi temel olarak, sisteme uygulanan tahrik kuvvetine ($\{f(t)\}$) karşılık sistemin cevabını ($\{x\}$) zamanın (t) bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Malzemelerin fiziksel özelliklerinin etkileşimi olarak titreşim oluşur. Sistemin giriş ve çıkışı arasındaki matematiksel ilişki yapısal dinamikte bu fiziksel özellikler tarafından formüle edilir. Tanımlanan model ilişkileri kuvvet dengesine dayalı olan Newton'un ikinci kanunu veya enerjinin korunumu temeline dayanmaktadır. Enerji temeline dayalı olan Lagrange yöntemi çok serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemlerinin elde edilmesinde kullanışlı bir yöntem olarak karşımıza çıkar. Harekete denklemleri, mekanik sistemlerde titreşim analizi yapılabilmesi için oldukça önemlidir. Yapıların dinamik davranışları hakkında fikir edinilmesinde önemli rol oynar.

Titreşim hareketi, bazı özelliklerine göre değişik şekillerde sınıflandırılabilir. Serbestlik derecesine göre, tek veya çok serbestlik dereceli olarak ikiye ayrılırlar. Bununla birlikte, dışarıdan verilecek tepki kuvvetine göre, serbest ya da zorlanmış titreşimler olarak da ayrılırlar. Ayrıca sönüm durumuna göre sönümlü ve sönümsüz titreşimler olarak da sınıflandırılabilirler.

2.2.4. Tek Serbestlik Dereceli Sistemler

2.2.4.1 Sönümsüz Serbest Titreşimler

Newton'un 2. Hareket Kanunu'na göre Şekil 2.5.'e karşılık gelen matematiksel model (2.1) eşitliğinde verilmiştir.



Şekil 0.1. Sönümsüz serbest titreşim modeli

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

Burada m kütleyi, k yay sabitini ve x titreşim genliğini ifade etmektedir. Eşitlikte her bir terim kütleye bölündüğünde;

$$\ddot{x} + x\frac{k}{m} = 0 \;\rightarrow\; \ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \tag{2.1a}$$

$$x(t) = Ce^{\lambda t} \tag{2.2}$$

çözüm önerisi yapılırsa;

$$\lambda^2 + \omega_n^2 = 0 \tag{2.3}$$

karakteristik denklemi elde edilir.

$$\lambda^2 + \omega_n^2 = 0 \rightarrow \lambda = \sqrt{-\omega_n^2} = \mp\omega_n \sqrt{-1} \tag{2.4}$$

$$\lambda_1 = i\omega_n \;\; ve \;\; \lambda_2 = -i\omega_n \tag{2.4a}$$

kökleri bulunur. Bu halde çözüm;

$$x(t) = C_1 e^{i\omega_n t} + C_2 e^{-i\omega_n t} \tag{2.5}$$

veya,

$$x(t) = Xsin(\omega_n t + \varphi) \tag{2.5a}$$

veya,

$$x(t) = Asin\omega_n t + Bcos\omega_n t \tag{2.5b}$$

olarak elde edilir.

$$x\,(0) \;=\; x_0 \qquad ve \qquad \dot{x}\,(0) \;=\; v_0 \tag{2.6}$$

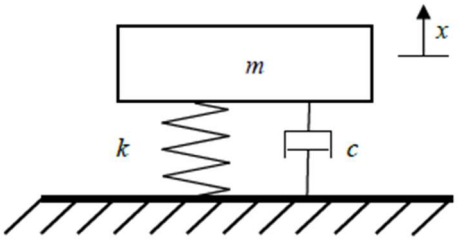
Başlangıç şartları kullanılarak

$$Genlik\colon \;\; X = \frac{1}{\omega_n}\sqrt{(\omega_n^2\, x_0^2 + v_0^2)} \;\; ve \;\; Faz\; Açısı\colon \;\; \varphi = tan^{-1}\left(\frac{\omega_n x_0}{v_0}\right) \tag{2.7}$$

elde edilir.

2.2.4.2 Sönümlü Serbest Titreşimler

Şekil 2.6.'da verilen sisteme karşılık gelen matematiksel model (2.8) eşitliğinde verilmiştir.



Şekil 0.1. Sönümlü serbest titreşim modeli

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \tag{2.8}$$

Burada c viskoz sönüm katsayısını ifade etmektedir. Eşitlikte her terimi kütleye bölünür ise;

$$\ddot{x} + \dot{x}\frac{c}{m} + x\frac{k}{m} = 0 \tag{2.8a}$$

$$x(t) = Ce^{\lambda t} \tag{2.9}$$

ve çözüm kabulünü ise hareket denkleminde kullanırsak;

$$\lambda^2 + \lambda\frac{c}{m} + \frac{k}{m} = 0 \tag{2.10}$$

karakteristik denklemi elde edilir.

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{1}{2m}\sqrt{(\mathrm{c}^2 - 4\mathrm{km})} \tag{2.11}$$

kökleri bulunur. Bu kökler

$$(c^2 - 4km) > 0 \rightarrow \text{İki } farklı \text{ reel kök} \tag{2.12}$$

$$(c^2 - 4km) < 0 \rightarrow Kompleks \text{ kök} \tag{2.12a}$$

$$(c^2 - 4km) = 0 \rightarrow Çakışık \text{ reel kök} \tag{2.12b}$$

şeklinde ifade edilir. Kritik sönüm C_{kr};

$$c^2 - 4km = 0 \;\rightarrow\; c = 2\sqrt{km} = c_{kr} = 2m\omega_n \tag{2.13}$$

ve boyutsuz sönüm oranı

$$\zeta = \frac{c}{c_{kr}} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \tag{2.13a}$$

ifadesiyle verilir. Ve bu ζ ile hareket denklemini yazacak olursak;

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = 0 \tag{2.14}$$

karakteristik denklemi elde edilir. Kökleri ise;

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{(\zeta^2 - 1)} \tag{2.15}$$

şeklinde olacaktır. Kök içerisindeki $\zeta^2 - 1$ ifadesi λ köklerinin karakterini belirler: Bu kökler

$$\zeta > 1\,; \quad \zeta = 1\,; \quad \zeta < 1 \tag{2.15a}$$

$$0 < \zeta < 1 \;\; için \;\; \lambda_{12} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{(1 - \zeta^2)} \qquad j = \sqrt{-1} \tag{2.15b}$$

biçiminde yazılabilir. Bu halde kompleks eşlenikli iki kök vardır. Buna zayıf veya kritik altı sönüm denir. Bu durumda çözüm;

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t}\left(C_1 e^{j\omega_n t\sqrt{(1-\zeta^2)}} + C_2 e^{-j\omega_n t\sqrt{(1-\zeta^2)}}\right) \quad (2.16)$$

$$x(t) = Xe^{-\zeta\omega_n t} sin\,(\omega_d t + \varphi) \quad (2.16a)$$

şeklinde olacaktır. Burada

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)} \quad (2.17)$$

ifadesi sönümlü sistemin doğal frekansını ifade eder. Başlangıç şartları kullanılarak genlik ve faz açısı aşağıdaki gibi elde edilir.;

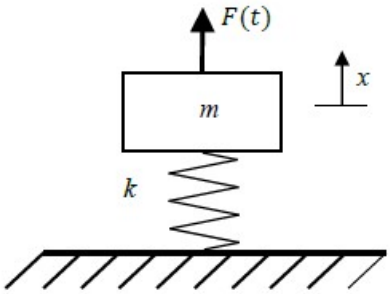
$$X = \frac{1}{\omega_d}\sqrt{[(v_0 + \zeta\omega_n x_0)^2 + (x_0\omega_d)^2]} \quad (2.18)$$

$$\varphi = tan^{-1}\left[\frac{(x_0\omega_d)}{(v_0 + \zeta\omega_n x_0)}\right] \quad (2.18a)$$

Bu durumda genliği üstel olarak azalan, yani zamanla azalıp yok olan bir titreşim hareketi söz konusudur. Sönümlü serbest titreşim frekansı ω_d, aynı sistemin doğal frekansı ω_n'den her zaman biraz daha küçüktür.

2.2.4.3 Sönümsüz Zorlanmış Titreşimler

Şekil 2.7.'de gösterilen sönümsüz zorlanmış titreşim sistemi için hareket denklemi (2.19) eşitliğinde verilmiştir.



Şekil 0.1. Sönümsüz zorlanmış titreşim modeli

$$m\ddot{x} = -kx + F(t) \rightarrow m\ddot{x} + kx = F_0 cos(\omega t) \tag{2.19}$$

Burada F zamandan bağımsız kuvveti ifade eder. Eşitlikte her bir terim kütleye bölündüğünde;

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = f_0 cos(\omega t) \tag{2.19a}$$

elde edilir. Genel çözüm homojen ve özel çözümlerin toplamından oluşur.

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \tag{2.20}$$

olmak üzere

$$x_h(t) = Xsin(\omega_n t + \emptyset) = Asin\omega_n t + Bcos\omega_n t \tag{2.21}$$

$$x_p(t) = A_0 cos\omega t + B_0 sin\omega t \tag{2.21a}$$

denklemleri elde edilir. Buradan $\omega n \neq \omega$ durumu için

$$x(t) = Asin\omega_n t + Bcos\omega_n t + \left(\frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2}\right) \tag{2.22}$$

genel çözümü elde edilir. Başlangıç şartları kullanılarak *A* ve *B* katsayıları hesaplanır;

$$v(0) = A\omega_n = v_0 \rightarrow A = \frac{v_0}{\omega_n} \tag{2.22a}$$

$$x(0) = B + \left(\frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2}\right) = x_0 \rightarrow B = x_0 - \left(\frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2}\right) \tag{2.22b}$$

Katsayılar yerine yazılarak:

$$x(t) = \left(\frac{v_0}{\omega_n}\right) sin\omega_n t + x_0 - \left(\frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2}\right) cos\omega_n t + \left(\frac{f_0}{\omega_n^2 - \omega^2}\right) cos\omega t \tag{2.23}$$

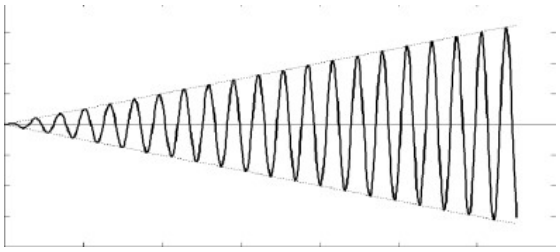
denklemi elde edilir. $\omega_n = \omega$ durumu için;

$$x(t) = Asin\omega_n t + Bcos\omega_n t + \left(\frac{f_0}{2\omega}\right) tsin\omega t \tag{2.24}$$

ve gerekli başlangıç şartları uygulanarak;

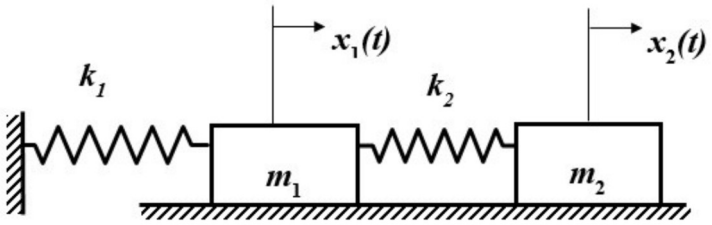
$$x(t) = \left(\frac{v_0}{\omega_n}\right) sin\omega t + x_0 cos\omega t + \left(\frac{f_0}{2\omega}\right) tsin\omega t \tag{2.24a}$$

denklemi elde edilir. Denklemde genlik zamana bağlı giderek artmaktadır. Bu duruma Rezonans denir (Şekil 2.8).



Şekil 0.2. Rezonans durumu

2.2.5. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler



Şekil 0.1. İki serbestlik dereceli sönümsüz sistem modeli

İki serbestlik dereceli sönümsüz serbest titreşimlerin temel denklemi;

$$m_1\ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)\, x_1 - k_2 x_2 = 0 \tag{2.25}$$

$$m_2\ddot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = 0 \tag{2.25a}$$

biçiminde yazılır. Matris formda;

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \tag{2.26}$$

şeklinde yazılabilir. Burada M ve K sırasıyla köşegen ve simetrik matrislerdir.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \tag{2.26a}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \tag{2.26b}$$

Başlangıç şartları;

$$x\,(0) = \begin{bmatrix} x_{10} \\ x_{20} \end{bmatrix}, \dot{x}\,(0) = \begin{bmatrix} \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{20} \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

$$x(t) = ue^{j\omega t} \tag{2.27a}$$

çözüm kabulü olarak alınırsa;

$$(-\omega^2 M + K)\, u e^{j\omega t} = 0 \tag{2.28}$$

$$det\,[-\omega^2 M + K] = 0 \tag{2.28a}$$

elde edilir.

$$det \begin{bmatrix} -\omega^2 m_1 + k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & -\omega^2 m_2 + k_2 \end{bmatrix} \tag{2.29}$$

$$x(t) = A u_1\, e^{-j\omega_1 t} + B\, u_1\, e^{j\omega_1 t} + C\, u_2\, e^{-j\omega_2 t} + D\, u_2\, e^{j\omega_2 t} \tag{2.29a}$$

elde edilir. N serbestlik dereceli sönümlü bir sistemin zorlanmış titreşimine ait hareket denklemi de benzer biçimde matris formda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \tag{2.30}$$

Bu eşitlikte $[M]$ kütle matrisi, $[C]$ sönüm matrisi, $[K]$ katılık matrisi, $\{f(t)\}$ zorlayıcı kuvvet ve $\{x(t)\}$ ise sistem cevabını ifade etmektedir. Kütle $[M]$, sönüm $[C]$ ve katılık $[K]$ matrisleri sistemin uzaysal modelleri olarak tanımlanır. Eşitlik (2.30) homojen olmayan ve sabit katsayılı N adet lineer adi diferansiyel denklemden oluşmaktadır. Çoğunlukla birbirine bağlı olan bu denklemlerin çözümünde modal analiz yöntemi oldukça elverişlidir. Bir sonraki bölümde modal analiz yöntemi bilgileri verilmiştir.

2.2.6 Deneysel Modal Analiz ve Titreşim Ölçümü

Mühendislikte yapıların üretim sürecinde, oluşturulan matematiksel modellerde yapılan yaklaşımların yanı sıra, deneysel yollar ile de sonuçların doğrulanması önemli bir rol almaktadır. Deneysel yollar ile bir yapının titreşim ölçümlerinin iki şekilde yapıldığını görmekteyiz. Bunlardan biri yapıların çalışma ortamında sadece titreşim cevabının ölçülmesidir.

