

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPOZİT C KİRİŞLERİN DENEYSEL MODAL
ANALİZ METODUYLA MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Turan ESER

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Ömer Kadir MORGÜL

Ağustos 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


**KOMPOZİT C KİRİŞLERİN DENEYSEL MODAL
ANALİZ METODUYLA MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**


YÜKSEK LİSANS TEZİ


Ahmet Turan ESER

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 26.08.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Recep KOZAN
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Murat PAKDİL
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
Ömer Kadir MORGÜL
Üye

BEYAN

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



Ahmet Turan ESER

10.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ömer Kadir MORGÜL'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel modal analiz çalışmalarında laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen ve bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DAL'a teşekkür ederim.

Hayatları boyunca evlatlarını milli ve dini değerlerle yetiştiren, bugünlere gelmemizde paha biçilemez emekleri bulunan kıymetli anneme ve babama sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadarki başarılarımda ve bu çalışmam sırasında her türlü desteğini benden esirgemeyen, ne zaman hayatıma dokunsa muhakkak bana değer katan sevgili eşim Selda ESER'e ve hayatımıza farklı bir önem ve mana kazandıran kızırıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ	ix
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	9
3.1. Sabit Kesit Alanına Sahip İnce Cidarlı Çubuğun Sonlu Elemanları...	9
3.1.1. Rijitlik ve kütle matrisleri.....	11
3.2. Timoshenko Kiriş Teorisi.....	13
3.3. Fiber ile Güçlendirilmiş Tabakalı Kompozit Malzemenin Elastisite	15
Modülü	
3.3.1. Malzeme modellerinin temel mekanikleri	18
3.3.2. Boyuna elastisite modülü.....	20
3.3.3. Enine elastisite modülü.....	22

BÖLÜM 4.

KOMPOZİT C KİRİŞLERİN DENEYSEL MODAL ANALİZİ.....	25
4.1. Deneysel Modal Analiz (DMA).....	25
4.2. Deneysel Modal Analizde Kullanılan Ölçüm Araçları.....	26
4.2.1. Darbe Çekici.....	26
4.2.2. İvme ölçerler.....	27
4.2.3. Dinamik sinyal analizörü ve yazılımları.....	28
4.3. Kompozit C Kirişlerin Doğal Frekanslarının Sonlu Elemanlar Metoduyla Belirlenmesi.....	28
4.4. Kompozit C Kirişlerin Deneysel Modal Analizi.....	37

BÖLÜM 5.

TARTIŞMA VE SONUÇ	50
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	55

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Kesit Alanı
A_j	: Entegrasyon sabiti
B_j	: Entegrasyon sabiti
b	: Kiriş flanş ölçüsü
DMA	: Deneysel Modal Analiz
E	: Young's Modülü
EI_x	: Eğilme Rijitliği
EI_w	: Çarpılma Rijitliği
e	: Kayma merkezinin, ağırlık merkezine uzaklığı
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
FRF	: Frekans Cevap Fonksiyonu
G	: Kayma modülü
GJ	: Saint – Venant Burulma Rijitliği
h	: C kirişin sırt ölçüsü
I_x, I_y	: x-y eksenlerindeki atalet momentleri
I_w	: Sektörel atalet momenti (Çarpılma-burulma sabiti)
[K]	: Rijitlik matrisi
\mathbf{K}^e, \mathbf{K}	: Eleman ve global rijitlik matrisleri
\mathbf{K}_s	: Saint-Venant rijitlik matrisi
L	: Kirişin uzunluğu
[M]	: Kütle matrisi
\mathbf{M}^e, \mathbf{M}	: Eleman ve global sürekli-kütle matrisleri
\mathbf{M}_s	: Saint-Venant kütle matrisi
m	: Birim uzunluktaki kiriş kütlesi
m_L	: Kiriş ağırlığı
Q	: Yerdeğiştirme vektörü

r	: Kesitin ağırlık merkezi etrafındaki polar jirasyon yarıçapı
RVE	: Temsili hacim elemanı
s_j	: Karakteristik denklemin köklerini belirleyen parametre
t	: Zaman
\mathbf{u}	: Yerdeğiştirme matrisi
U_c	: Kompozitte depolanan toplam gerinim enerjisi
U_f	: Fiberlerdeki gerinim enerjisinin toplamı
U_m	: Matrisdeki gerinim enerjisi
v_f	: Fiber hacim kesiri
v_m	: Matris hacim kesiri
v_v	: Boşlukların hacim kesiri
W_i	: i . bileşenin ağırlığı
W_f	: Fiber malzemesinin ağırlığı
W_m	: Matris malzemesinin ağırlığı
W_c	: Kompozitlerin ağırlığı
z	: Kirişin elastik eksenine boyuna mesafe
θ	: Açısal yerdeğiştirme
$\hat{\theta}$: Açısal yerdeğiştirme genliği
λ_B	: Eğilme etkisi için boyutsuz frekans parametresi
λ_T	: Burulma etkisi için boyutsuz frekans parametresi
v	: Kayma merkezinin y-yönünde zamana bağlı eğilme yer değiştirmesi
\hat{v}	: y-yönünde eğilme yer değiştirmesinin genliği
ρ	: Malzemenin yoğunluğu
ω	: Açısal frekans

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Açık, sabit kesitli ince cidarlı çubuğun sonlu elemanı	10
Şekil 3.2. Konsol C - kiriş geometrisi (a) kullanılan koordinat sistemi (b) dönme hareketinin tanımı	14
Şekil 3.3. C-Kirişler için b, h ve L sırasıyla flanş genişliğini, kiriş gövde yüksekliğini ve kiriş uzunluğunu belirtir	14
Şekil 3.4. İdealize edilmiş kare ve üçgen fiber-paket geometrilerine sahip temsili hacim elemanları	18
Şekil 3.5. Malzeme modelinin temel mekaniğinde kullanılan temsili hacim elemanı ve basit gerilme durumları	19
Şekil 4.1. Deneysel modal analiz şematik gösterimi.....	26
Şekil 4.2. Brüel & Kjør PHOTON+ Dinamik Sinyal Analizörü	28
Şekil 4.3. C kirişlere ait üç boyutlu model ve kiriş ölçüleri	30
Şekil 4.4. ANSYS Workbench programında ki Epoxy E-Glass Wet malzemesine ait mühendislik değerleri.....	30
Şekil 4.5. E-Cam/Epoksi kompozit C1-[0°] ₄ kirişinin Mod 1 şekli (1. burulma).....	31
Şekil 4.6. E-Cam/Epoksi kompozit C1-[0°] ₄ kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).....	32
Şekil 4.7. E-Cam/Epoksi kompozit C1-[0°] ₄ kirişinin Mod 3 şekli.....	32
Şekil 4.8. E-Cam/Epoksi kompozit C1-[0°] ₄ kirişinin Mod 4 şekli.....	32
Şekil 4.9. E-Cam/Epoksi kompozit C1-[0°] ₄ kirişinin Mod 5 şekli	33
Şekil 4.10. E-Cam/Epoksi kompozit C2-[90°] ₄ kirişinin Mod 1 şekli (1. burulma)....	33
Şekil 4.11. E-Cam/Epoksi kompozit C2-[90°] ₄ kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).....	33
Şekil 4.12. E-Cam/Epoksi kompozit C2-[90°] ₄ kirişinin Mod 3 şekli.....	34
Şekil 4.13. E-Cam/Epoksi kompozit C2-[90°] ₄ kirişinin Mod 4 şekli.....	34
Şekil 4.14. E-Cam/Epoksi kompozit C2-[90°] ₄ kirişinin Mod 5 şekli.....	34
Şekil 4.15. E-Cam/Epoksi kompozit C3-[0°-30°] _s kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme)...	35
Şekil 4.16. E-Cam/Epoksi kompozit C4-[0°-45°] _s kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme)...	35

Şekil 4.17. E-Cam/Epoksi kompozit C5-[0°-60°] _s kirişinin Mod 2 şekli (1.eğilme)...	35
Şekil 4.18. E-Cam/Epoksi kompozit C6-[0°-90°] _s kirişinin Mod 2 şekli (1.eğilme)...	36
Şekil 4.19. E-Cam/Epoksi kompozit C7-[0-45-0-45°] kirişinin Mod 2 şekli (1.eğilme).....	36
Şekil 4.20. E-Cam/Epoksi kompozit C8-[0-60-0-60°] kirişinin Mod 2 şekli (1.eğilme).....	36
Şekil 4.21. E-Cam/Epoksi kompozit C9-[0-90-0-90°] kirişinin Mod 2 şekli (1.eğilme).....	37
Şekil 4.22. Deneysel modal analiz deney düzeneği – Serbest-serbest.....	38
Şekil 4.23. C- Kirişlerin, serbest-serbest sınır şartlarında elde edilen doğal frekanslarının faz açıları grafiği.....	39
Şekil 4.24. C1-kirişine ait serbest-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.....	39
Şekil 4.25. C2- kirişine ait serbest-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.....	39
Şekil 4.26. C3- kirişine ait serbest-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.....	40
Şekil 4.27. C4- kirişine ait serbest-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.....	40
Şekil 4.28. C5- kirişine ait serbest-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.....	40
Şekil 4.29. C6- kirişine ait serbest-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.....	40
Şekil 4.30. C7- kirişine ait serbest-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.....	41
Şekil 4.31. C8- kirişine ait serbest-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.....	41
Şekil 4.32. C9- kirişine ait serbest-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.....	41
Şekil 4.33. C-Kirişlerin, serbest-serbest sınır şartlarında elde edilen sönüm oranları grafiği (%).....	42
Şekil 4.34. Deneysel modal analiz deney düzeneği – Ankastre-Serbest.....	43

Şekil 4.35. C-Kirişlerin, ankastre-serbest sınır şartlarında elde edilen doğal frekanslarının faz açıları grafiği.....	43
Şekil 4.36. C1-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.....	44
Şekil 4.37. C2-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.....	44
Şekil 4.38. C3-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.....	44
Şekil 4.39. C4-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.....	45
Şekil 4.40. C5-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.....	45
Şekil 4.41. C6-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.....	45
Şekil 4.42. C7-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.....	45
Şekil 4.43. C8-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.....	46
Şekil 4.44. C9-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.....	46
Şekil 4.45. C-Kirişlerin, ankastre-serbest sınır şartlarında elde edilen sönüm oranlarını grafiği (%)......	47

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Rijitlik ve Kütle Matrisleri.....	12
Tablo 4.1. B&K 8206-002 darbe çekici için kalibrasyon değer tablosu.....	27
Tablo 4.2. B&K 4507 ve B&K 4517 ivmeölçerler için kalibrasyon değer tablosu.	27
Tablo 4.3. Deneysel modal analiz ve sonlu elemanlar analizi çalışmalarında kullanılan C kirişlere ait mühendislik değerleri.....	29
Tablo 4.4. Ankastre-serbest sınır şartlarında sonlu elemanlar modal analiz metoduyla elde edilen C kirişlerin ilk10 mod için bulunan doğal frekans değerleri (Hz).....	31
Tablo 4.5. Serbest-serbest sınır şartlarında DMA metoduyla elde edilen, farklı fiber dizilimlerdeki C kirişlerin mod numaraları ve doğal frekansları (Hz).....	38
Tablo 4.6. Serbest-serbest sınır şartlarında DMA metoduyla elde edilen, farklı fiber dizilimlerdeki C kirişlerin sönüm oranları (%).....	35
Tablo 4.7. Ankastre-serbest sınır şartlarında DMA metoduyla elde edilen, farklı fiber dizilimlerdeki C kirişlerin mod numaraları ve doğal frekansları (Hz).....	43
Tablo 4.8. Ankastre-serbest sınır şartlarında DMA metoduyla elde edilen, farklı fiber dizilimlerdeki C kirişlerin sönüm oranları (%).....	46
Tablo 4.9. C1, C2 ve C3 Kirişlerinin DMA ve Sonlu Elemanlar Modal Analiz metodlarıyla elde edilen doğal frekans sonuçlarının karşılaştırılması (Hz).....	47
Tablo 4.10. C4, C5 ve C6 kirişlerinin DMA ve sonlu elemanlar modal analiz metodlarıyla elde edilen doğal frekans sonuçlarının karşılaştırılması (Hz).....	48

Tablo 4.11. C7, C8 ve C9 kirişlerinin DMA ve sonlu elemanlar modal analiz metodlarıyla elde edilen doğal frekans sonuçlarının karşılaştırılması (Hz).....	48
Tablo 4.12. Referans [40]'da çeşitli kompozitler için sunulan mühendislik değerleri.....	49
Tablo 4.13. Referans [45]'de çeşitli kompozitler için sunulan mühendislik değerleri.....	49
Tablo 4.14. Bu çalışmadaki hesaplanan E_1 ve E_2 elastisite modülü değerlerinin referans çalışmalardaki verilerle karşılaştırılması.....	49



ÖZET

Anahtar kelimeler: Deneysel modal analiz, Açık kesitli kiriş, Young's Modülü, Kompozit, Sönüm Oranı

Bu çalışmada, açık kesitli kompozit kirişlerin elastisite ve kayma modüllerinin tahribatsız yöntemlerle tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Tahribatsız muayenelerde birçok metod kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi de yapıların ses ve titreşimlerinin incelenmesidir. Bu çalışmada, deneysel modal analiz metoduyla, değişik fiber dizilime sahip 9 farklı kompozit kirişin serbest – serbest ve ankstre – serbest titreşim analizleri yapılarak kirişlerin doğal frekansları belirlenmiştir. Deneysel modal analiz çalışmalarında Brüel & Kjør RT Pro Photon 7.0 frekans analizörü kullanılmıştır.

İlk bölümde kompozit malzemeler hakkında özet bilgiler sunulmuştur. Bölüm 2’de ise önceki yıllarda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bölüm 3’te tezde kullanılan metotlar hakkında bilgilere yer verilmiştir. Bölüm 4’te deneysel modal analiz çalışmalarına yer verilmiş ve elde edilen veriler tablolar halinde sunulmuştur. Bölüm 5’te ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE C BEAMS BY EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS METHOD

SUMMARY

Keywords: Experimental modal analysis, Open Cross-Section Beam, Young's Modulus, Composite, Damp Ratio

In this study, it is aimed to estimate Elasticity and Shear modulus of open- cross section composite beams by non-destructive methods. Many methods are used in non-destructive tests. One of them is the examination of the sound and vibrations of the structures. The free frequencies of the beams have been determined determined by conducting free - free and fixed - free vibration analysis of 9 different composite beams with different fiber sequences by experimental modal analysis method. Brüel & Kjær RT Pro Photon 7.0 frequency analyzer have been used in the experimental modal analysis studies.

In the first chapter, summary information about composite materials have been presented. In the second chapter, the studies conducted in previous years have been reported. In the third chapter, theoretical information have been given about the methods which have been used in the thesis. In the fourth chapter, experimental modal analysis studies have been given and obtained data have been presented in tables. In the last chapter, the obtained results have been evaluated and interpreted.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin, faydalı üçüncü bir malzeme elde etmek için makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Kompozit malzemelerin avantajı, eğer iyi tasarlanırlarsa, genellikle bileşenlerinin en iyi özelliklerini ve her iki bileşenin de sahip olmadığı bazı özellikleri sergilemeleridir [1].

Kompozit malzemeler, metalik ya da diğer malzemelerce elde edilemeyen, düşük ağırlık, yüksek mukavemet ve rijitlik gibi ihtiyaçları karşılamak için tasarlanabilmektedir. Geçtiğimiz on yıllarda, maliyetlerin azalmasıyla birlikte kompozit malzemeler yapısal bileşenlerde daha çok kullanılır hale gelmiştir. Bununla birlikte kompozit bir yapının performansı, kompozit malzemenin mekanik davranışına oldukça duyarlıdır. Kompozit bir yapının performans beklentisi arttıkça, kompozit malzemelerin mekanik davranışının güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi ihtiyacı daha da önem kazanmıştır [2].