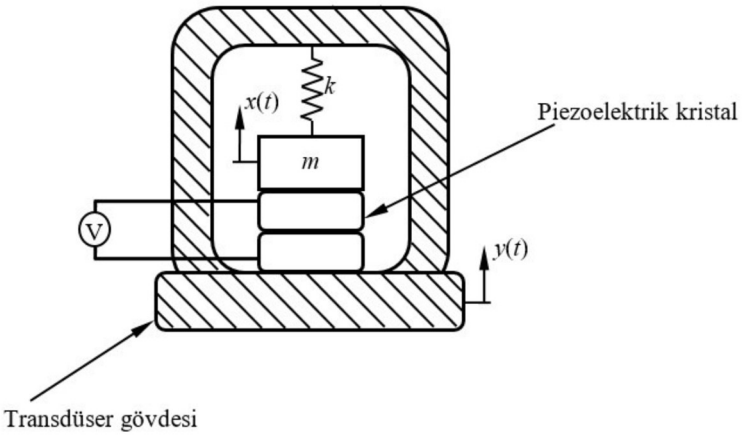
Bir diğer ölçüm yöntemi ise laboratuvar ortamında yapılara uygulanan bir zorlayıcı kuvvete karşılık yapının verdiği cevabın birlikte ölçülmesidir. Bu ölçüm sonuçlarında yapıların FTF'leri (Frekans Transfer Fonksiyonu) elde edilir. Daha sonra bu FTF'lerin çeşitli yöntemler ile analiz edilmesiyle bu test ve analiz deneysel modal analiz olarak isimlendirilmektedir. (Ewins, 1984)

Bu konuda Ewins'in kitabı (1984) oldukça faydalı bilgiler içermektedir. Test yapısını tahrik etmek için genel olarak iki yöntem vardır. Bunlardan biri, yapının modal darbe çekici ile tahrik edilmesidir. Diğeri ise yapı üzerine bağlanan bir sarsıcı yardımıyla tahrik edilmesi şeklindedir.

Deneysel modal analizlerin yapılışında, sisteme dışarıdan uygulanacak tahrik şekli ve bu tahrik kuvvetinin hangi noktalara uygulanacağının seçimi FTF'lerin en doğru ve hassas sonuçlar vermesi açısından önemli bir kriterdir. Seçilen noktalara tekrarlı vuruşlar yapılacağı durumlarda sarsıcı tercih edilebilir. Modal darbe çekici ile yapılan deneylerde ise tecrübe ile birlikte el becerisine de ihtiyaç vardır. Sarsıcı modal test cihazları, kontrollü bir analiz yapımında bu gibi sebeplerden dolayı etkin olarak kullanılmaktadır. Fakat sarsıcı kullanımına uygun olmayan küçük veya hafif yapıların dışarıdan kuvvet ile tahrik edilmesinde sistem sınır koşullarının etkilenebileceği hesaba katılarak darbe çekici tercih edilmektedir. (Kurnaz, 2020)

Modal analiz yapılacak olan sisteme uygulanacak tahrik kuvvetine karşılık olarak, yapının üzerinden cevap alabilmek için çoğunlukla ivmeölçerler kullanılır. İvmeölçerler, genellikle ufak yapıda cihazlardır. Ayrıca geniş frekans ve dinamik aralığa sahip olmaları sebebiyle en genel amaçlı transdüserlerdir. Hız trandüserleri, genellikle orta frekans bölgesini içeren izleme sistemlerde kullanılmaktadır. Deplasman trandüserleri ise eksen kaçıklığı gibi ölçümlerde kullanılırlar. Özellikle düşük frekanslı deplasman ölçümünün gerektiği durumlarda, genellikle tek eksende çalışan, fakat duruma göre iki veya üç eksende de ölçüm yapabilen tipleri mevcuttur. (Kurnaz, 2020)

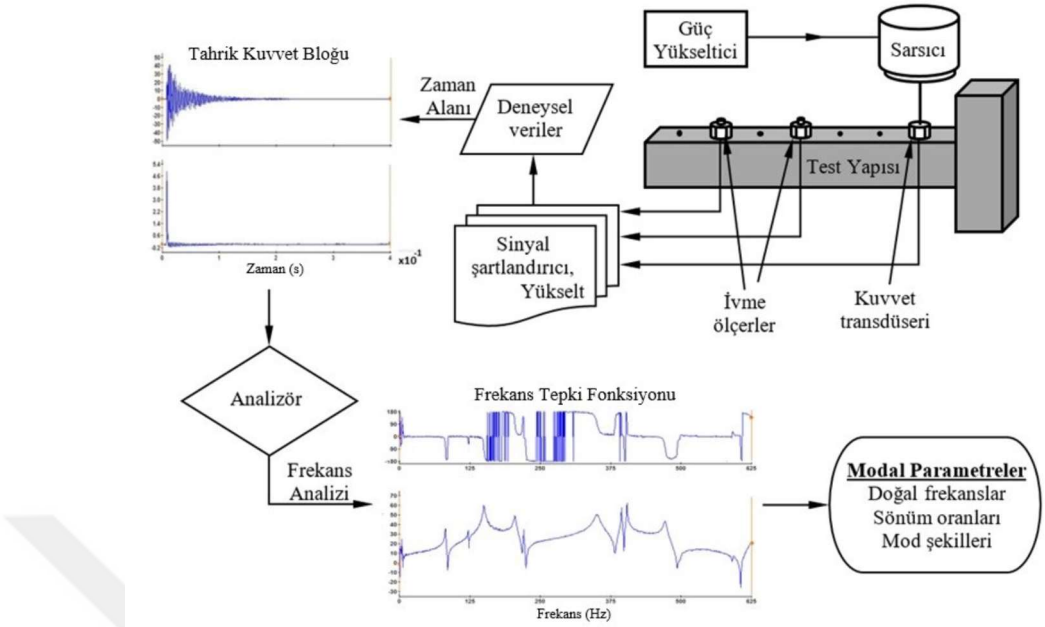
Titreşim ölçümlerinde tahrik kuvvetlerini ve cevapları ölçebilmek adına genellikle piezoelektrik transdüserler tercih edilmektedir. Bu trandüserler, içindeki mikroskobik kristal yapılar aracılığıyla hareket sırasında belli bir kuvvetle gerilerek kristal yapının voltaj üretmesini sağlar. Bu voltajlar hareketin ivmesiyle orantılıdır. Şekil 2.10.'da piezoelektrik bir ivmeölçerin şematik yapısı gösterilmiştir.



Şekil 0.1. Piezoelektrik ivmeölçerin şematik yapısı

Titreşim ölçümü yapmak için transdüserler ile birlikte bir de titreşim ölçüm cihazlarına ihtiyaç duyulur. Bu cihazlar ve beraberinde transdüserlerin kalibrasyonu için bir kalibratör kullanılması da gerekmektedir. Titreşim ölçüm cihazları, anlık değer ölçen cihazlar ve ortalama değer hesaplayabilen cihazlar olarak iki grupta toplanmaktadır. Bir dinamik analizin kapsamlı şekilde yapılabilmesi adına frekans analizi yapabilen analizörler de kullanılmaktadır.

Deneysel modal analizlerde yapının üzerinde belirlenmiş olan noktalardan tahrik kuvveti uygulanır ve yapının bu tahrik kuvvetine verdiği cevaplar ölçülür. Bu noktalar arasındaki transfer fonksiyonları yani FTF'ler titreşim analizörü kullanılarak elde edilir. (bkz. Şekil 2.11.) (Hüseyinoğlu, 2017)



Şekil 0.2. Deneysel Modal Analiz (Çakar, 2003)

2.2.7. Frekans Cevap Fonksiyonu

Frekans cevap analizinin amacı, bir yapının frekans cevap fonksiyon matrisini belirlemektir. Frekans cevap fonksiyonu (FRF), aynı veya başka bir düğüm noktasından yapılan bir girdi nedeniyle oluşan yanıt olarak tanımlanabilir. (Hörnlund ve Papazoğlu, 2005). Sistemin hareket denklemi ele alınırsa;

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \tag{2.31}$$

Bu hareket denklemindeki $\boldsymbol{M}$ kütle matrisini, $\boldsymbol{C}$ viskoz sönüm matrisini, $\boldsymbol{K}$ kompleks katılık matrisi, $\boldsymbol{f}$ kuvvet vektörü, $\boldsymbol{x}$ ise yer değiştirme vektörünü göstermektedir. Harmonik bir uyarı olduğunda, kuvvet ve karşılık gelen cevap harmonik fonksiyonlar olarak ifade edilebilmektedir.

$$f = \hat{f}\,(\omega)e^{i\omega t} \tag{2.32}$$

$$x = \hat{x}(\omega)e^{i\omega t} \tag{2.33}$$

Bu denklemlerdeki $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{\omega})$ kompleks kuvvet vektörüdür. $\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{\omega})$ ise kompleks yer değişim vektörünü ifade etmektedir. Yer değişim vektörünün birinci ve ikici derece türevleri alınırsa ve kuvvet vektörü ile beraber hareket denklemine yazılırsa;

$$-\omega^2 M\hat{x}(\omega)e^{i\omega t} + i\omega C\hat{x}(\omega)\, e^{i\omega t} + K\hat{x}(\omega)\, e^{i\omega t} = \hat{f}\,(\omega)\, e^{i\omega t} \tag{2.34}$$

$$i = \sqrt{-1} \tag{2.34a}$$

Bu denklemdeki t zaman olarak ifade edilir. Bütün eşitlikler $e^{i\omega t}$ ile bölündüğünde frekans alanındaki hareket denklemi aşağıdaki gibi oluşur;

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K)\,\hat{x}(\omega) = \hat{f}\,(\omega) \tag{2.35}$$

Bu denklem dinamik katılık matrisi $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{\omega})$ ile ifade edilirse;

$$D(\omega) = (-\omega^2 M + i\omega C + K) \tag{2.36}$$

$$D(\omega)\,\hat{x}(\omega) = \hat{f}\,(\omega) \tag{2.36a}$$

Bu denklem $\hat{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{\omega})$ vektörü ile çözüldüğü taktirde, frekans cevap fonksiyon matrisi $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{\omega})$ oluşur;

$$\hat{x}\,(\omega) = H(\omega)\,\hat{f}\,(\omega) \tag{2.37}$$

$$H(\omega) = D(\omega)^{-1} \tag{2.37a}$$

Cevap parametresinin yer değiştirme alınmasıyla elde edilen frekans cevap fonksiyonunun özel formuna reseptans denir.

$$H(\omega) = \frac{Cevap}{Girdi} = \frac{x}{f} = \frac{1}{k - \omega^2 m} \tag{2.38}$$

Viskoz sönümlü titreşimlerde c sönümleme katsayısına sahip bir sönümleme elemanın kullanılmasıyla elde edilen bir serbestlik dereceli sistemim frekans cevabı fonksiyonu (Receptance) aşağıdaki şekilde yazılır (Ewins, 1984).

$$H(\omega) = \alpha(\omega) = \frac{Cevap}{Girdi} = \frac{x}{f} = \frac{1}{(k - \omega^2 m) + i(\omega c)} \tag{2.39}$$

Yapısal sönümlü ve bir serbestlik dereceli bir sistemin frekans cevabı fonksiyonu (Receptance) aşağıdaki şekilde yazılır (Ewins, 1984). Burada d, sönümleme katsayısı olarak ifade edilir.

$$\alpha(\omega) = \frac{Cevap}{Girdi} = \frac{x}{f} = \frac{1}{(k - \omega^2 m) + i(d)} \tag{2.40}$$

Frekans cevap fonksiyonlarının hesaplanmasında cevap olarak hızın kullanılması ile elde edilen frekans cevabına hareketlilik (Mobility) denir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Y(\omega) = \frac{Cevap}{Girdi} = \frac{v}{f} = i\omega \frac{x}{f} = i\omega\alpha(\omega) \tag{2.41}$$

ve

$$\theta_Y = \theta_\alpha - 90° \tag{2.42}$$

Benzer şekilde frekans cevap fonksiyonunun hesaplanmasında cevap parametresi olarak ivmenin $a(t) = \ddot{x}(t)$ kullanılmasıyla elde edilen cevap fonksiyonuna ataletlilik (*Inertance, Accelerance*) denir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$A(\omega) = \frac{Cevap}{Girdi} = \frac{\alpha}{f} = -w^2\alpha(\omega) \tag{2.43}$$

Bu üç frekans cevap fonksiyonu ana formları temsil etmesiyle birlikte bu üç fonksiyonun tersleri de yine frekans cevap fonksiyonlarının ifade edilmesinde kullanılmaktadır. Bunlar;

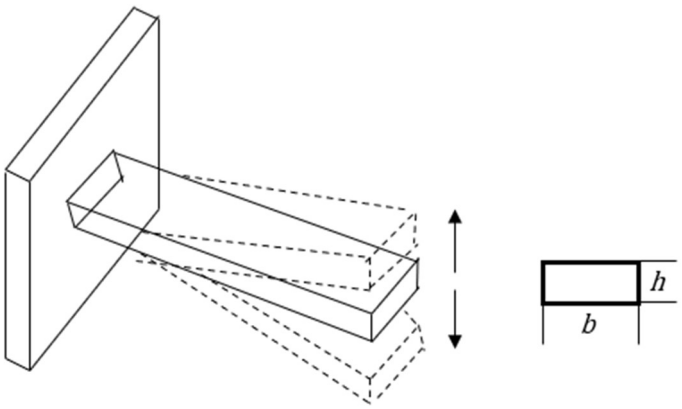
$$Dinamik\ Direngenlik: \frac{Kuvvet}{Yer\ değiştirme}$$

$$Mekanik\ Empedans: \frac{Kuvvet}{Hız}$$

$$Belli\ Kütle: \frac{Kuvvet}{İvme}$$

2.2.8. Kiriş Titreşimi

Euler-Bernoulli kiriş teorisi, doğal titreşime maruz kalan dikdörtgen kesitli ve ankastre mesnetli bir kirişin doğal frekansını elde etmek için kullanılır. Euler-Bernoulli kiriş teorisini anlatan görsel Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 0.1. Euler-Bernoulli ankastre kiriş modeli

Görseldeki kiriş modelinde, dikdörtgen kesitli kiriş titreştiğinde oklarla gösterildiği şekilde aşağı ve yukarı yönlü hareket gerçekleşmektedir. Bu belli genlikteki titreşim hareketinin gerçekleşmesi ile kiriş teorisinin matematiksel modeli yardımıyla kirişin

doğal frekansı hesaplanabilmektedir. Bu matematiksel model ve doğal frekansın bulunması aşağıdaki denklem takımı (2.44) ile açıklanmaktadır.

$$EI\frac{d^4y}{dx^4} + \rho A\frac{d^2y}{dt^2} = 0 \tag{2.44}$$

Yukarıdaki denklem takımının normal çözümü,

$$Y(x,t) = X(x)T(t) \tag{2.45}$$

eşitliği, denklem (2.44)'te uygulanırsa ve her iki taraf ρA ile bölünürse,

$$\frac{EI}{\rho A}\frac{d^4X}{dx^4}T(t) - X(x)\frac{d^2T}{dt^2} = 0 \tag{2.46}$$

$$c^2\frac{d^4y}{dx^4} + \frac{d^2y}{dt^2} = 0 \tag{2.46a}$$

şeklinde olacaktır. Burada statik sönüm katsayısı C,

$$c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \tag{2.47}$$

ve

$$\beta^4 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{\rho A\omega^2}{EI} \tag{2.48}$$

olduğundan doğal frekans formülü

$$\omega = (\beta L)^2\sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \tag{2.49}$$

şeklinde olacaktır. Burada $(\beta L)^2$ eşitliği k sabiti olarak bilinmektedir. Aynı şekilde L burada kirişin mm cinsinden boyunu, b mm cinsinden genişliğini, h ise mm cinsinden

kirişin kalınlığını temsil etmektedir. Yine aynı formülde kullanılan E elastisite modülünü, A kesit alanını ve I ise atalet momentini temsil etmektedir.