Kompozit ya da değişik tasarımlı malzemelerin eşdeğer elastisite modülünün (E) ve mekanik özelliklerinin tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak belirlenmesi gerekmektedir. Tahribatsız muayenelerde değişik fiziksel yöntemler kullanılmaktadır. Yapının ses veya titreşimleri incelenerek, malzemenin eşdeğer elastisite modülü ve iç sönüm değerleri tahmin edilebilmektedir. Öz malzemenin elastisite modülü aynı şartlarda sabit kalmakla birlikte farklı işlemler ve farklı davranışlar için değişik görüntüde de olabilmektedir. Isıl işlem, yorulma, farklı şekillendirme ve işleme gibi işlemler sırasında elemanın bölgesel olarak elastisite modülünün etkisi değişebilmektedir. Bu değişimleri tahribatlı muayenelerde belirlemek mümkün

olmamaktadır. Çalışmaya hazır parçanın eşdeğer elastisite modülü, titreşim esaslı analizlerle (deneylerle) tahmin edilebilmektedir.

Mekanik sistemde çalışacak elemanların fiziksel özellikleri, mekanik sistemler tasarlanırken iyi bilinmelidir. Modal analiz, sistem elemanlarının yapısal özellikleri hakkında bilgi verebilen bir analiz yöntemidir. Modal analiz ile doğal frekanslar, sönümleme katsayıları ve malzemenin mod şekilleri bulunabilir. Farklı sınır koşullarında çubukları modelleyerek çubuklar üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan modal analizler yapmak mümkündür. Ayrıca çubuk elemanlarının modal analizi için çeşitli analitik yöntemler de kullanılır. Bu yöntemlerden biri, yaygın olarak bilinen Euler-Bernoulli çubuk teorisidir. Çubuk elemanının doğal frekansları ve mod şekilleri, bu teori kullanılarak modellenen çubuk elemanı için modal analiz ile elde edilebilir [3].

Bu teorinin yanı sıra, Timoshenko çubuk teorisi [4] kullanılarak çubuk elemanlarının mod şekilleri ve doğal frekansları analitik olarak elde edilebilir. Çubuğun dinamik davranışı gözlemlenebilir ve modlardaki moment ve deformasyon ilişkileri bir kirişin zorlanmış titreşim analizi ile belirlenebilir [5]. Hasar tespiti, modal analiz kullanılarak ve çubuğa benzer yapılardaki doğal frekans değişimleri güç spektrumu [6] kullanılarak yapılabilir. Çubuğun modal analizinde bulunan doğal frekansları kullanarak çubuğa benzer yapılardaki hasarları tespit etmek mümkündür [7]. Çubuğun bükülme ve burulma davranışı, L-şekilli çubuk yapılarında Euler-Bernoulli çubuk teorisi ile doğrusal modal analiz yapılarak incelenebilir [8]. Hasar ve hasar görmemiş buhar türbini kanadı, doğal frekansları ve mod şekillerini elde etmek için deneysel yöntem ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modal analiz ile incelenebilir [9].

Önceki çalışmalardan da anlaşılacağı gibi, analitik yöntemle çözülmesi zor ve çözümü uzun süren titreşim sorunlarının çözümü, bilgisayar sistemlerinin geliştirilmesi ve programlama dillerinin yayılmasıyla daha kolay hale geldi. Özellikle analitik olarak

özölemeyen titreşim problemleri, sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak ANSYS, CAE, Nastran ve RT Pro Photon 7.0 gibi programlarla kolayca özölebilmektedir [3].

Bu alışmada; serbest serbest 4 tabakalı kompozit bir C kirişin mod şekilleri ve boyutsuz frekans parametreleri, kirişlerdeki temel ilişkiler kullanılarak tahmin edilmektedir. Daha sonra kompozit C kirişin mod şekilleri, ANSYS programıyla ve rezonans frekansları, RT Pro Photon test cihazı ve yazılımı kullanılarak yapılan deneylerle elde edilerek sunulmaktadır. Kirişin elastikiyet modülü, bu frekansların boyutsuz frekans denklemlerinde kullanılmasıyla elde edilmektedir.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Gürsoy [10], yapmış olduğu çalışmada, kompozit çubukların çekme-basma, eğilme ve burulma durumlarındaki elastisite ve kayma modüllerini ve modal sönüm oranlarını deneysel titreşim analizi yardımıyla belirlemiştir. Malzemenin elastisite ve kayma modüllerinin belirlenmesinde frekans bölgesi incelemeleri kullanılmış, modal sönüm oranlarının belirlenmesinde ise kısa zamanlı Fourier dönüşümü kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada; deneysel titreşim analizi ile elde edilen elastisite ve kayma modülü değerleri ile mekanik deneylerle elde edilen elastisite ve kayma modülü değerleri arasında iyi bir uyum yakalamayı başarmıştır.

Demirci [11], E-cam/epoksi örgülü kompozit plakaların analitik ve deneysel titreşim analizini yapmıştır. Yaptıkları bu çalışmada, ilk olarak deney numunesi modelleyerek doğal frekans eşikliklerini elde etmişler ve analitik olarak doğal frekans değerlerini hesaplamışlardır. Devamında ANSYS programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle kompozit plakaların doğal frekanslarını tespit etmişlerdir. Son olarak bir frekans analizörü yardımıyla doğal frekans değerlerini deneysel olarak tespit etmişlerdir. Yazar bu çalışmada bulduğu tüm değerleri sonuçlar kısmında karşılaştırmıştır.

Yılmaz [12], farklı derinlik ve konumlardaki çatlaklara sahip olan eğri kompozit kirişler ile çatlaksız eğri kompozit kirişlerin ilk üç modundaki doğal frekans değerlerinin değişimini sayısal analiz yöntemi ve deneysel olarak hesaplamıştır. Yapılan çalışmada kiriş ankastre (Sabit – Serbest) ve iki ucu ankastre (Sabit – Sabit) mesnetli olarak bağlanmıştır. Sayısal analizler için ANSYS sonlu elemanlar programı, deneysel analizler de ise Siemens firmasının geliştirmiş olduğu LMS SCADAS frekans analizörü kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçlarında, çatlak derinliği arttıkça her iki mesnet durumu için kompozit kirişlerde doğal frekans değerlerinin

azaldığı, çatlak konumu sabit mesnetten uzaklaştıkça da kirişlere ait doğal frekans değerlerinin azaldığı hem sayısal hem deneysel olarak bulunmuştur.

Araújo ve arkadaşları [13] tarafından sunulan çalışmada, genellikle kalın kompozit levhaların altı elastik malzeme modülünün tanımlanması için birleştirilmiş bir sayısal-deneysel yöntem önermişlerdir.

Guan ve arkadaşları [14] yapmış oldukları çalışmada, 4 noktadan mesnetlenmiş, değişik kalınlıklardaki, 1220x2440 mm boyutlarındaki tahta kompozit panellerin hem büyük (majör) hem küçük (minör) eksenlerdeki elastisite modüllerini ve panellerin düzlemsel kayma modüllerini tahmin edebilmek için bir titreşim testi kullanmışlardır. Deneysel modal analiz çalışmasını; tam boyutlu orta yoğunluklu sunta (MDF) ile üç farklı kalınlıktaki yine tam boyutlu sunta üzerinde gerçekleştirmişlerdir. C. Guan ve arkadaşları, ilk dokuz titreşim moduna ait titreşim frekanslarını ve mod biçimlerini belirledikten sonra deneysel modal analiz sonuçları ile teorik modal analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışma sonuçlarının tam boyutlu ahşap kompozit panellerin elastik özelliklerini değerlendirmede iyi bir potansiyele sahip olduğunu belirtmişlerdir,

Latalski ve Kowalczyk [15], çevresel olarak asimetrik rijitlik (CAS) profil özelliklerine sahip olan ince cidarlı kompozit kirişin teorik ve deneysel modal analizini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan analitik model, yazarın önceki araştırmalarına [16,17] dayanmaktadır ve ince cidarlı kompozit yapılar için en klasik ve klasik olmayan etkileri dikkate almaktadır. Teorik sonuçlar, darbeli çekiç testi ve lazer vibrometre testinden elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Lazer vibrometre testinde elde makro fiber kompozit (MFC) yama çalıştırıcıları sistemi uyarmak için kullanılmıştır. Karşılaştırma amacıyla, farklı uyarma yükü sağlayan iki farklı dönüştürücü tipi incelenmiştir.