Doğal frekans formülünde kullanılan A kesit alanı ve I ise atalet momenti eşitlik (2.50) ve (2.51) ile gösterilir.

$$A = b \times h \tag{2.50}$$

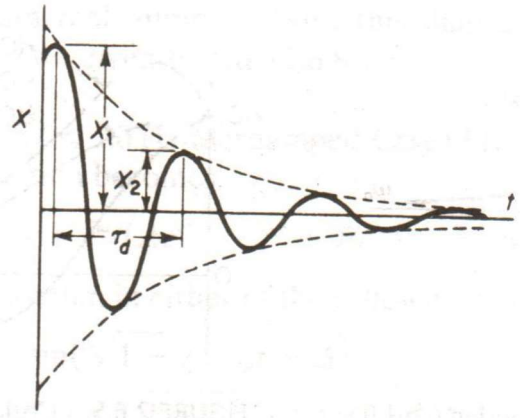
$$I = \frac{bh^3}{12} \tag{2.51}$$

Doğal frekans formülünde (2.49) k sabiti normal modlara göre değişkenlik göstermektedir. Kabul edilen normal mod k sabitleri ilk 3 mod için;

- 1.Mod için: 1,875
- 2.Mod için: 4,694
- 3.Mod için: 7,855

şeklinde belirtilmektedir.

Titreşim hareketi sonucu sistemde oluşan salınımın genliği zamanla azalır. Azalan genlikler titreşimin zamanla sönümlendiğinin bir göstergesidir. Sistemin sönüm oranını ölçmenin bir yolu, salınımların logaritmik azalma oranını bulmaktır. Titreşim hareketine maruz kalmış bir sistemin salınım grafiği Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 0.2. Titreşim hareketi sönümlü salınım grafiği

Bu genlik-zaman grafiğinde X genliği, τ ise hareketin periyodunu temsil etmektedir.

Logaritmik azalma oranı δ ve dinamik sönüm katsayısı ς ise aşağıdaki formülasyon ile hesaplanmaktadır. Denklem (2.52), (2.53) ve (2.54) eşitliklerinde öncelikle incelenecek

olan genlik değerleri aralığı belirlenmelidir. Seçilen n tane genlik değerlerinden ilk ve son genlikler denklem (2.42) eşitliğinde yerlerine yazılır. Buradan δ logaritmik azalma oranı bulunacaktır. Daha sonra dinamik sönüm katsayının bulunabilmesi için gereken eşitlik (2.44)'te verilmiştir.

$$\delta = \ln\frac{x_{n-1}}{x_n} = \frac{1}{n}\ln\frac{x_0}{x_n} \tag{2.52}$$

$$\delta = \varsigma\omega_n\tau \tag{2.53}$$

$$\varsigma = \frac{\delta}{2\pi} \tag{2.54}$$

2.2.9. Literatürdeki Çalışmalar

Chiu ve Chang (2009) tarafından yapılan çalışmada, bir ucu ankastre mesnetli standart kiriş modeli üzerinde modal analiz çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalarında öncelikle homojen yoğunluklu herhangi bir kiriş modelinin modal analizinin matematiksel teorisi üzerine çalışılmıştır. Bu matematiksel model üzerinden 3 farklı doğal frekans modunun matematiksel formülünün çıkarımı üzerinde durulmuştur. Aynı kiriş modelini bir sonlu elemanlar programında modelleyerek program yardımıyla doğal frekans hesabının nasıl yapılacağından bahsedilmiştir. Ayrıca 2 farklı modal analiz yöntemi ile birlikte darbe çekici kullanarak, matematiksel ve deneysel olarak sönüm oranı hesabının nasıl yapıldığından bahsedilmiştir.

Klimenda ve Soukup (2016) tarafından yapılan çalışmada, ince ve izotropik bir alüminyum plaka üzerinde modal analiz uygulaması yapılmıştır. Öncelikle birinci bölümde ince plakaların modal analizlerinin teorisi ve özdeğerlerinden bahsedilmiştir. Verilen bu teorik bilgiler ince plaka üzerinde uygulanıp matematiksel bir çözüm elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde ise alüminyum plakaya bir sonlu elemanlar programı yardımı ile modal analiz uygulaması yapılmıştır. Sınır şartları belirlendikten sonra alüminyum plakanın 10 farklı doğal frekans modu ve öz değerleri sonuçlar kısmında belirtilmiştir.

Abdellah ve diğerlerinin (2021) yaptıkları çalışmada 50 mm sabit genişliğe sahip, farklı delik çapları olan 3 mm kalınlığındaki alüminyum plakalar üzerinde bir modal analiz

çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada delik çaplarının doğal frekansa olan etkisi incelenmiştir. İlk olarak çalışmada alüminyum plakaların modal analiz teorisinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde deneysel çalışmalar için hazırlanan delikli ve deliksiz plakalara darbe çekici kullanarak modal analiz uygulaması gerçekleştirilmiştir. Son olarak aynı plakalar sonlu elemanlar programında modellenip deneysel çalışmalar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma sonucu bize delik çapı arttıkça sönüm oranı değerinde artış olduğunu göstermiştir.

Sonawane ve Talmale (2017) tarafından yapılan çalışmada Euler-Bernoulli kiriş modeli üzerinde modal analiz çalışması yapılmıştır. Matematiksel formüller ile Euler-Bernoulli kiriş teorisinden bahsedilmiştir. Teorik formüller yardımı ile 10 adet doğal frekans değeri hesaplanıp tabloyla belirtilmiştir. Bilgisayarda bir 3 boyutlu tasarım programı kullanılarak kiriş modellenip, daha sonra sonlu elemanlar programına aktarılmıştır. Sonlu elemanlar programı yardımıyla hazırlanan kiriş modele sınır şartları uygulanarak alüminyum kirişin yine 10 adet doğal frekans değeri bulunmuştur. Son olarak deneysel çalışmalar için düzenek kurulmuş ve darbe çekici kullanılarak yapılan deneylerden 10 adet doğal frekans değeri hesaplanmıştır. Sonuç olarak bu üç farklı yol ile bulunan doğal frekans değerleri bir grafikte verilerek sonuçlar üzerinde karşılaştırma yapılmıştır.

Pingulkar ve Suresha (2016) tarafından yapılan çalışmada katmanlı kompozit plakaların serbest titreşimleri sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla incelenmiştir. Sonlu elemanlar programında tasarlanan 8 katmanlı kompozit plakalara bir kenarından ankastre mesnet uygulanmıştır. Kompozit plakalara farklı 2 boyut, 3 farklı malzeme, 3 farklı fiber dizilimi ve 5 farklı hacimsel fiber yoğunluğunda analiz serisi uygulanmıştır. Sonlu elemanlar programında yapılan bu analiz serisinden alınan her kombinasyonun doğal frekans modları ve sonuçlar karşılaştırmalı bir tablo ve grafik ile sunulmuştur. Sonuç olarak en dış tabakanın fiber oryantasyonunun, kompozit plakaların doğal frekansları üzerinde hacimsel fiber yoğunluğundan ve matris malzemesindeki değişimden daha önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Mishra ve Sahu (2014) tarafından yapılan çalışmada, epoksi matrisli cam elyaflı kompozit plakaya farklı sınır şartlarında modal analiz uygulamaları yapılmıştır. Bu çalışmada kompozit malzemenin farklı elyaf yerleşimleri ile üretilen deney numunelerine 4 farklı sınır şartında deneyler uygulanmıştır. Bir kenarı ankastre, 4 kenarı ankastre, iple asılı olacak şekilde serbest bırakılmış ve 4 kenardan basitçe desteklenerek sabitlenen plakalar darbe çekici yardımıyla titreşime zorlanmış ve doğal frekansları hesaplanmıştır. Bu 4 farklı sınır şartına sahip plakalara uygulanan modal analiz deneyleri sonucunda çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra sonlu elemanlar metodu yardımıyla deney sistemi modellenmiş ve oradan da alınan sonuçlar ile fiziksel deney sonuçları karşılaştırılmalı tablo ve grafik olarak sunulmuştur. Sonuç olarak bir tarafı ankastre olan plakanın doğal frekans değerleri, 4 kenarından basitçe desteklenen ve tamamen kenetlenmiş olan plakanın değerlerinden daha düşük çıktığı gözlemlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu yüksek lisans tez çalışmasında kirişlerde doğal frekans ve dinamik sönüm oranı hesabı yapılmıştır. Çalışma kapsamında çelik ve kompozit malzeme kullanımı tercih edilmiştir. Kompozit malzeme olarak polipropilen matrisli sürekli cam elyaf katkılı kompozit malzeme tercih edilmiştir. Doğal frekans ve sönüm oranı hesaplanırken darbe çekici yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle darbe çekici yönteminin uygulanması için bir test düzeneği oluşturulmuştur. Test düzeneğinden alınan veriler bir bilgisayar ve veri toplama programı yardımı ile incelenmiştir. Alınan veriler doğrultusunda kirişlerin doğal frekansları hesaplanmış, teorik hesaplamalar ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

3.1. Malzemeler

Yüksek lisans tezi kapsamında kullanılan kiriş numuneler çelik ve PP matrisli sürekli cam elyaf katkılı termoplastik kompozit malzemeden üretilmiştir. Çelik kiriş için TecQuipment firmasının SM105 kodlu çelik kiriş numunesi seçilmiştir (550x20x3 mm). Kompozit malzeme için SABIC firmasından temin edilen hacimce %45 sürekli cam elyaf takviyeli polipropilen rulo numuneden bir kompozit kiriş üretilmiştir. Darbe çekici için KISTLER firmasının 9722A500 modeli darbe çekici kullanılmıştır. İvmeölçer için KISTLER firmasının Piezotron 8778A500 modeli ivmeölçeri kullanılmıştır. Bir tane 24 Volt güç kaynağı ve bir veri toplama cihazı kullanılmıştır. Toplanan verileri görebilmek için bir adet bilgisayar ve veri analiz programı kullanılmıştır.

3.2. Kompozit Malzeme Üretimi

Yüksek lisans tezi kapsamında darbe çekici yöntemi ile modal test yapılacak olan kompozit kiriş numune Umimag (Bursa Uludağ Üniversitesi Uygulamalı Mekanik ve İleri Malzemeler Araştırma Grubu) laboratuvarlarında üretilmiştir. Öncelikle SABIC firmasından temin edilen hacimce %45 cam elyaf katkılı polipropilen rulo malzemeden uygun boyutlarda ve önceden belirlenen elyaf yönlenme açılarında dikkatlice kesilerek kompozit malzemenin katmanları hazırlanmıştır. Hazırlanan bu katmanlar belirlenen elyaf yönlenme açılarına dikkat ederek üst üste getirilmiştir. Oluşturulan kompozit

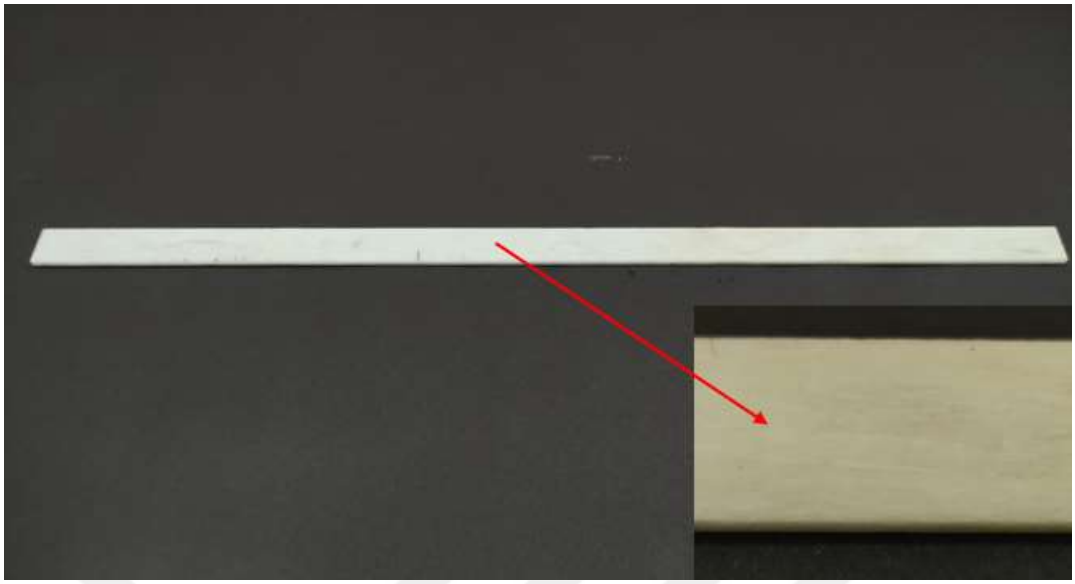
malzeme yapısı 10 katmanlı bir yapı olup katmanların elyaf yönlenme açıları ise [0°/0°/90°/45°/-45°/-45°/45°/90°/0°/0°] olacak bir şekilde hazırlanmıştır.

Kompozit malzemenin temel yapısı hazırlandıktan sonra preste sıcak şekillendirme işlemine tabi tutulmuştur. Isıtıcılı bir pres kalıbının malzeme ile temas edecek yüzeyleri 70°C derecede iken bu yüzeylere silikonlu aerosol bir kalıp ayırıcı sıkılmış ve biraz kuruması beklendikten sonra hazırlanan 10 katmanlı kompozit plaka pres kalıbına yerleştirilmiş ve presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Termoplastik matris malzemesi olan polipropilenin eriyip katmanların birleşmesi ve cam elyafları bir arada tutabilmesi için preste 180°C ila 200°C arasındaki sıcaklık değerlerinde yaklaşık yarım saat ila bir saat arasında (malzemenin ne kadar sürede eriyip bütünleştiğine göre değişiklik gösterebilir.) bir ısıl işlem uygulanmıştır. Bu süreden sonra pres kalıbı soğumaya bırakılıp sıcaklık değerleri takip edilmeye devam edilmiştir. Kalıbın sıcaklık değerleri 70°C derece değerlerine düştüğünde kalıp açılmış ve soğuma esnasında katılaşan 10 katmanlı kompozit plaka kalıptan çıkartılmış ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Teorik olarak testlerde kullanılan kompozit malzeme özellikleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Hacimce %45 sürekli cam elyaf takviyeli polipropilen malzeme özellikleri

Yoğunluk (g/cm3)	Katman Kalınlığı (mm)	Çekme Modülü (GPa)	Enine Çekme Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1,7	0,25	37	4,5	948
Bası Mukavemeti (MPa)	Düzlem Kayma Mukavemeti (MPa)	Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti (MPa)	Poisson Oranı	
457	1610	36,5	0,36	

Üretilen 10 katmanlı ve 3.5 mm kalınlığında olan kompozit plakadan kiriş numuneler elde etmek için boyutlar belirlenmiştir. Kompozit kirişin boyutları 500x20x3,5 mm olarak belirlenmiştir. Daha sonra üretilen 10 katmanlı kompozit plakadan belirlenen boyutlarda kiriş numuneler su jeti kesim yöntemi kullanılarak düşük boyut toleransı ile dikkatlice kesilerek hazırlanmıştır. Test sırasında ise kompozit kiriş de çelik kiriş gibi 350mm uzunluktan ankastre olarak bağlanacaktır. Test için hazırlanan kompozit kiriş numune Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Polipropilen esaslı sürekli cam elyaf takviyeli kompozit kiriş malzeme