Günay ve Tımarcı [18], kompozit bir kutu kirişlerin dinamik davranışını anlamak için ANSYS sonlu elemanlar programında kirişin serbest titreşimlerini ve mod biçimlerini tespit etmişlerdir. Daha sonra ANSYS programından elde ettikleri analiz verilerini, literatürde mevcut olan analitik ve diğer sonlu elemanlar teknikleriyle elde edilen

verilerle karşılaştırmışlardır. ANSYS sonuçlarının önceki çalışmalara göre makul sınırlar içerisinde kaldığını gözlemlemişlerdir.

Vo ve Lee [19], ince cidarlı bir lamine kompozit kirişin serbest titreşimini incelemişlerdir. İnce cidarlı kompozit kutu bölümünün dinamik davranışı için genel bir analitik model geliştirmişlerdir. İnce cidarlı kompozit kiriş için doğal frekansları ve bunlara karşılık gelen titreşim modlarını tahmin etmek için yer değiştirmeye dayalı bir boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Hareket denklemlerini Hamilton ilkesinden türetilmiştir. Lif açısının, modül oranının ve sınır şartlarının, titreşim frekansları ve kompozitlerin mod şekilleri üzerindeki etkilerini ele alan ince cidarlı kompozitler için sayısal sonuçlar elde etmişlerdir.

Lee ve Kim [20], ince cidarlı I kesitli bir kompozitin dinamik davranışına uygulanabilir genel bir analitik model geliştirmişlerdir. Bu model klasik laminasyon teorisine dayanmaktadır ve isteğe bağlı laminat istifleme dizisi konfigürasyonu için eğilme ve burulma modlarının birleştirilmesine, yani simetrik ve simetrik olmayan ve çeşitli sınır koşullarına dayanmaktadır. İnce duvarlı bir kompozit kiriş için doğal frekansları ve bunlara karşılık gelen titreşim modlarını tahmin etmek için yer değiştirmeye dayalı bir boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Hareket denklemleri Hamilton ilkesinden türetilmiştir. Elyaf açısının, modül oranının, yükseklik-kalınlık oranının ve sınır şartlarının, kompozitlerin titreşim frekansları ve mod şekilleri üzerindeki etkilerini ele alan ince cidarlı kompozitler için sayısal sonuçlar elde etmişlerdir.

Wekezer [21], sabit ve açık kesitli ince duvarlı çubuklar için doğal frekanslar ve bunlara karşılık gelen modal formlar sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemiştir. Klasik ince duvarlı çubuk teorisinin ardından, çözümlü ve Saint-Venant burulma sertliği hesaba katmıştır. Bu çalışmada sadece küçük genlikli doğrusal titreşimler dikkate alınmıştır. Genelleştirilmiş bir özdeğer problemi incelenerek bunlara karşılık gelen titreşim modlarıyla birlikte doğal frekanslar elde edilmiştir. Yöntemin yakınsama ve doğruluğu, bazı kapalı form çözümlerine ve diğer sayısal sonuçlara dayanarak test edilmiştir. Parçalı sabit (kademeli) sonlu elemanlar modellerinin hatalı sonuçlara yol

açabileceğinden, bu tür çubukları analiz etmek için yöntemin uygulanmaması gerektiği gösterilmiştir.

Lee ve arkadaşları [22], simetrik olarak lamine edilmiş kompozit sandviç plakaların elastik kenar dayanaklı serbest titreşimi Rayleigh-Ritz yaklaşımıyla incelemiştir. Önerilen Rayleigh-Ritz yöntemi, katman bazında doğrusal yer değiştirme teorisi temelinde inşa edilmiştir. Farklı sınır koşullarına sahip kompozit sandviç plakaların doğal frekanslarını öngörmedeki yöntemin doğruluğu, literatürde bildirilen sonuçlarla veya bu çalışmada elde edilen deneysel verilerle doğrulanmaktadır.

Daoui ve Zerizer [23], yapmış oldukları çalışmada malzemelerin titreşim alanındaki elastikiyet modülünün belirlenmesi için bir yöntem sunmaktadırlar. Bu yaklaşım, elastik kirişler teorisine dayanan doğal titreşimlerden kaynaklanan doğal frekans spektrumunun araştırılmasına ve yorumlanmasına dayanmaktadır. Testler, bazı doğal frekansları gözlemek için yeterince uzun olan doğal kompozit kirişlerin boyuna titreşimlerinin klasik testlerinden oluşmaktadır. Bu tanımlama yöntemi teorik ve deneysel değerler arasında, özellikle rezonans frekansları için modal parametrenin değerlendirilmesi ve kullanılan malzemelerin esneklik modülünün tanımlanması arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermişlerdir.

Sharma ve arkadaşları [24], sundukları çalışmada serbest-serbest sınır şartlarında sürekli bir çubuğun, Euler-Bernoulli kiriş teorisi yardımıyla çubuğun doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemişlerdir. ANSYS yazılımı kullanılarak çubuğun sonlu elemanlar metoduyla simülasyonu yapılmıştır. Ayrıca çubuğun deneysel modal analiz metoduyla doğal frekanslarını da laboratuvar ortamında tespit etmişlerdir. Daha sonra sonuçları karşılaştırmışlar ve teori ile deneysel çalışmanın büyük bir oranda uyum sağladığı görülmüştür.

Li ve çalışma arkadaşları [25], aksenal yüklü ince duvarlı ve açık kesitli Timoshenko kirişlerinin doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemeye yönelik dinamik bir transfer matrisi yöntemi sunmuşlardır. Bu çalışmada aksenal kuvvetin, çarpılma

rijitliğinin, kesme deformasyonunun ve eylemsizlik momentinin doğal frekanslar ve mod şekilleri üzerindeki etkilerini göstermek için iki örnek incelenmiştir.

Berçin ve Tanaka [26], monosimetrik kirişlerin birleştirilmiş eğilme ve burulma titreşimleri ile alakalı bir çalışma sunmuşlardır. Çarpılma rijitliğinin, kesme deformasyonunun ve eylemsizlik momentinin formülasyonlardaki etkileri dikkate alınmıştır. Çarpılma rijitliğinin etkilerini içeren ve içermeyen açık kesitli üç farklı konsol kiriş için sayısal sonuçlar verilmiştir.

Klausbruckner ve Pryputniewicz [27], farklı kesit alanı ve uzunluğa sahip C kirişlerin analitik, sonlu elemanlar ve deneysel analizlerini yaparak doğal frekansları ve mod biçimlerini incelemiştir. C kirişlerin analizlerinde kullanılan sınır şartları serbest – serbest ve ankastre – serbesttir. Sonlu elemanlar analizi sonuçları ile deneysel modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Dennis ve Jones [28], yaptıkları çalışmada konik C kirişlerin eğilme ve burulma titreşimlerini teorik ve deneysel modal analiz metoduyla belirlemiştir. Andrade kiriş denklemleri için Galerkin yaklaşımı kullanılarak ince cidarlı konik ve kademeli C kirişlerin birleşik eğilme ve burulma titreşimlerini modellemişler ve sonuçları karşılaştırmışlardır.