3.3. Modal Test Düzeneği Ekipmanları

Testlerde kullanılmak üzere TecQuipment firmasının SM105 kodlu çelik kiriş numunesi seçilmiştir. Bu kiriş 3 mm kalınlık, 20 mm en ve 550 mm uzunluğa sahiptir. Ancak test düzeneği kurulumunda veri alınacak kiriş boyu 350 mm olarak belirlendiğinden kalan 200 mm'lik kısımdan kurulacak olan test düzeneğine bir ucu ankastre olarak sabitlenmiştir. Testlerde kullanılan çelik numunenin özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Testlerde kullanılan çelik kirişin bazı özellikleri

b (m)	h (m)	L (m)	I (m^4)	V (m^3)	ρ (kg/m^3)	E (MPa)	m (kg)
0,020	0,003	0,35	$4,50 \times 10^{-11}$	$3,3 \times 10^{-5}$	7850	$2,1 \times 10^{+11}$	0,25905

Test numunesinin üzerine, uç kısma yakın olacak bir mesafeye, bir ivmeölçer yerleştirilir. İvmeölçerin de olabildiğince rijit şekilde yerleştirilmesi doğru sonuçlar alabilmek adına önemlidir. İvmeölçer, bir balmumu yapıştırıcı yardımı ile sabitlenebilir. Burada dikkat edilecek nokta, ivmeölçerin titreşim hareketi esnasında sabitlenen noktadan ayrılmaması gerektiğidir. Yüksek lisans tezi kapsamında yapılan bu çalışmada KISTLER firmasının

Piezotron Type 8778A500 kodlu ivmeölçer modeli kullanılmıştır. Kullanılan ivmeölçerin kütlesi 0,4 gramdır. Yapı olarak küçük, genel kullanıma uygun ve kiriş üzerinde fazladan bir ağırlık oluşturmamaktadır. Dış yapısı alüminyum ve titanyum alaşımlı bir metalden üretilmiştir. Kullanılan ivmeölçer piezoelektrik özellikli bir ivmeölçerdir. Dinamik ölçümlerde 2 Hz ila 9 000 Hz aralığında %5 tolerans ile ölçüm yapabilmektedir. Rezonans frekansı 70 000 Hz'dir. Kaynaktan aldığı 18 ila 30 Volt aralığındaki 2 ila 20 miliamper doğru akım değerleri ile çalışmaktadır. Yerçekimi kuvvetinin 500 katına kadar ivmelenmeleri ölçebilme kapasitesine sahiptir. Testlerde kullanılan bu ivmeölçerin görseli Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. KISTLER Piezotron Type 8778A500 ivmeölçer

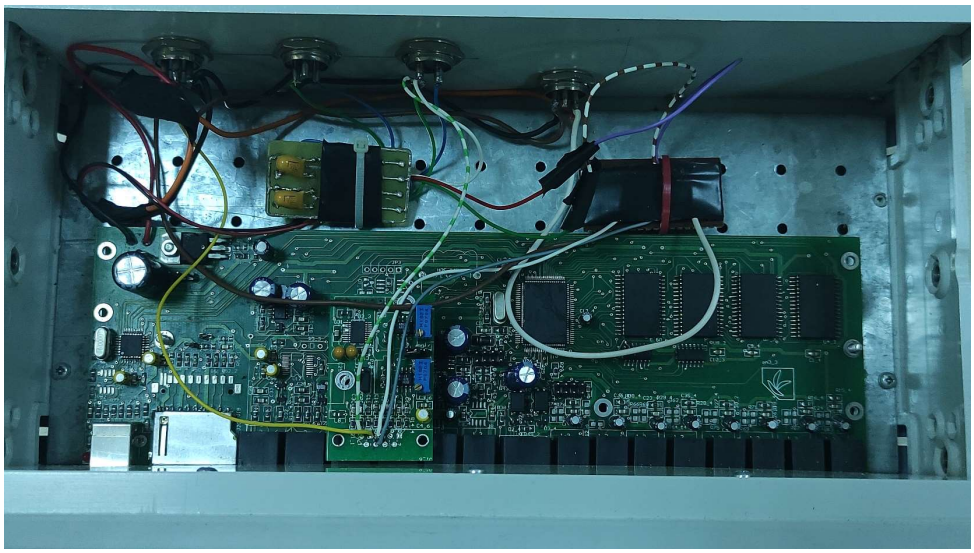
Testlerde kullanılacak olan darbe çekicinin uç seçimi testlerin doğruluğu açısından önemlidir. Uç seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken noktalardan biri kullanılacak olan çekicin ve çekiç ucunun test numunesine uygunluğudur. Çok yumuşak uç seçimi darbenin sönümlenmesini ve alınan değerlerin uygunluğunu etkileyecektir. Büyük yapıdaki darbe çekiçleri bu tarzdaki küçük numuneler kullanılan test düzenekleri için uygun değildir. Çekicin kendi ağırlığı darbe esnasında kirişi gerektiğinden fazla eğilme hareketine maruz bırakacak ve doğru sonuç almak mümkün olmayacaktır. Bu test düzeneği için daha küçük yapıda darbe çekici kullanımı daha uygundur. Dolayısıyla bu test düzeneği için KISTLER markasının Type 9722A500 kodlu darbe çekici tercih edilmiştir. Test numunelerinin küçük olması ve üzerine hafif vuruşlar gerçekleştirilecek olması dolayısıyla daha sert yapıda olan küçük plastik uç tercih edilmiştir. Kullanılan

darbe çekicinin optimum çalışma kuvvet aralığı 0 ile 445 N arasındadır. Maksimum çalışma kuvveti ise 2225 N değerindedir. Çekicin rezonans frekansı 27 000 Hz'dir. Kaynaktan aldığı 20-30 Volt aralığında 2-20 miliamper doğru akım değerlerinde çalışabilmektedir. Testlerde kullanılan bu çekicin görseli Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



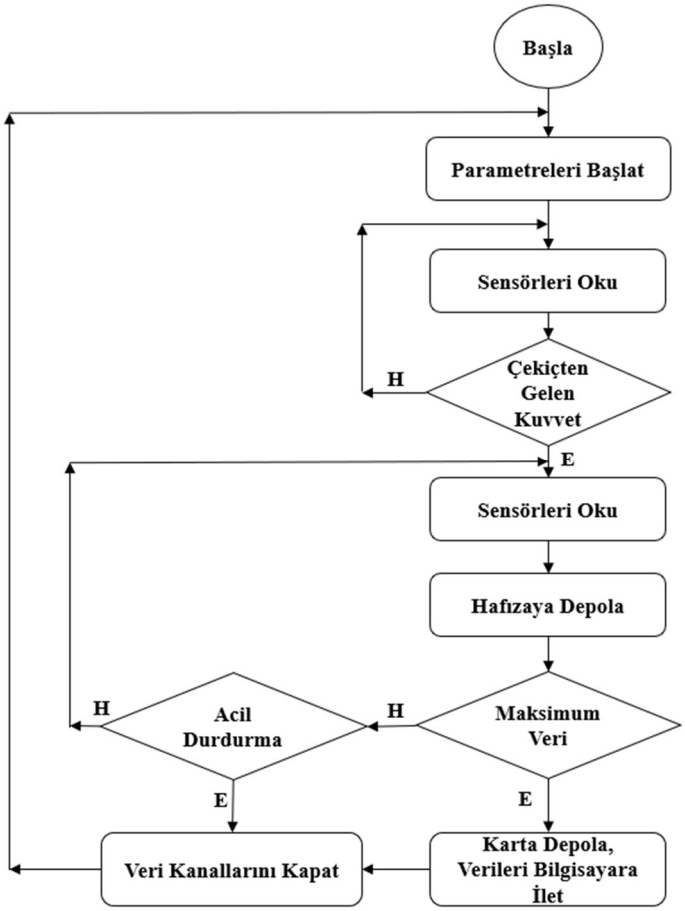
Şekil 3.3. KISTLER Type 9722A500 darbe çekici

Test düzeneğinde Yazıcı ve diğerlerinin yayınlanmamış çalışmasında (2022) geliştirmiş olduğu bir veri toplama cihazı kullanılmıştır. Kullanılan veri toplama cihazı ile birlikte geliştirilen ve bilgisayar üzerinden verileri okumaya ve analiz etmeye yardımcı bir de veri analiz programı kullanılmıştır. Veri toplama cihazında kullanılmak üzere geliştirilen elektronik kart ise Şekil 3.4'de verilmiştir.



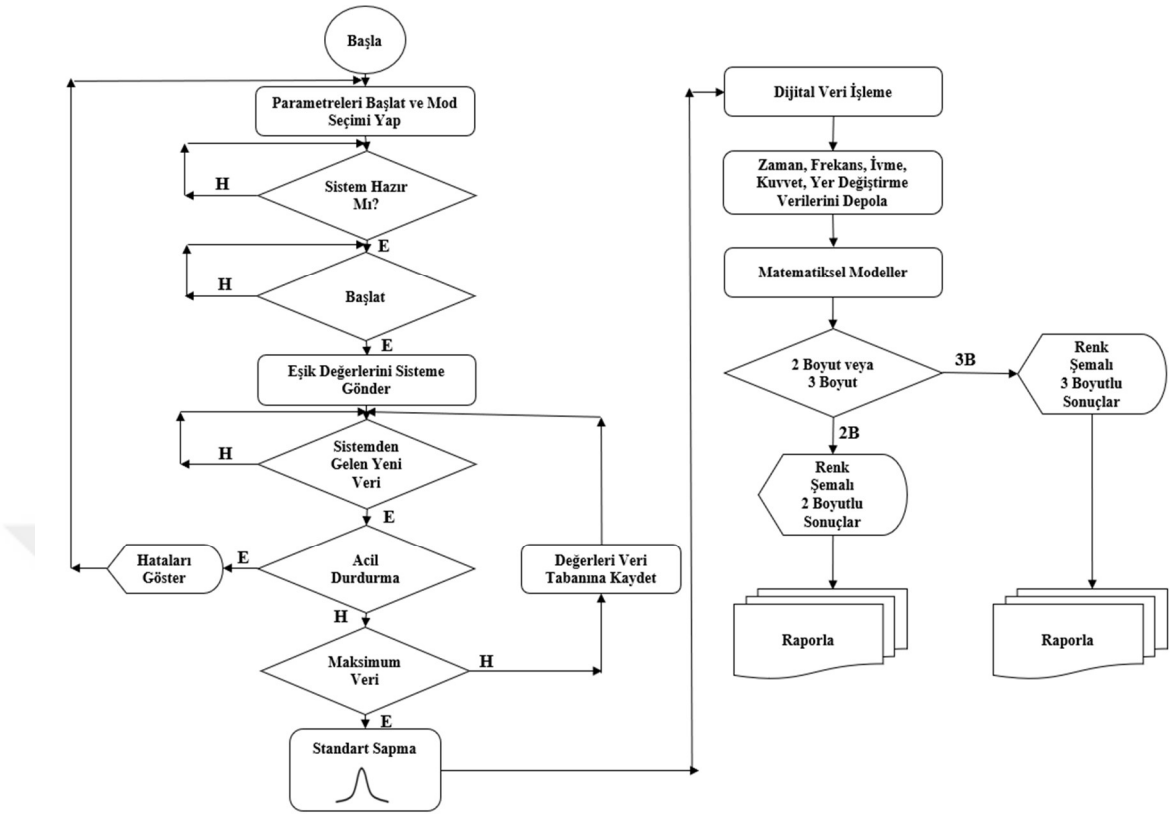
Şekil 3.4. Geliştirilen veri toplama cihazına ait elektronik kart

Bilgisayarda çalışan analiz programında gelen komutlar ölçüm işlemini gerçekleştirmektedir. Veri toplama ünitesi açıldıktan sonra kullanılan sensör ve cihazları tanır ve gerekli ilk atamaları gerçekleştirmektedir. Bilgisayardaki analiz programından başlat komutu alındıktan sonra darbe çekici sensörünün çıkışındaki sinyalin değişmesini beklemektedir. Darbe çekici aleti ile numuneye uygulanan bir darbeden sonra kuvvete bağlı olarak sensör çıkışında bir voltaj değişikliği meydana gelmektedir. Bilgisayardaki veri analiz programı kullanılarak bu tetiklenmenin seviyesi ayarlanabilmektedir. Program, veri toplama ünitesinde ayarlanan tetiklenme seviyesinin üzerinde bir kuvvet algıladığında yüksek hızlı ölçüm yapmaya başlamaktadır. Veri toplama ünitesi de yazılımın paralelinde 300 kpbs hıza kadar veri toplamaktadır. Benzer şekilde, veri toplamak için belirlenen ölçüm süresi ve alınan verilerin frekans aralığı da bilgisayar programından ayarlanabilmektedir. Veri ölçümü için gerekli süreye ulaşıldığında toplanan veriler bilgisayar programına aktarılmaktadır. Bilgisayara aktarılan veriler arasından ölçüm süresi, kuvvet, ivme, frekans, yer değiştirme gibi veriler yazılımda incelenebilmektedir. Aynı zamanda bu veriler yazılımdan dışarıya da tablo şeklinde kaydedilebilmektedir. Veri toplama cihazının çalışma prensibi akış şeması Şekil 3.5'de gösterilmektedir. (Yazıcı ve diğerleri, 2022)



Şekil 3.5. Veri toplama cihazı çalışma prensibi akış şeması (Yazıcı ve diğerleri, 2022)

Bilgisayar ortamında kullanılan veri analizi programının yazılım akış şeması Şekil 3.6'da verilmiştir. Maksimum veri sayısı elde edildikten sonra yazılım tarafından verilere %34 standart sapma uygulanır ve bu sınırın dışında kalan veriler iptal edilmektedir. Bu işlem veri toplama esnasında ortaya çıkacak anormal verilerin ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. (Yazıcı ve diğerleri, 2022)



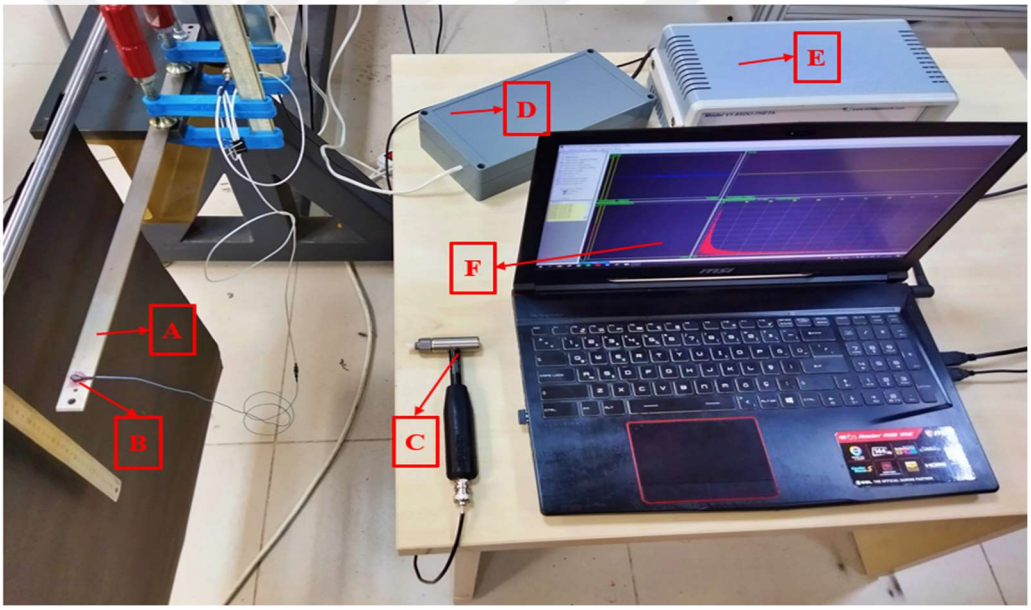
Şekil 3.6. Bilgisayarda kullanılan veri analiz programının çalışma prensibi akış şeması (Yazıcı ve diğerleri, 2022)

3.4. Darbe Çekici Yöntemi ile Modal Test Uygulaması

Test düzeneği oluşturulurken dikkat edilecek ilk noktalardan birisi kullanılan kirişlerin eğri olmamasıdır. Kullanılan test numunelerinin düzgün olmaması sonuçların da doğruluktan uzak olacağı anlamına gelmektedir. Test düzeneği kurulurken, düzeneğin olabildiğince rijit bir yapıya sabitlenmesi önemlidir. Çünkü, sistemin test sırasında numuneler ile birlikte titreşim yapmaması ve rijit sistemin titreşimi sönümlememesi gerekmektedir. Rijit bir yapı seçildikten sonra, kiriş test numunesi bu rijit yapıya bir ucu ankastre mesnetli olacak şekilde sabitlenmelidir. Test numunesinin ölçüm yapılacak olan boyu belirlendikten sonra o kısım serbest bırakılarak kiriş diğer kısmından rijit yapıya ankastre bir şekilde sabitlenir. İvmeölçer, test numunesinin en çok salınım yapacak olan uç kısmına yakın bir noktadan bir balmumu yapıştırıcı yardımı ile sabitlenir. Burada

ivmeölçerin kiriş numuneye oldukça iyi sabitlenmiş olduğundan emin olunmalıdır. Aksi takdirde çekiç darbesinden sonra kirişte başlayan salınım hareketleri esnasında yerinden kayabilir ya da yerinden tamamen ayrılabilir. Bu istenmeyen durum da toplanan verilerin doğru olmamasına yol açacaktır.

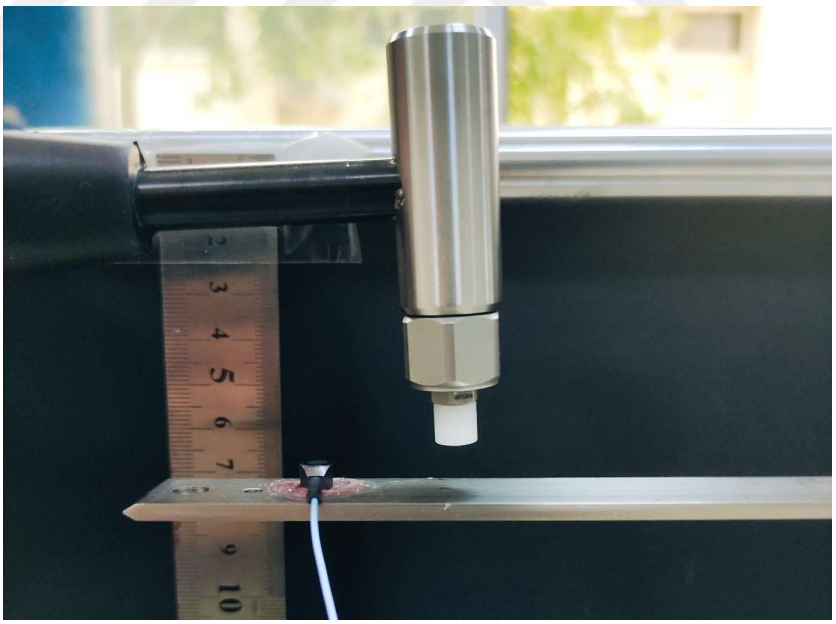
Darbe çekicinin hangi uç ile kullanılacağı belirlendikten sonra, kullanılacak olan uç darbe çekicinin ucuna yerleştirilir. Çekicin alt kısmında bulunan kablo bağlantı noktasından uygun bir kablo ile veri toplama cihazına olan bağlantısı gerçekleştirilir. Aynı şekilde ivmeölçer de uygun kablo bağlantıları ile veri toplama cihazına bağlanmalıdır. Son olarak güç kaynağının da bir ucu 220V şebeke elektrik bağlantısına bir ucu da uygun konektör kablo bağlantıları ile veri toplama cihazına bağlanmaktadır. Veri toplama cihazı ise verilerin aktarımı için bir ara bağlantı kablosu ile bilgisayara bağlanmaktadır. Kurulan test düzeneğinin görseli Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Darbe çekici ile modal test düzeneği **A)** Kiriş numune, **B)** İvmeölçer, **C)** Darbe çekici, **D)** Güç kaynağı, **E)** Veri toplama cihazı ve **F)** Bilgisayar ve veri analiz programı

Test düzeneği kurulduktan sonra sistemin bağlantılarının doğru yapıldığından ve veri alınabileceğinden emin olmak için bilgisayar üzerinde analiz programında "Bağlan" tuşuna basılmalıdır. Eğer bağlantılar doğru yapılmış ve sistem çalışmaya hazır ise program "Sisteme Bağlanıldı." şeklinde uyarı verecektir. Program üzerinden darbe

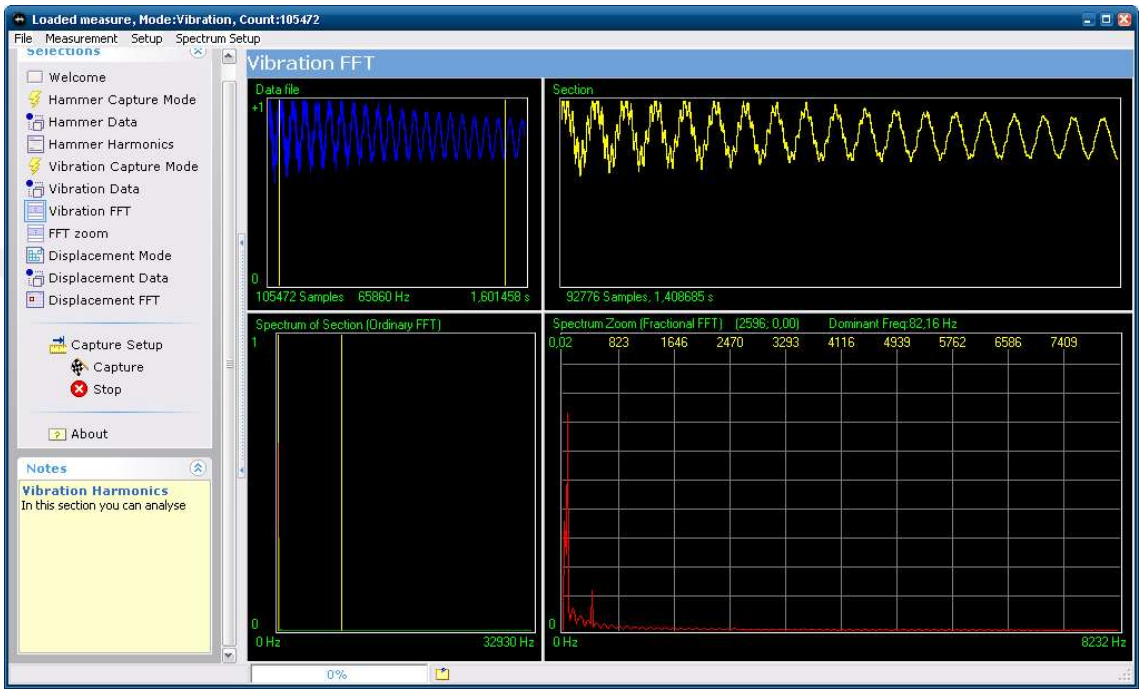
çekicinin modeli seçilir. Yapılacak test türü de “Çekiç Tetiklemesi ile Titreşim Modu” seçildikten sonra sistem veri almaya hazır hale gelir. Darbe çekici ile kiriş numuneye temiz ve uygun bir vuruş yapılması için çok sayıda deneme ve el pratiği gerekmektedir. Yapılacak olan vuruş kiriş numunenin uç kısmına olabildiğince yakın olmalıdır. Vuruşun kalitesi, vuruşun sertliğinin doğru ayarlanması ve çekiç ucunun numuneye dik şekilde temas etmesiyle doğru orantılıdır. Test yapılacak numunenin uzunluğu, numunenin yüksek genlikli titreşim hareketi yapması demektir. Dolayısıyla çekiç ile yapılacak sert bir vuruş, numunenin fark edilmeden birkaç kez daha çekiç ucuna çarpmasına yol açacaktır. Bu istenmeyen durum, alınacak verilerin de doğruluktan uzak olmasına sebep olacaktır. Aynı şekilde çok yavaş yapılan bir vuruş da kiriş numunenin bütün noktalarına kuvvetin iletilmemesine dolayısıyla titreşmeyen noktalar olmasına sebep olacaktır. Olabildiğince ani ve sertliği iyi ayarlanmış bir dokunuş şeklinde yapılacak vuruşlar doğru veriler alınmasına olanak sağlayacaktır. Darbe çekici uygulamasının görseli Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Test numunesine darbe çekici uygulanması

Bilgisayar üzerindeki analiz programından gönderilen verileri yakala komutundan sonra darbe çekici uygulaması gerçekleştirilir. Gerçekleştirilen bu fiziksel tetikten sonra ivmeölçerin topladığı titreşim hareketi verilerinin program tarafından yakalanması

beklenir. Verilerin toplanması bittikten sonra program verileri hafızaya alır ve veriler incelenmeye hazır hale gelir. Program üzerinden titreşim FFT sekmesinde açılan 4 veri inceleme ekranından veriler çağrılır. Ekrana yansıtılan veriler ölçüm süresi aralığı, frekans aralığı gibi seçenekler ile daha detaylı incelenme imkanına sahiptir. Programda verilerin incelendiği veri ekranının görseli Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

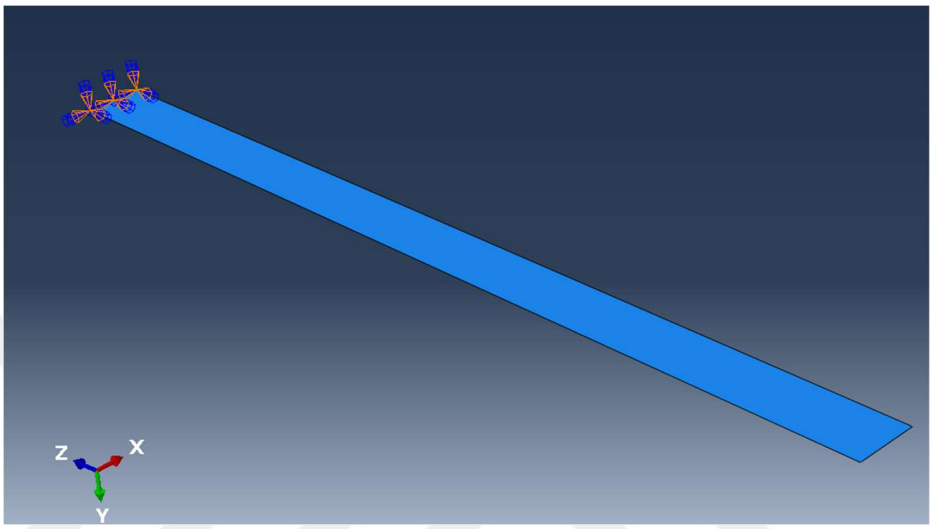


Şekil 3.9. Analiz programı veri inceleme ekranı (Yazıcı ve diğerleri, 2022)

3.5. Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi

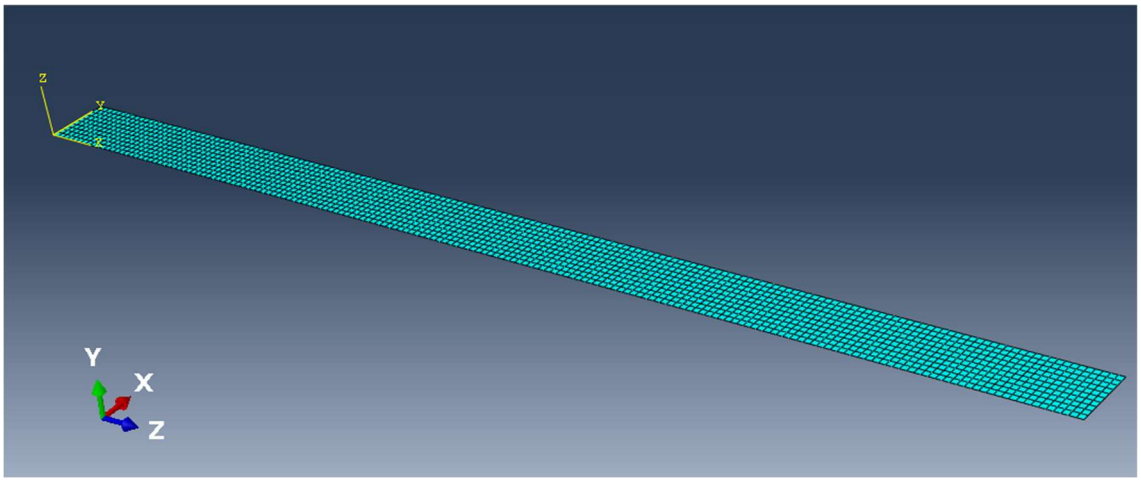
Darbe çekici metodu ile yapılan modal testler ile doğal frekans ve sönüm oranları hesaplanacak olan çelik ve kompozit kiriş numunelerin sonuçlarının sonlu elemanlar ile karşılaştırılması için bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu simülasyon modellemesi ya da matematiksel modelleme için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile çelik ve kompozit kiriş modellerin doğal frekans modları hesaplanması için ABAQUS programından faydalanılmıştır. ABAQUS programında modellenen kirişlere frekans analizi yapılmış ve 3 farklı doğal frekans modunun hesaplanması sağlanmıştır.