Yaman [29], açık kesitli kirişlerin zorlanmış titreşim analizi ile alakalı analitik bir yöntem sunmaktadır. Çalışma aynı zamanda çarpılma etkilerini de ele almaktadır.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Sabit Kesit Alanına Sahip İnce Cidarlı Çubuğun Sonlu Elemanları

Genel kabul görmüş bir denklem seti, verilen bir problemi matematiksel işlemler ve fonksiyonlar açısından çözerse, o denklemin kapalı formulu bir çözüm olduğu söylenir. Sabit açık kesitli, ince cidarlı çubukların küçük genlikli titreşimleri için bazı kapalı form çözümleri [30] tarafından yayınlanmıştır. Sabit açık kesitli ince cidarlı çubuklar için en düşük doğal eğilme ve burulma frekanslarını belirlemek için faydalı açık formüller başka yayınlarda da bulunabilmektedir [31]. Bu formüller, en yaygın sınır şartlarına sahip birkaç kirişle sınırlıdır. Sabit kesitli ince cidarlı elemanlardan oluşan ızgaraların titreşim analizi için ilgi çekici bir yöntem de 1969 yılında Cheng tarafından sunulmuştur [32]. Gupta yaptığı çalışmalarda, konik ve katı kirişlerin, eksenel ve burulma modlarını içermeyen enine titreşimler için belirgin rijitlik ve sürekli kütle matrislerini türetmiştir [33,34]. Burulma modları da Cywinski [35] ve Cywinski ile Kollbrunner [36] tarafından açık ve değişken kesitli ince cidarlı çubuklar için incelenmiştir [21].

Temel genelleştirilmiş koordinatlar [30] kullanılırsa kütle matrisi en basit şekle sahip olacaktır. Bu tür koordinatların kullanıldığı varsayıldığında, bazı nicelikler kesme merkezine, diğerleri ise ağırlık merkezine yönlendirilir. Bu, araştırmacıların çoğu tarafından yaygın olarak kullanılan yaklaşımdır, ancak pratikte, basit kesit alanları sınırlandırılmaktadır. Burada temel genelleştirilmiş koordinatlar nispeten basit bir şekilde oluşturulabilir. Bu tür basit kesit alanları, diğer kesit alanlarının analizinde kullanılabilir olmasına rağmen, C kanallar ve I çubukları içermektedir. Ana koordinatlar seçildiğinde, Vlasov'un dördüncü dereceden eşzamanlı, adi diferansiyel denklemleri setini [30, 35, 37] ayrıştırır. Boyuna yer değiştirmeler, iki enine eğilme durumunu ve burulmayı tanımlayan dört bağımsız denklemle ifade edilir:

$$EA\zeta^H = 0, \quad EI_y \xi^{IV} = q_x, \quad EI_x \eta^{IV} = q_y, \quad EI_\omega \theta^{IV} - GI_d \theta^H = m. \quad (3.1)$$

Sonlu elemanlar metodu kullanıldığında benzer bir sadeleştirme elde edilir. Her bir durumda, ince cidarlı sabit kesitli çubuklara uygulanan herhangi bir koordinat sistemi için, rijitlik ve kütle matrisleri Tablo 3.1.'de verilen 14. düzendedir, ancak ana koordinatlar seçildiğinde rijitlik ve kütle matrislerinin oldukça az bir kısmı sıfır olur.

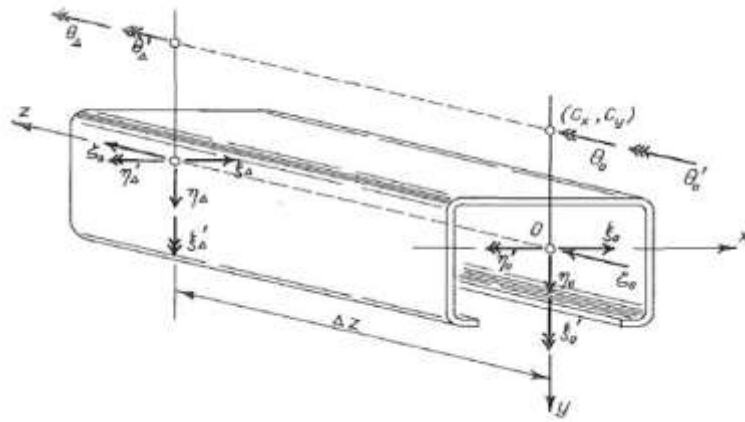
İnce cidarlı bir çubuk sonlu elemanı, Şekil 3.1.'de bir ana koordinat sisteminde gösterilmektedir. Bu elemanın yer değiştirmesinin durumu, iki düğümün her birinde yedi olan on dört düğüm yer değiştirmesi ile temsil edilir:

$$\delta^e = \left[\delta^e(z=0), \delta^e(z=\Delta z) \right]^T, \quad (3.2)$$

$$\delta^e(z=0) = (\eta_0, \eta'_0, \xi_0, \xi'_0, \zeta_0, \theta_0, \theta'_0)^T, \quad (3.3)$$

$$\delta^e(z=\Delta z) = (\eta_\Delta, \eta'_\Delta, \xi_\Delta, \xi'_\Delta, \zeta_\Delta, \theta_\Delta, \theta'_\Delta)^T. \quad (3.4)$$

Burada, 0 ve Δz alt indisleri, elemanın yakın ve uzak uçlarına atıfta bulunduğu ve T üst indisinin de vektörün transpozunu temsil ettiği anlamına gelir. Rijitlik ve sabit kütle matrislerini belirlemek için dört bağımsız yer değiştirme şöyle kabul edilir:



Şekil 3.1. Açık, sabit kesitli ince cidarlı çubuğun sonlu elemanı [21].

$$\eta = \alpha_1 + \alpha_2 z + \alpha_3 z^2 + \alpha_4 z^3, \quad (3.5a)$$

$$\xi = \alpha_5 + \alpha_6 z + \alpha_7 z^2 + \alpha_8 z^3, \quad (3.5b)$$

$$\zeta = \alpha_9 + \alpha_{10} z, \quad (3.5c)$$

$$\theta = \alpha_{11} + \alpha_{12} z + \alpha_{13} z^2 + \alpha_{14} z^3. \quad (3.5d)$$

Bu polinomlar sonlu elemanlar yönteminin yakınsamasını sağlar; bunlar sonlu elemanlar çözümlerinde iyi bilinmelidir [21].

3.1.1. Rijitlik ve kütle matrisleri

Daha önce ince cidarlı bir açık ve sabit enine kesitli çubuk için bir rijitlik matrisi elde edildi. Bu da Tablo 3.1.'de gösterildi. Orijinal matrisler, düğüm yer değiştirmelerinin yerleştirildiği sırayı yansıtacak şekilde yeniden düzenlendi (Şekil 3.1. ve Denklem (3.2) - (3.4)).

Bir elemanın orta yüzeyinde yer alan herhangi bir noktanın yer değiştirmesi, bir yer değiştirme vektörü \mathbf{u} ile ifade edilir [30, 37]:

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi - (y - C_y)\theta \\ \eta + (x - C_x)\theta \\ \zeta - x\xi' - y\eta' + \omega\theta \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

ξ, η, ζ ve θ yer değiştirme fonksiyonları, denklem (3.5)'den elde edilen polinomlar ile yer değiştirebilir:

$$\mathbf{u} = \phi C^{-1} \delta^e. \quad (3.7)$$

Tablo 3.1. Rijitlik ve kütle matrisleri [21]