Öncelikle 3 boyutlu düzlemde, testlerde kullanılan numune boyutları ile örtüşen 2 boyutlu bir kiriş modellemesi yapılmıştır. Daha sonra yine test düzeneği ile birebir örtüşmesi adına bir kısa kenardan ankastre mesnet sınır şartı uygulanmıştır. Böylelikle test düzeneğine uygun bir kiriş modellemesi gerçekleştirilmiştir. Modellenen kiriş geometrisi ve sınır şartlarının uygulanması Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



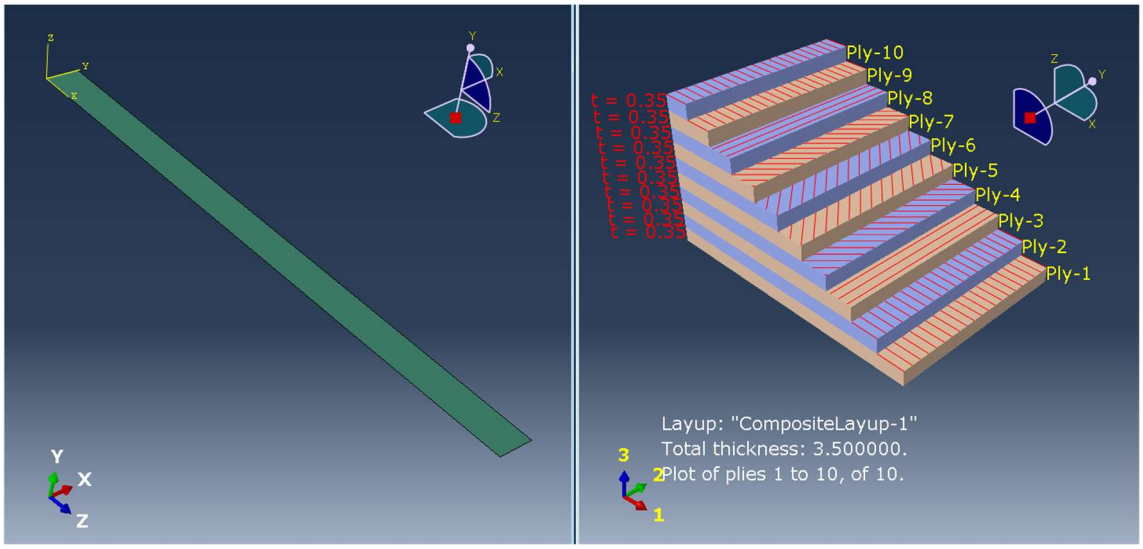
Şekil 3.10. Kiriş tasarım modeli ve ankastre sınır şartı uygulaması

Modellenen kiriş geometrisi sonlu elemanlara ayrıştırılırken quadrilateral adı verilen 4 düğüm noktasından oluşan dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Ankastre mesnetli kirişin sonlu elemanlar modeli 1750 eleman ve 1936 düğüm noktasından oluşmaktadır. Kiriş geometrisinin sonlu elemanlar modeli Şekil 3.11' de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Kiriş sonlu elemanlar modeli

Kiriş modeline testte kullanılan 2 farklı malzeme tanımlaması yapılarak simülasyon ortamında analizler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bu 2 farklı malzeme çelik ve hacimce %45 cam elyaf takviyeli polipropilen malzemelerdir. Çelik malzeme için, özellik kartında elastik malzeme tanımlaması yapılmış olup 7,85 g/cm3 yoğunluk, 210 GPa elastisite modülü ve 0,3 poisson oranı tanımlaması yapılmıştır. Hacimce %45 cam elyaf takviyeli polipropilen malzeme için ise lamina tanımı yapılmış olup 10 katmanlı bir kompozit malzeme tasarımı yapılmıştır. Bu 10 katmanlı kompozit malzeme tasarımında katman sayısı, 0,35 mm katman kalınlığı ve elyaf yönlenme açıları programda malzemeye tanımlanmıştır. Elyaf yönlenme açıları katmanlara göre $[0°/0°/90°/45°/-45°]_s$ olacak şekilde dizayn edilmiştir. ABAQUS programında yapılan katmanlı kompozit malzeme tasarımı ve elyaf yönlenme açıları Şekil 3.12' de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Kompozit malzeme katman gösterimi ve elyaf yönlenmeleri

Kullanılan hacimce %45 cam elyaf takviyeli polipropilen malzemenin özellikleri için Çizelge 3.1'deki malzeme özellikleri kullanılmıştır.

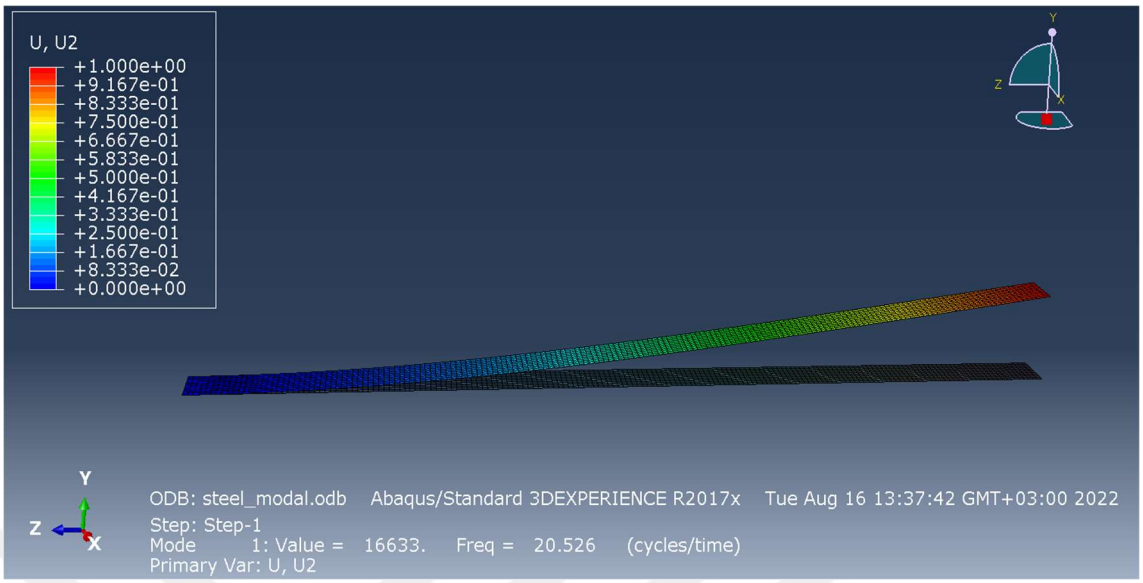
4. BULGULAR

4.1. Sonlu Elemanlar Analizleri

Teorik hesaplamalar ile ilk 3 doğal frekans modu hesaplanan ve testleri yapılacak olan çelik ve cam elyaf katkılı polipropilen malzemeler ABAQUS programında modellenmiştir. Çelik kiriş malzeme için tanımlanan malzeme özellikleri daha önceden (bkz. Çizelge 3.2) belirtilmiştir. Aynı şekilde cam elyaflı kompozit kiriş malzemenin de özellikleri daha önceden (bkz. Çizelge 3.1) belirtilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri için hazır hale getirilen matematiksel modellerden teorik sonuçlara yakın veriler elde edilmesi beklenmektedir.

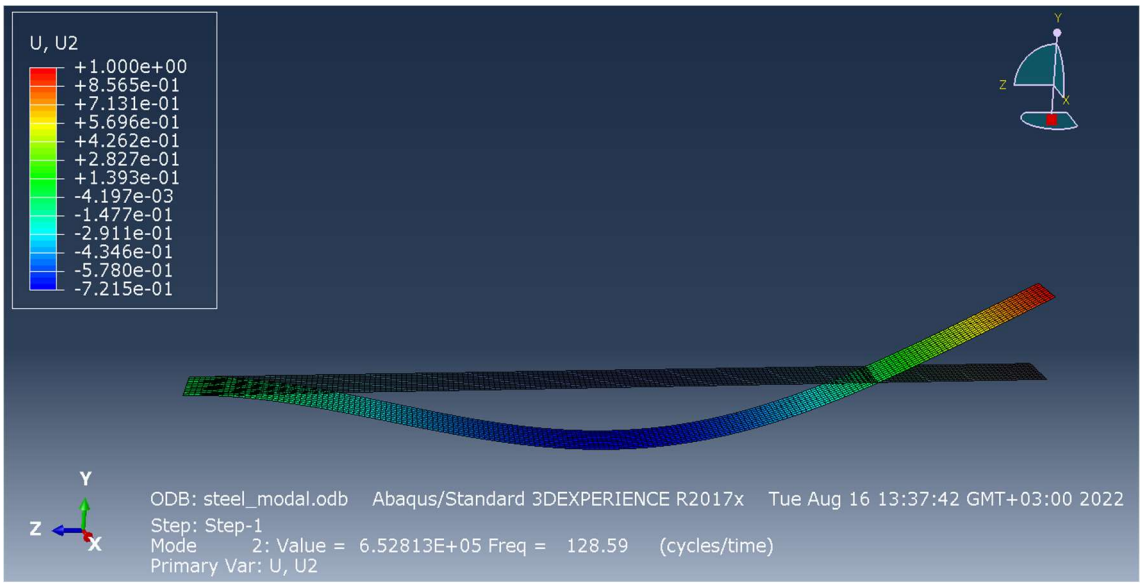
Yapılan analizlerde çelik ve termoplastik kompozit modellerin 10 doğal frekans modu program tarafından hesaplanmıştır. Ancak teorik hesaplamalar ile karşılaştırabilmek adına Y yönünde eğilme hareketi frekanslarını veren ilk 3 doğal frekans modu dikkate alınmıştır. Yapılan uygulamalı testlerde de burulma hareketi gerçekleşmediğinden doğal frekans modları içerisinde burulma hareketi veren sonuçlar değerlendirilmeye tabi tutulmamıştır.

Çelik kirişin sonlu elemanlar analizi sonucunda birinci mod doğal frekansı 20,526 Hz olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.1'de sonlu elemanlar analizi sonucunda çelik kirişin birinci mod doğal frekans değerinde ortaya çıkan davranışı gösterilmiştir. Görsellerde görülen siyah gölgeli model kirişin hareketsiz ilk konumunu temsil etmektedir.



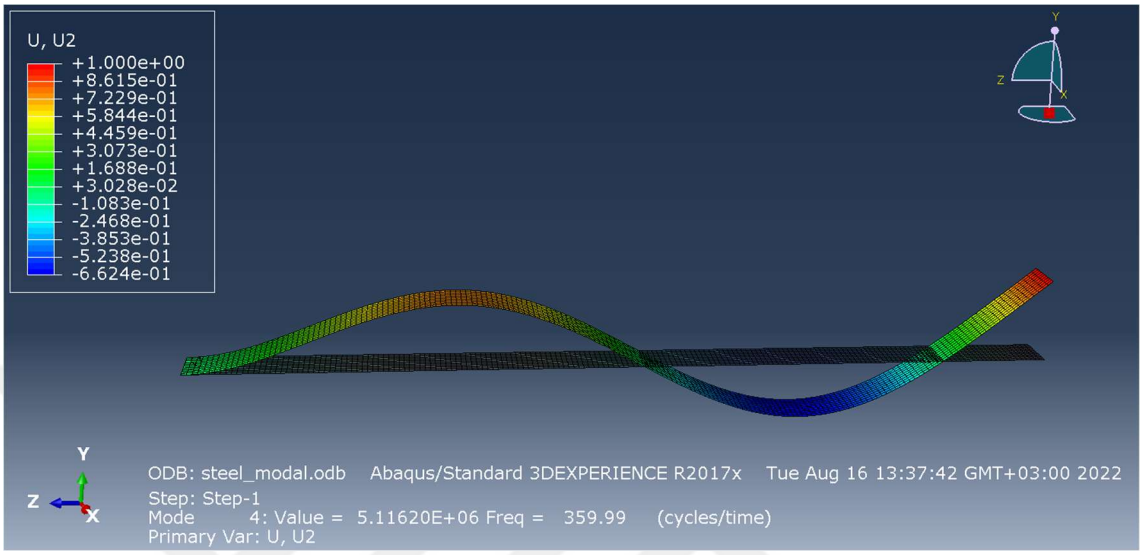
Şekil 4.1. Çelik kirişin birinci mod doğal frekans davranışı

Çelik kirişin sonlu elemanlar analizi sonucunda ikinci mod doğal frekansı 128,59 Hz olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.2'de sonlu elemanlar analizi sonucunda çelik kirişin ikinci mod doğal frekans değerinde ortaya çıkan davranışı gösterilmiştir.



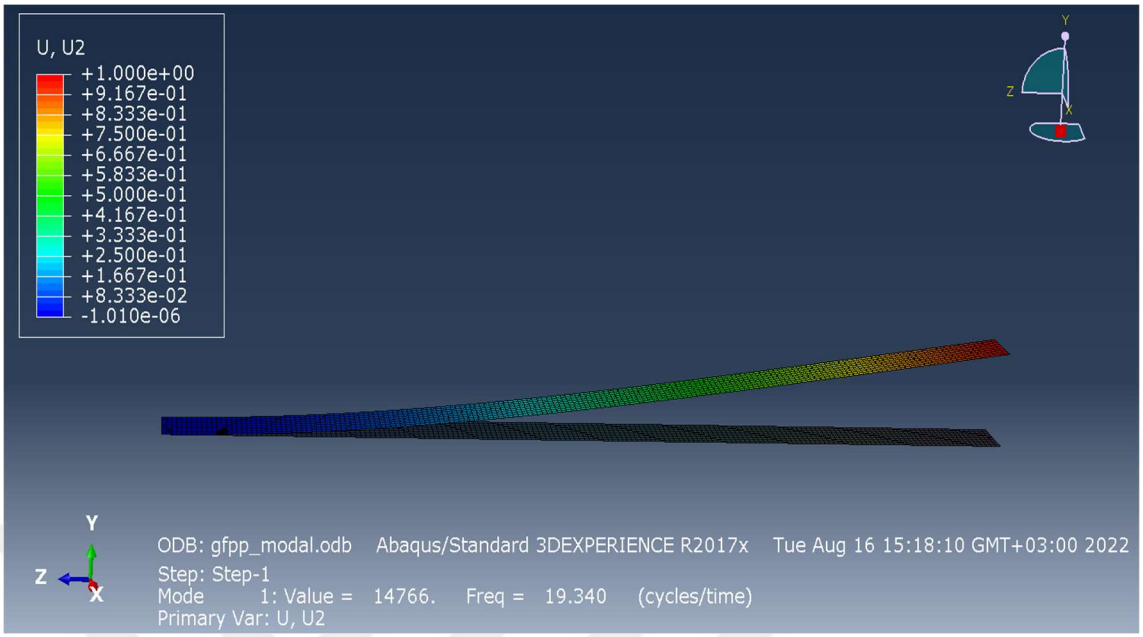
Şekil 4.2. Çelik kirişin ikinci mod doğal frekans davranışı

Çelik kirişin sonlu elemanlar analizi sonucunda üçüncü mod doğal frekansı 359,99 Hz olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3'te sonlu elemanlar analizi sonucunda çelik kirişin üçüncü mod doğal frekans değerinde ortaya çıkan davranışı gösterilmiştir.



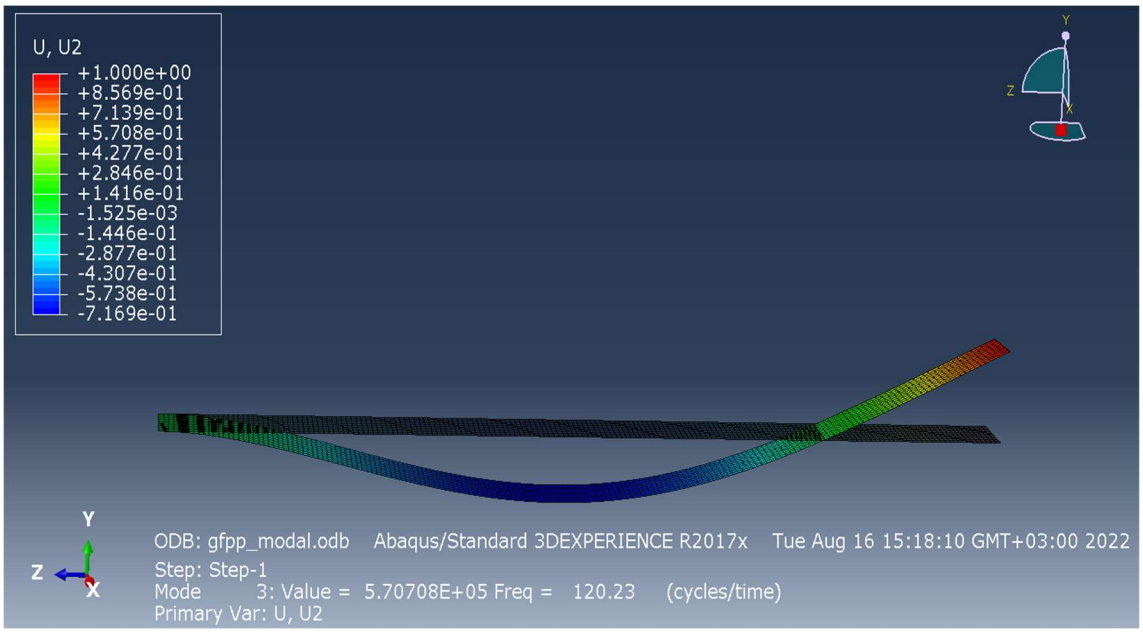
Şekil 4.3. Çelik kirişin üçüncü mod doğal frekans davranışı

Şekil 4.3'de görselde program tarafından 4.mod olarak hesaplanan ve gösterilen değer aslında çelik kirişin üçüncü moduna aittir. Bunun sebebi daha önceden belirtildiği üzere burulma hareketleri ile birlikte verilen doğal frekansların değerlendirilmemiş olmasıdır.
Çelik kirişin sonlu elemanlar analizleri sonuçlandırıldıktan sonra cam elyaf katkılı termoplastik kompozit kirişin sonlu elemanlar analizleri yapılmış ve sonuçları incelenmiştir.
Cam elyaf katkılı termoplastik kompozit kirişin sonlu elemanlar analizi sonucunda birinci mod doğal frekansı 19,340 Hz olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.4'te sonlu elemanlar analizi sonucunda kompozit kirişin birinci mod doğal frekans değerinde ortaya çıkan davranışı gösterilmiştir.



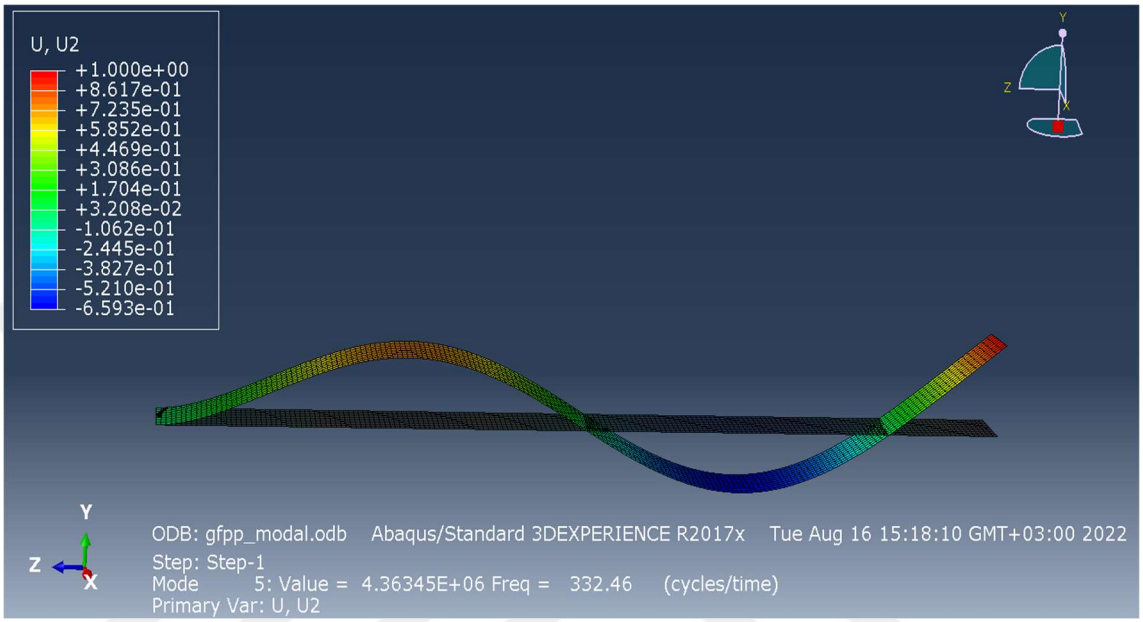
Şekil 4.4. Kompozit kirişin birinci mod doğal frekans davranışı

Kompozit kirişin sonlu elemanlar analizi sonucunda ikinci mod doğal frekansı 120,23 Hz olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.5'te sonlu elemanlar analizi sonucunda kompozit kirişin ikinci mod doğal frekans değerinde ortaya çıkan davranışı gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Kompozit kirişin ikinci mod doğal frekans davranışı

Kompozit kirişin sonlu elemanlar analizi sonucunda üçüncü mod doğal frekansı 332,46 Hz olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.6'da sonlu elemanlar analizi sonucunda kompozit kirişin üçüncü mod doğal frekans değerinde ortaya çıkan davranışı gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Kompozit kirişin üçüncü mod doğal frekans davranışı

Şekil 4.6.'da görselde program tarafından beşinci mod olarak hesaplanan ve gösterilen değer aslında kompozit kirişin üçüncü moduna aittir. Bunun sebebi daha önceden belirtildiği üzere burulma hareketleri ile birlikte verilen doğal frekansların değerlendirilmemiş olmasıdır.

Çizelge 4.1. Sonlu elemanlar analizleri sonucu elde edilen doğal frekans modları

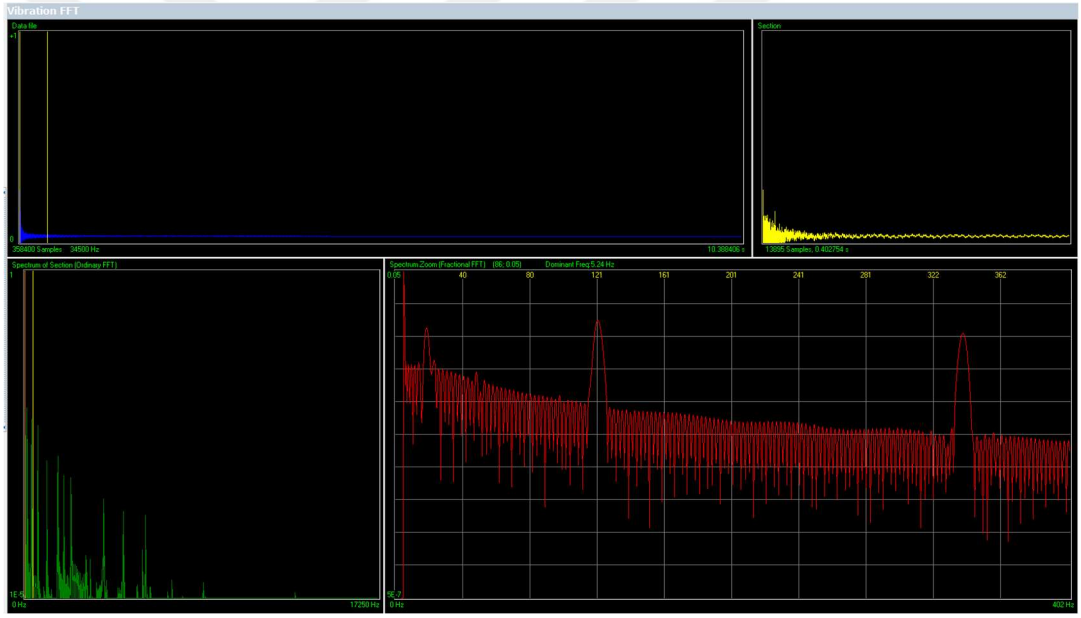
	Mod 1 (Hz)	Mod 2(Hz)	Mod 3(Hz)
Çelik Kiriş	20,526	128,59	359,99
Kompozit Kiriş	19,340	120,23	332,46

Çelik ve kompozit kirişlerin sonlu elemanlar analizi sonuçlarında bulunan ilk 3 mod doğal frekans değerleri toplu olarak Çizelge 4.1'de verilmiştir.

4.2. Darbe Çekici ile Modal Test Bulguları

Darbe çekici ile uygulamalı olarak yapılan testlerde çelik ve kompozit kirişler ankastre olarak mesnetlenmiştir. Mesnetlenen kirişler için 350 mm test uygulama alanı serbest bırakılmıştır. Kirişlerin uç kısmına bağlanan ivme ölçer sayesinde darbe çekici ile tetiklenen kiriş numunelerden veriler toplanması sağlanmıştır. Toplanan genlik, frekans, süre verileri veri toplama cihazı yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Aktarılan veriler analiz programında incelenerek hem çelik hem de kompozit kiriş numune için doğal frekans modları program üzerinden hesaplanmıştır.

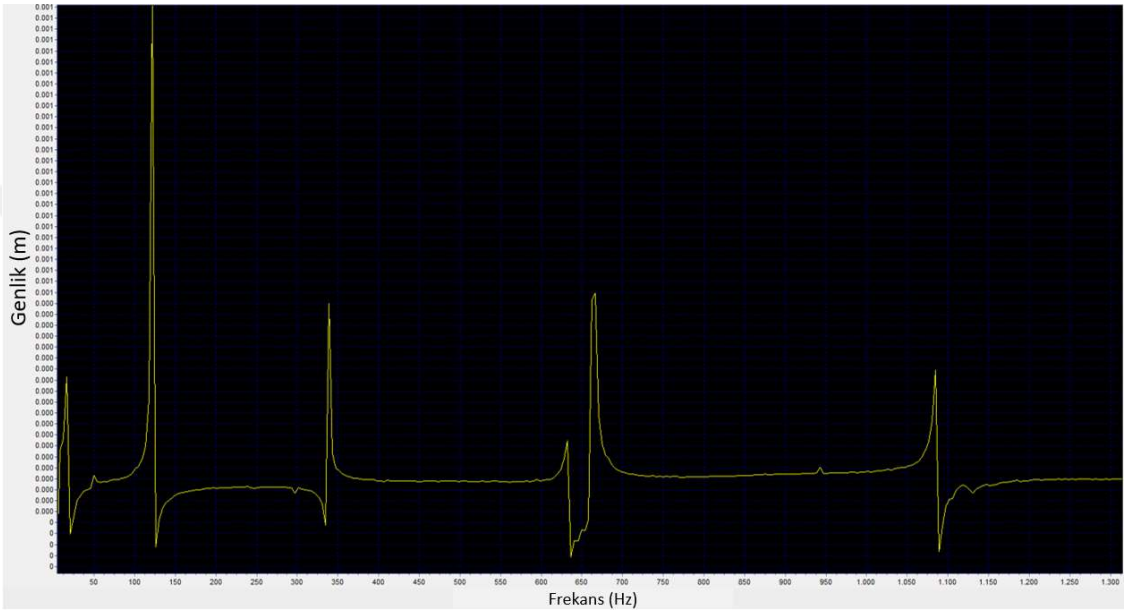
Çelik kiriş numune için test sırasında toplanan veriler ve analiz programında incelenen veri ekranı Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Çelik kiriş için veri analiz ekranı

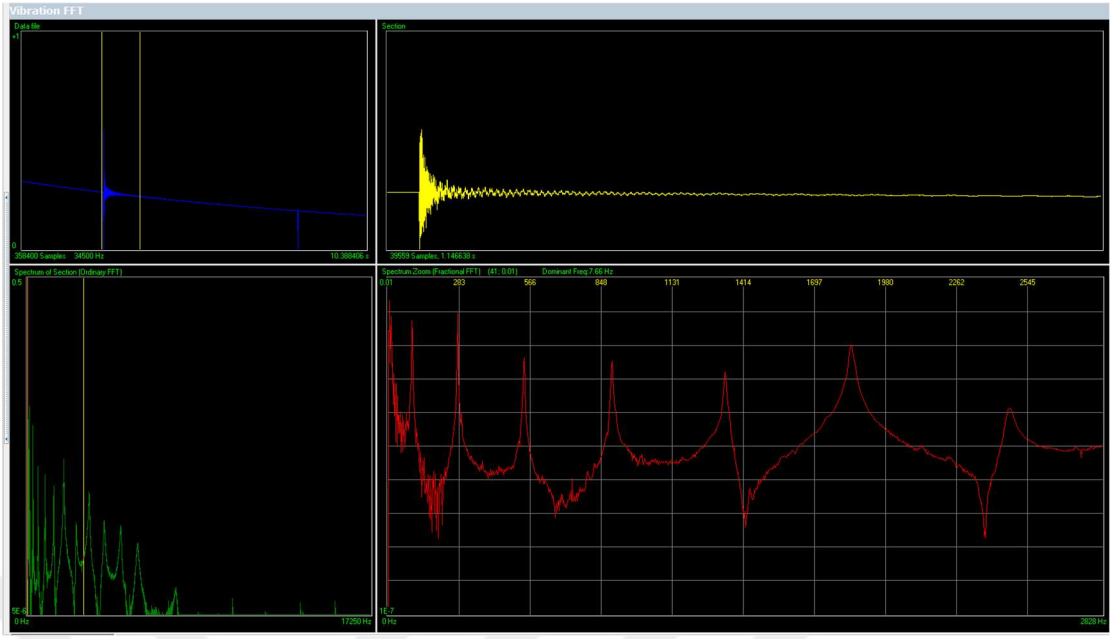
Şekil 4'7 de görülen 4 pencereli veri analiz ekranında sol üstte mavi renk çizgiler ile gösterilmiş veriler titreşim hareketinin süreye bağlı olarak gelişimini göstermektedir. Sağ üstte bulunan sarı çizgiler ile belirtilen ekran ise titreşim-süre hareketini gösteren solundaki pencerenin daha yakından görüntülenmesini sağlamaktadır. Sol altta bulunan yeşil çizgiler ile ifade edilmiş veri ekranı ise test sonucunda detaylı incelenecek olan frekans bant genişliğinin ayarlanarak sağdaki kırmızı grafik ekranına yansıtmaktadır.

Analiz programında elde edilen verilen incelendiğinde kırmızı çizgiler ile ifade edilen FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) grafiği ekranında genlik ve frekans değerleri sonuçları gösterilmektedir. Bu grafik ekranında görülen belli frekans değerlerindeki pik noktaları test numunesinin doğal frekans mod değerlerine karşılık gelmektedir. Çelik numunenin FFT grafiği yakından incelenmiş ve doğal frekans noktaları tespit edilmiştir. Şekil 4.8'de çelik test numunesinin doğal frekans modlarının gösterildiği FFT grafiği verilmiştir.