İndeks		Matrisler	
Satır, i (1)	Sütun, j (2)	Rijitlik K (i, j) ^a (3)	Kütle M (i, j) (4)
1	1	$12EI_x/L^3$	$13AL/35+1,2I_x/L$
1	2	$6EI_x/L^2$	$11AL^2/210+0,1I_x$
1	8	$-12EI_x/L^3$	$9AL/70-1,2I_x/L$
1	9	$6EI_x/L^2$	$-13AL^2/420+0,1I_x$
2	2	$4EI_x/L$	$AL^3/105+2I_xL/15$
2	8	$-6EI_x/L^2$	$13AL^2/420-0,1I_x$
2	9	$2EI_x/L$	$-AL^3/140-I_xL/30$
3	3	$12EI_y/L^3$	$13AL/35+1,2I_y/L$
3	4	$6EI_y/L^2$	$11AL^2/210+0,1I_y$
3	10	$-12EI_y/L^3$	$9AL/70-1,2I_y/L$
3	11	$6EI_y/L^2$	$-13AL^2/420+0,1I_y$
4	4	$4EI_y/L$	$AL^3/105+2I_yL/15$
4	10	$-6EI_y/L^2$	$13AL^2/420-0,1I_y$
4	11	$2EI_y/L$	$-AL^3/140-I_yL/30$
5	5	EA/L	$AL/3$
5	12	$-EA/L$	$AL/6$
6	6	$12EI_w/L^3+GI_d/L$	$13I_0L/35+1,2I_w/L+I_dL/3$
6	7	$6EI_w/L^2$	$11I_0L^2/210+0,1I_w$
6	13	$-12EI_w/L^3-GI_d/L$	$9I_0L/70-1,2I_w/L+I_dL/6$
6	14	$6EI_w/L^2$	$-13I_0L^2/420+0,1I_w$
7	7	$4EI_w/L$	$I_0L^3/105+2I_wL/15$
7	13	$-6EI_w/L^2$	$13I_0L^2/420-0,1I_w$
7	14	$2EI_w/L$	$-I_0L^3/140-I_wL/30$
8	8	$12EI_x/L^3$	$13AL/35+1,2I_x/L$
8	9	$-6EI_x/L^2$	$-11AL^2/210-0,1I_x$
9	9	$4EI_x/L$	$AL^3/105+2I_xL/15$
10	10	$12EI_y/L^3$	$13AL/35+1,2I_y/L$
10	11	$-6EI_y/L^2$	$-11AL^2/210-0,1I_y$
11	11	$4EI_y/L$	$AL^3/105+2I_yL/15$
12	12	EA/L	$AL/3$
13	13	$12EI_w/L^3+GI_d/L$	$13I_0L/35+1,2I_w/L+I_dL/3$
13	14	$-6EI_w/L^2$	$-11I_0L^2/210-0,1I_w$
14	14	$4EI_w/L$	$I_0L^3/105+2I_wL/15$

^a Ref. [38]; Ref. [39]

Not: Daha yukarıdaki üçgen rijitlik ve kütle matrislerinin sıfır olmayan elemanları. Kütle matrisinin tüm elemanları ρ yoğunluğu ile çarpılmak zorundadır.

Şimdi yer değiştirme alanı, düğüm yer değiştirmelerinin δ^e bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. ϕ ve sabit Δz terimlerini içeren elemanların Tablo 3.1.'de verilen 14. düzendeki C^{-1} kare matris, (3x14) boyutunda bir matrisdir. Bu matris 1, x, y, w ve z ortogonal koordinatlarını içerir (Ref. [30]'a göre). ϕ ve C^{-1} matrislerinin bir çarpımı şekil fonksiyonu olarak bilinmektedir. Her iki matrisin elemanları Wekezer'in yaptığı çalışmadan [37] türetildi ve gösterildi [21].

3.2. Timoshenko Kiriş Teorisi

Timoshenko teorisi, şu varsayımlara dayanmaktadır: ince cidar, kiriş boyunca aynıdır, kirişin kesiti simetriktir ve deforme olmaz. Dış yük, simetri düzlemine paralel hareket eden enine yüklerden ve momentlerden oluşur. Yükler, birleşik hareket sırasında yönlerini korurlar. Deformasyonlar, kesitin boyutlarına göre küçüktür. Kayma ve çarpılmadan dolayı kayma gerilmeleri ihmal edilebilir, böylece kayma merkezinin konumu geometrik bir özellik olarak kabul edilebilir. C kiriş, kayma merkezinin etrafında hareket eder, ancak eylemsizlik momenti ihmal edilir. Ayrıca malzemenin homojen ve izotropik olduğu ve Hooke kanununa uyduğu varsayılmaktadır [27].

Şekil 3.3.'te gösterilen düz bir C kirişin birleşik eğilme ve burulma titreşimleri için hareketin diferansiyel denklemleri yazılabilir:

$$EI_x \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} + m \frac{\partial^2 (v + e\theta)}{\partial t^2} = 0, \quad (3.8)$$

$$EI_w \frac{\partial^4 \theta}{\partial z^4} - GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + m \frac{\partial^2 [(e^2 + r^2)\theta + ev]}{\partial t^2} = 0. \quad (3.9)$$

(3.8) ve (3.9) nolu denklemlerdeki notasyonlar şu şekildedir: m , kirişin birim uzunluk başına düşen ağırlığını ve r , kesitin ağırlık merkezi etrafındaki jirasyon yarıçapını, EI_x , Oyz düzlemindeki eğilme rijitliğini, EI_w , çarpılma ile ilgili burulma direncini, GJ , Saint-Venant burulma direncini ifade eder. t zamanı gösterir, z kirişin elastik eksenini boyunca olan mesafeyi gösterir, v , kayma merkezinin y eksenini yönünde ki zamana bağlı eğilme yer değiştirmesidir, θ , açısız yer değiştirmedir, $C-C'$ kesit bölümünün, $S-S'$ kesme merkezine göre konumunu göstermektedir ($C-C'$, $S-S'$ üstünde olduğunda pozitif).

Bu araştırmada ele alınan sınır koşulları aşağıdaki gibidir:

(a) serbest – serbest,

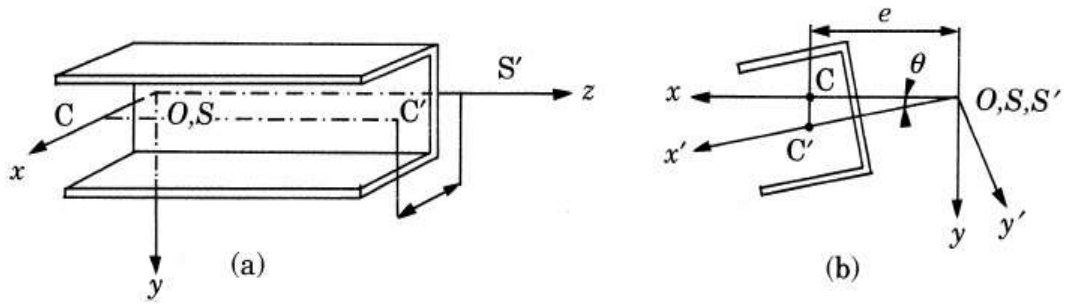
$$\partial^2 v / \partial z^2 = 0 = \partial^3 v / \partial z^3, \quad \partial^2 \theta / \partial z^2 = 0 = -EI_w \partial^3 \theta / \partial z^3 + GJ \partial \theta / \partial z, \quad (3.10)$$

ve (b) ankastre – serbest

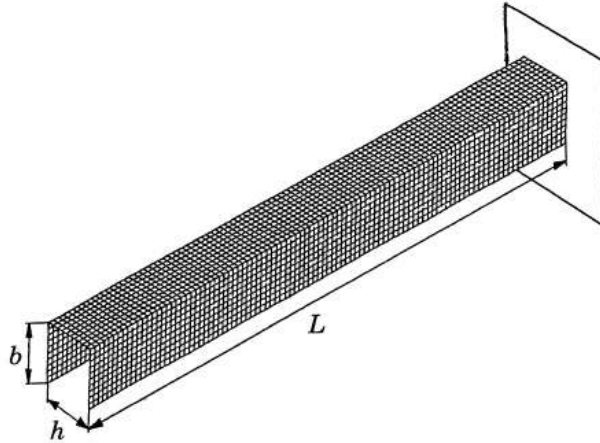
$$v = 0 = \partial v / \partial z, \quad \theta = 0 = \partial \theta / \partial z. \quad (3.11)$$

Varsayılan hareket harmoniktir, şöyle ki:

$$v = \hat{v} \sin \omega t, \quad \theta = \hat{\theta} \sin \omega t. \quad (3.12)$$



Şekil 3.2. Konsol C-kiriş geometrisi (a) kullanılan koordinat sistemi (b) dönme hareketinin tanımı [27].



Şekil 3.3. C-Kirişler için b, h ve L sırasıyla flanş genişliğini, kiriş gövde yüksekliğini ve kiriş uzunluğu belirtir [27].

İnceltme işareti ($\hat{\quad}$) genliği belirtir ve ω , frekanstır. Denklem (3.8) ve (3.9), denklem (3.10) ve (3.11)'de verilen sınır koşullarına bağlı olarak boyutsuzlaştırılmıştır. Hareketin eğilme denklemleri metrik birimdedir:

$$(D^4 - \lambda_B) \hat{v} - \lambda_b e \hat{\theta} = 0, \quad (\lambda_w D^4 - D^2 - \alpha \lambda_T) \hat{\theta} - (e / r^2) \lambda_T \hat{v} = 0. \quad (3.13)$$

Burada,

$$\lambda_B = \omega^2 mL^4/EI_x, \lambda_w = EI_w/GJL^2, \lambda_T = \omega^2 mL^2 r^2/GJ,$$

$$\alpha = 1 + e^2/r^2, \quad D = L(d/dz) \quad (3.14)$$

açılımları kullanılmıştır.