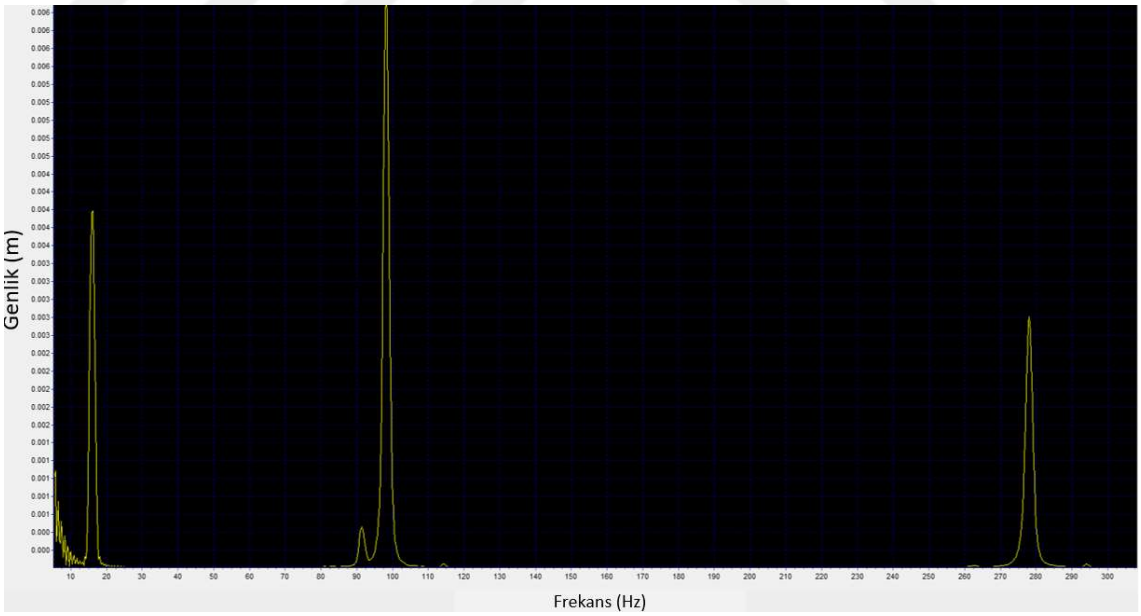
Şekil 4.8. Çelik kiriş için doğal frekans modları

Şekil 4.8' deki grafik incelendiğinde çelik numune için ilk 3 doğal frekans modunda sonlu elemanlar analizlerinde çıkarılan sonuçların oldukça yakın olduğu gözlemlenmektedir.
Aynı şekilde kompozit numune için de veri analiz programında toplanan veriler incelenmiş ve doğal frekans modlarının grafikteki pikler ile birlikte görüldüğü gözlemlenmiştir. Kompozit test numunesi için veri analiz programındaki veri ekranının görseli Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Kompozit kiriş için veri analiz ekranı

Kompozit kiriş numune için doğal frekans modlarının gösterildiği grafik şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Kompozit kiriş için doğal frekans modları

Şekil 4.10'da kompozit kiriş numune için ilk 3 doğal frekans modunun hangi frekans değerlerine karşılık geldiği net bir şekilde görülmektedir. Burada sonlu elemanlar analizi

yapılan ve doğal frekans modları hesaplanan kompozit kirişin test sonuçlarının simülasyona yakın ancak yine de beklenen değerden daha düşük çıktığı görülmektedir. Çelik ve kompozit kiriş numunelerin uygulamalı testler sonucu elde edilen ilk 3 doğal frekans modları Çizelge 4.2'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Uygulamalı testler sonucu doğal frekans modları

	Mod 1 (Hz)	Mod 2(Hz)	Mod 3(Hz)
Çelik Kiriş	18,83	121,60	338,2
Kompozit Kiriş	16,75	98,67	278,33

Ayrıca sonlu elemanlar analizleri yapılan ve uygulamalı testleri yapılan çelik ve kompozit kiriş numunelerin karşılaştırmalı sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Çelik ve kompozit kiriş karşılaştırmalı doğal frekans değerleri

Doğal Frekans	Mod 1 (Hz)	Mod 2 (Hz)	Mod 3 (Hz)
Çelik Sonlu Elemanlar	20,526	128,59	359,99
Kompozit Sonlu Elemanlar	19,340	120,23	332,46
Çelik Test Uygulama	18,83	121,60	338,2
Kompozit Test Uygulama	16,75	98,67	278,33

Çizelge 4.3'te de görüldüğü üzere kompozit kirişin uygulamalı testinden elde edilen veriler sonlu elemanlar ve teorik hesaplamalardan çelik kirişe göre daha uzak sonuçlar vermiştir. Bunun sebebi kompozit kirişin üretiminden kaynaklı oluşan sorunlar olma ihtimalidir. Çünkü teorik ve sonlu elemanlar hesaplamalarında alınan veriler kompozit kirişin üretiminde kullanılan malzemenin teorik verileridir. Dolayısıyla üretim esnasında oluşacak en ufak hata bile sonuçların farklılaşmasına sebep olacaktır. Bu üretim kaynaklı sorunlar test yapılırken ve sonuçlar incelenirken göz önünde bulundurulmalıdır.

Tez kapsamında yapılan çalışmada ulaşılması gereken verilerden bir diğeri ise çelik ve kompozit kiriş numunelerinin dinamik sönüm katsayılarıdır. Dinamik sönüm katsayısı hesabı yapabilmek için öncelikle alınan verilerden genliklerin incelenmesi gerekmektedir. Uygulamalı test sonucu analiz programından elde edilen genlik değerlerinden bir aralık belirlenir. Bu genlik aralığında n adet genlik değeri seçilir. Seçilen n adet genlik değeri denklem (bkz. (2.52)) eşitliğinden logaritmik azalma oranını vermektedir. Bulunan logaritmik azalma oranı denklem (bkz. (2.54)) eşitliğinde yerine yazılarak dinamik sönüm oranı bulunmuş olur. Bu kapsamda uygulamalı testlerden elde edilen verilerden hesaplanan çelik ve kompozit kiriş numunelerinin dinamik sönüm oranı sonuçları Çizelge 4.4'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.4. Çelik ve kompozit kiriş karşılaştırmalı dinamik sönüm oranları

	İlk Genlik (m)	Son Genlik (m)	Genlik Adedi	Logaritmik Azalma	Dinamik Sönüm Oranı
Çelik	0,006	0,0031	10	0,0756	0,012
Kompozit	0,011	0,003	10	0,13	0,02068

Çizelge 4.4'te de görüldüğü üzere, alınan 10 genlik aralıktan ve denklem (bkz. (2.53)) ve (bkz. (2.54))'ten hesaplanan dinamik sönüm oranları karşılaştırılmıştır. Kompozit malzemenin dinamik sönüm oranı çelik malzemeye göre daha yüksek çıkmıştır. Bu kompozit malzemelerin geliştirilmesinde hedeflenen ve istenen sonuçlardan biridir. Kompozit malzemelerin dinamik sönüm oranlarının çelik malzemelere göre yüksek olması, titreşim sönümleme davranışının çelik malzemelerden daha iyi olması ve bu yüzden tercih edilebilir olması demektir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında çelik ve kompozit malzemelerin doğal frekanslarının incelenmesi ve dinamik sönüm katsayılarının bulunması üzerine çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak testleri yapılmak üzere 550 mm boyunda 20 mm en ve 3 mm kalınlığa sahip bir çelik kiriş numune seçilmiştir. Daha sonra kompozit malzeme testleri yapılması için bir malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılmak üzere üretilecek kompozit malzeme hacimce %45 sürekli cam elyaf takviyeli polipropilen olarak belirlenmiştir. Daha sonra 10 katmanlı bir kompozit malzeme üretimi için elyaf yönlenmeleri belirlenmiştir. Üretilecek kompozit malzemenin katmanları belirlenen elyaf yönlenmeleri doğrultusunda dikkatlice üst üste getirilerek hazırlanmıştır. Üretime hazır olan 10 katmanlı kompozit malzeme sıcak presleme yöntemi ile plaka haline getirilmiştir. Daha sonra üretilen 3.5 mm kalınlığındaki plakadan 500 mm boyunda, yine 20 mm eninde olacak şekilde kiriş numuneler su jeti ile düşük toleranslar ile kesilmiştir. İkincil olarak tasarlanan bu malzemeler sonlu elemanlar analizi yapılmak üzere ABAQUS programında modellenmiştir. Ankastre mesnetli 350 mm boyunda modellenen kiriş numunelere malzeme tanımlamaları gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme 10 katmanlı ve elyaf yönlenmeleri ile birlikte modellenerek kullanılan malzemenin teorik verileri malzeme kartına tanımlanmıştır. Teorik kompozit malzeme verilerinin girilmesinin amacı sonlu elemanlar analizi sonucunda doğru sonuçlar alınmasını sağlamaktır. Sonlu elemanlar analizleri sonucunda alınan doğal frekans verileri raporlanmış ve çelik malzeme ile kompozit malzemenin karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. Daha sonra sonlu elemanlarda doğal frekans modları bulunan kirişleri test verileri ile karşılaştırmak adına bir darbe çekici ile modal test düzeneği kurulumu gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinde rijit bir yapıya sabitlenen kiriş numuneler, bir darbe çekici, bir ivmeölçer, bir veri toplama cihazı, bir güç kaynağı, bir de bilgisayar ortamında veri izleme ve analiz programı kullanılmıştır. Darbe çekici ile yapılan modal test ve analiz sonuçları bilgisayar programında incelenmiş ve malzemelerin doğal frekans modları hesaplanmıştır. Daha sonra modal test verilerinden hesaplanan malzemelerin doğal frekansları karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve raporlanmıştır. Sonlu elemanlar analizleri sonucunda alınan veriler ile modal test sonucunda alınan veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve raporlanmıştır. Son olarak modal testlerden alınan genlik, frekans ve zaman verileri ile birlikte malzemelerin

logaritmik düşüş oranları ve dinamik sönüm katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan çelik ve kompozit kiriş numunelerin logaritmik düşüş oranları ve dinamik sönüm katsayıları karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve çizelge halinde raporlanmıştır.

Yüksek lisans tez kapsamında özet olarak aşağıdaki spesifik bulgular paylaşılmıştır;

- Çelik ve cam elyaf katkılı polipropilen kompozit kiriş malzemelerin doğal frekans modlarının darbe çekici yöntemi ile bulunması ve karşılaştırılması,
- Çelik ve cam elyaf katkılı polipropilen kompozit kiriş malzemelerin sonlu elemanlar yöntemi ile test sonuçlarının karşılaştırılması,
- Çelik ve kompozit kiriş malzemelerin dinamik sönüm katsayılarının testlerden elde edilen veriler ışığında hesaplanması,
- Son olarak, kompozit malzemelerin çelik malzemelerden daha yüksek titreşim sönümleme kabiliyetlerinin olduğunun karşılaştırmalı şekilde gösterilmesi.

KAYNAKLAR

Abdellah, M.Y., Alharthi, H., Husein, E., Abdal-hay, A., & Abdel-Jaber, G.T. (2021). Finite Element Analysis of Vibration Modes in Notched Aluminum Plate. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments.* 44(10), 343-353. https://jmerd.net/10-2021-343-353

Beşergil, B. (2016). *Kompozitler Temel İlkeler-Test Metotları*. Gazi Kitabevi.

Beşergil, B. (2021). *Takviye Malzemelerin Orijinlerine Göre Sınıflandırılması*. http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/a_6.html

Bodur, M. S. (2016). *Doğal Lif Takviyeli Kompozitlerde Lif / Matris Ara Yüzey İyileştirme Çalışmaları ve Çevresel Koşullara Göre Karakterizasyonu (Doktora tezi).* İstanbul Teknik Üniversitesi.
http://hdl.handle.net/11527/14063

Callister, W.D., & Rethwisch, D.G. (2009). *Materials Science and Engineering*. Wiley

Chiu, M.C., & Chang, Y.C. (2009). Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control. *A Model Test on A Clamped Cantilever Beam.* 41-56. Nova Science Publishers Inc.

Çakar, O. (2003). *Titreşim Testlerinden Elde Edilen Verilerin Kalitesinin İyileştirilmesi (Doktora Tezi).* İstanbul Teknik Üniversitesi.
https://polen.itu.edu.tr/items/e5db4c6f-8dfb-4494-89d6-80f64968bd63

Ewins, D.J. (1984). *Modal Testing: Theory and Practice (Mechanical engineering research studies).* Research Studies Press Ltd.

Grafe, H. (1998). *Model Updating of Large Structural Dynamics Models Using Measured Response Functions (Doctor of Philosophy Thesis*), Technology and Medicine University of London.
https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/dynamics/40375700.PDF

Hörnlund, M., & Papazoglu, A. (2005). *Analysis and measurements of vehicle door structural dynamic response. (Master Thesis).* Lund University, Sweden. https://www.lth.se/fileadmin/byggnadsmekanik/publications/tvsm5000/web5131.pdf

Huseyinoglu, M. (2017). *Yapısal Dinamik Analiz İçin Sonlu Elemanlar Modellerinin Frekans Tepki Fonksiyonları Kullanılarak Doğrulanması ve Güncellenmesi (Doktora Tezi)*. Fırat Üniversitesi.
https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=FK78yisEQdYA9RKhY-Vvzw&no=jh8zIlS2Tes-gyyrUCccfA

Kaw, A.K. (2006). *Mechanics of Composite Materials*. CRC Press.

Klimenda, F., & Soukup, J. (2016). Modal analysis of thin aluminium plate. *XXI International Polish–Slovak Conference Machine Modeling and Simulations 2016, 177, 1-16.* https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.176

Kurnaz, G. (2020). *Mekanik Sistemlerin Doğal Frekanslarının Frekans Tepki Fonksiyonları Kullanılarak İstenilen Değerlere Kaydırılması (Yüksek Lisans Tezi)*. Fırat Üniversitesi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=4J_FzTwlrMCH4qBROpXPH_f4QivRVTMsSR8lQk9grWcmR_bPD_VXSqdB4OHtRjhT

Kuzu, E. (2021). *Termoplastik Malzemeler İçin Elyaf Uyumlaştırma Sistemleri ve Lif/Matris Ara Yüzey Performansının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi)*. Uludağ Üniversitesi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=tqUiYt63sTQLTpozMJ92QlDa_MMQ9rp-DqHNIstavwCPrnxMwqgzI1W_xYBRuzJS

Mazumdar, S.K. (2002). *Composite Manufacturing: Product, Materials and Process Engineering*. CRC Press.

Mishra, I., & Sahu, S.K. (2014). Modal Analysis of Woven Fiber Composite Plates with Different Boundary Conditions. *International Journal of Structural Stability and Dynamics.* 15(1), 1540001. https://doi.org/10.1142/S0219455415400015

Moritomi, S., Watanabe, T., & Kanzaki, S. (2010). Polypropylene Compounds for Automotive Applications. *Sumitomo Kagaku. 2010(I).* https://www.sumitomo-chem.co.jp/english/rd/report/files/docs/01_2010-1e.pdf

Pagev. (2017). Türkiye Otomotiv Plastikleri Sektör İzleme Raporu. https://pagev.org/upload/files/Hammadde%20Yeni%20Tebliğ%20Bilg.%203/Türkiye%20Otomotiv%20Plastikleri%20Sektör%20İzleme%20Raporu%202017.pdf

Park, S.-J. (2018). Carbon Fibers (2nd Edition). *Testing of Carbon Fibers and Their Composites. 139-184.* Springer Series in Materials Science. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0538-2_5

Pingulkar, P., & Suresha, B. (2016). Free Vibration Analysis of Laminated Composite Plates Using Finite Element Method. *Polymers & Polymer Composites*. 24(7), 529-538. https://doi.org/10.1177/096739111602400712

Sonawane, A.R., & Talmale, P.S. (2017). Modal Analysis of Single Rectangular Cantilever Plate by Mathematically, FEA and Experimental. International Research *Journal of Engineering and Technology.* 4(8), 264-269. https://www.irjet.net/archives/V4/i8/IRJET-V4I847.pdf

Yazıcı, M., Kul, B., Kılık, E. & Motorcu, A.R. (2022) *Development A Modal Test System For Estimating The Dynamic Properties Of Structures* [Yayınlanmamış Makale]