3.3. Fiber ile Güçlendirilmiş Tabakalı Kompozit Malzemenin Elastisite Modülü

Mikromekanik analizler ya elastisite teorisi ya da malzeme mekaniği üzerine kuruludur. Malzeme mekaniği yaklaşımında basitleştirici varsayımlar, mikromekanik seviyedeki gerilme ve zorlanma dağılımlarının detaylarının belirtilmesini gereksiz kılar ve fiber paket geometrisi genellikle isteğe bağlıdır. Mikromekanik seviyelerde gerçek gerilme ile zorlanmalar ve fiber paket geometrisi için çözüm içeren elastisite model teorisi dikkate alınmaktadır. Kompleks geometriler ve sınır şartlarından dolayı temel denklemlerin sayısal çözümleri elastisite yaklaşımını içerir. Elastisite teorisinin bazı kanunlarının ihmal edilmesi malzeme mekaniğinde basitleştirici varsayımlar kullanılmasına rağmen tasarımda sıklıkla kullanılan sonuçların bazıları yeterince doğrudur. Tasarım uygulamalarının haricinde mikromekanik analizler ve deneysel incelemeler kompozitlerin nasıl daha iyi çalıştığını anlamak için gereklidir [40].

Mikromekanik analizlerdeki anahtar unsurlardan biri de bağıl hacimin incelenmesi ya da çeşitli bileşen malzemelerin ağırlık içeriğidir. Bileşen hacim kesirlerini içeren mikromekanik denklemleri bulacağız, fakat asıl ölçümler ağırlık kesirlerine dayandırılmaktadır. Herhangi bir sayıda bileşenli malzemeler için, bileşenli hacim kesirlerinin toplamı olan n ; bire eşit olmalıdır:

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (3.15)$$

Burada, $v_i = V_i / V_c = i$. bileşenin hacim kesiri

$V_i = i$. bileşenin hacmi

$V_c =$ kompozitlerin toplam hacmi

olarak tanımlanır. Birçok durumda bu denklem

$$v_f + v_m + v_v = 1 \quad (3.16)$$

şekline indirgenir. Burada v_f , v_m ve v_v sırasıyla fiber, matris ve boşlukların hacim kesirleridir. Ağırlık kesirleri için ilgili denklemler

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3.17)$$

ve

$$w_f + w_m = 1 \quad (3.18)$$

olarak verilir. Burada $w_i = W_i / W_c$, $w_f = W_f / W_c$, $w_m = W_m / W_c$ ' dir. W_i, W_f, W_m ve W_c sırasıyla i . bileşenin, fiber, matris ve kompozitlerin ağırlığıdır. Burada boşluğun ağırlığının ihmal edildiğine dikkat edilmelidir. Yukarıda yazılan (3.17) ve (3.18) denklemlerinde ağırlık ifadesi yoğunluk ve hacim cinsinden yazılırsa

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i, \quad (3.19)$$

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (3.20)$$

elde edilir. Burada ρ_i, ρ_f, ρ_m ve ρ_c sırasıyla i . bileşen, fiber, matris ve kompozitin yoğunluğudur. Benzer şekilde (3.15) ve (3.16) denklemleri yeniden düzenlenirse

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (w_i / \rho_i)}, \quad (3.21)$$

$$\rho_c = \frac{1}{(w_f / \rho_f) + (w_m / \rho_m)} \quad (3.22)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu denklemlerin yeniden düzenlenmesiyle boşluk kesirleri, ölçülen ağırlık ve yoğunluk cinsinden ifade edilebilmektedir:

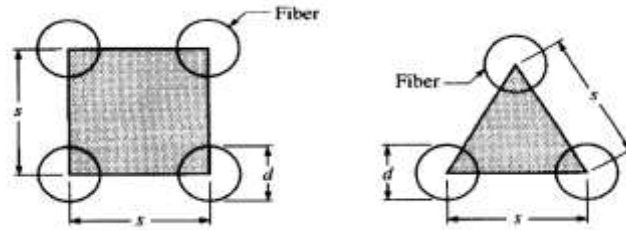
$$v_v = 1 - \frac{(W_f / \rho_f) + (W_c - W_f) \rho_m}{W_c / \rho_c}. \quad (3.23)$$

Kompozitlerin boşluk kesirleri yüzde 0,1-1 aralığında değişebilmektedir.

Beklenen fiber kompozitlerin bileşen hacim kesirlerinin aralığı hakkında bilgi sahibi olmak için, Şekil-3.4.'de gösterildiği gibi kare ve üçgen fiber paket geometrisine sahip temsilci alan elemanlarını düşünmek faydalı olacaktır. Fiber aralığının s , fiber çapının d olduğunu varsayarsak (fiber uzunluğu değişmeyecek şekilde) alan kesirleri hacim kesirlerine eşit olmalıdır:

$$v_f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{s} \right)^2. \quad (3.24)$$

Buradan açıkça görülmektedir ki teoriksel maksimum fiber hacim kesiri $s = d$ durumunda mümkündür.



Şekil 3.4. İdealize edilmiş kare ve üçgen fiber-paket geometrilerine sahip temsilci hacim elemanları [40].

Bu durumda

$$v_{f \max} = \frac{\pi}{4} = 0,785 \quad (3.25)$$

olur. Aynı hesaplama üçgen için düşünülüğünde

$$v_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{d}{s} \right)^2 \quad (3.26)$$

ve $s = d$ durumunda maksimum fiber hacim kesiri

$$v_{f \max} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,907 \quad (3.27)$$

değerine sahip olur.

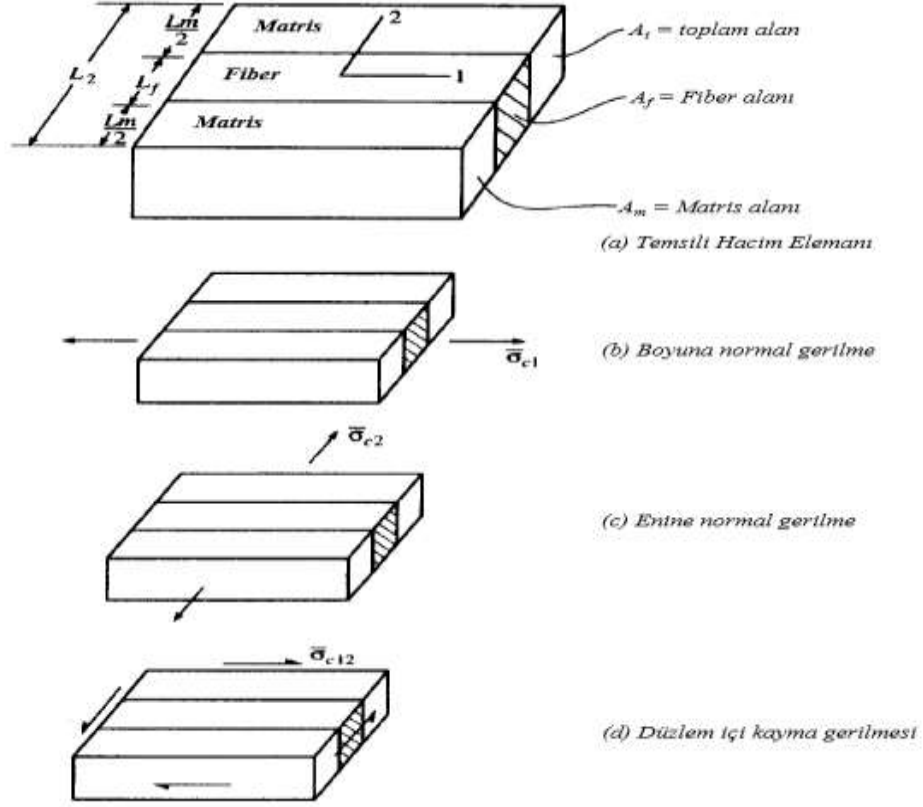
Genel olarak pratikte, bu teoriksel sınırların oluşması için gerekli olan fiberlerin sık düzeni elde edilemez. En sürekli fiber kompozitlerinde fiber hacim kesirleri 0,5-0,8 aralığındadır.

3.3.1. Malzeme modellerinin temel mekanikleri

Bu bölümün amacı, bir güçlendirilmiş tabakalı ortotropik sürekli fiberin dört bağımsız etkili modülünü tahmin etmek için malzeme modellerinin temel mekaniğini sunmaktır.

Mikromekanik modelleme için malzeme yaklaşımının temel mekaniğinde fiber –paket geometrisi belirtilmediyse bu durumda Şekil-3.5.'te gösterildiği gibi RVE, matriks malzemeye bağlı fiber malzemedan oluşan genel kompozit blok olabilir. RVE'de meydana gelen hacim kesirlerinin gerçek kompozit ile aynı olduğu varsayılmaktadır. Bundan dolayı, fiberlerin paralel kaldığı ve boyutların parçaların uzunluğu boyunca değişmediği varsayılır. Alan kesirleri, hacim kesirlerine eşit olmalıdır.

Mikromekanik denklemler, denge veya uyumluluk ilişkilerinden ve gerilim ya da RVE'deki basit bir gerilime duruma maruz kalmış olan gerinimler hakkındaki varsayımlardan türetilmektedir. Sonuç olarak, bu sebeplerden dolayı gerilim, gerinim, yer değiştirme ve RVE boyutları uzunluk boyunca değişmemektedir [40].



Şekil 3.5. Malzeme modelinin temel mekaniğinde kullanılan temsili hacim elemanı ve basit gerilme durumları [40].

Bu durumda sadece alan ortalamalarını kullanabiliriz:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int \sigma dV = \frac{1}{A} \int \sigma dA \quad (3.28)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{V} \int \epsilon dV = \frac{1}{A} \int \epsilon dA \quad (3.29)$$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{V} \int \delta dV = \frac{1}{A} \int \delta dA \quad (3.30)$$

Burada üst çizgi, ortalama bir niceliği göstermektedir ve σ = gerilim, ϵ = gerinim, δ = yer değiştirme, V = hacim ve A = yükleme uygulanan yüz ile ilgili alan ifadelerini temsil etmektedir [40].

3.3.2. Boyuna elastisite modülü

Şekil 3.5.(a)'da gösterilen RVE, Şekil 3.5.(b)'de gösterilen boyuna normal gerinime ($\bar{\sigma}_{c1}$) maruz kalıyorsa bu durumda tepkisi, etkili boyuna modüller (E_l) tarafından yönetilir. Statik dengeye göre malzeme üzerine etki eden toplam kuvvetler, fiber ve matrislerin üzerine etki eden kuvvetlerin toplamına eşit olmalıdır. Statik denge şartı denklem (3.28)'le birleştirildiğinde şu ifade elde edilmektedir.

$$\bar{\sigma}_{c1} A_1 = \bar{\sigma}_{f1} A_f + \bar{\sigma}_{m1} A_m. \quad (3.31)$$

Burada c, f ve m alt indisleri sırasıyla kompozit, fiber ve matrisleri ve ikinci alt indisler de doğrultuyu temsil etmektedir. Alan kesirleri, ilgili hacim kesirlerine eşit olduğundan denklem (3.31), boyuna gerinim için bir 'karışım kuralı' elde etmek amacıyla yeniden düzenlenebilir:

$$\bar{\sigma}_{c1} = \bar{\sigma}_{f1} v_f + \bar{\sigma}_{m1} v_m. \quad (3.32)$$

Matrisin izotropik, fiberin ortotropik ve tüm malzemelerin bir boyutlu Hook kanununa uyduğu varsayımı altında (Poisson gerinimi ihmal edildiğinde)

$$\bar{\sigma}_{c1} = E_1 \bar{\epsilon}_{c1}; \quad \bar{\sigma}_{f1} = E_{f1} \bar{\epsilon}_{f1}; \quad \bar{\sigma}_{m1} = E_m \bar{\epsilon}_{m1} \quad (3.33)$$

olur ve denklem (18) şu şekilde elde edilir:

$$E_1 \bar{\epsilon}_{c1} = E_{f1} \bar{\epsilon}_{f1} v_f + E_m \bar{\epsilon}_{m1} v_m. \quad (3.34)$$

Çift alt indisler fiberin ortotropik olmasından dolayı fiber modülleri için kullanılmaktadır. Yani boyuna fiber modüllerinin (E_{f1}), enine fiber modüllerine (E_{f2}) eşit olması gerekli değildir. İzotropik durumlarda ise $E_{f1} = E_{f2}$ eşitliği söz konusudur. Sonuç olarak, kompozit, fiber ve matrislerdeki ortalama gerininin 1 doğrultusu boyunca olduğu varsayımı altında

$$\bar{\epsilon}_{c1} = \bar{\epsilon}_{f1} = \bar{\epsilon}_{m1} \quad (3.35)$$

olur. Denklem (3.35)'i, denklem (3.34)'de yerine yazarsak, boyuna modüller için karışım kuralları elde edilir:

$$E_1 = E_{f1} v_f + E_m v_m \quad (3.36)$$

U_c , kompozitte depolanan toplam gerinim enerjisi; U_f , fiberlerdeki gerinim enerjisinin toplamı ve U_m , matrisdeki gerinim enerjisi olmak üzere

$$U_c = U_f + U_m \quad (3.37)$$

şeklindedir. Bu denklemlerin açılımı, denklem (3.33)'den elde edilmektedir:

$$U_c = \frac{1}{2} \int_{V_c} \sigma_{c1} \epsilon_{c1} dV = \frac{1}{2} E_1 \bar{\epsilon}_1^2 V_c, \quad (3.38a)$$

$$U_f = \frac{1}{2} \int_{V_f} \sigma_{f1} \epsilon_{f1} dV = \frac{1}{2} E_{f1} \bar{\epsilon}_{f1}^2 V_f, \quad (3.38b)$$

$$U_m = \frac{1}{2} \int_{V_m} \sigma_{m1} \epsilon_{m1} dV = \frac{1}{2} E_{m1} \bar{\epsilon}_{m1}^2 V_m. \quad (3.38c)$$

Bir adım daha ilerlemek için, fiberler ve matrislerdeki gerinimleri kompozit gerinimlerine bağlı olarak elde edelim. Bu durumda

$$\bar{\sigma}_{f1} = a_1 \bar{\sigma}_{c1}; \quad \bar{\sigma}_{m1} = b_1 \bar{\sigma}_{c1} \quad (3.39)$$

eşitliklerine ulaşılır. Burada a_1 ve b_1 katsayılarıdır. Gerinim için karışım kurallarında denklem (3.39) yerine yazıldığında denklem (3.32) şu hale gelir:

$$a_1 v_f + b_1 v_m = 1. \quad (3.40)$$

Denklem (3.39), (3.33) ve (3.38), denklem (3.37)'de yerine yazılırsa

$$\frac{1}{E_1} = a_1^2 \frac{v_f}{E_{f1}} + b_1^2 \frac{v_m}{E_m} \quad (3.41)$$

elde edilir [40].

3.3.3. Enine elastisite modülü

Şekil 3.5.(a)'da gösterilen RVE, Şekil 3.5.(c)'de gösterilen enine normal gerinime ($\bar{\sigma}_{c2}$) maruz kalıyorsa bu durumda tepkisi, etkili enine modüller (E_2) tarafından yönetilir. Geometrik uyumluluk, toplam enine kompozit yer değiştirmenin ($\bar{\delta}_{c2}$), matris ($\bar{\delta}_{m2}$) ve fiberdeki ($\bar{\delta}_{f2}$) karşılık gelen enine yer değiştirmenin toplamına eşit olmasını gerektirmektedir

$$\bar{\delta}_{c2} = \bar{\delta}_{f2} + \bar{\delta}_{m2}. \quad (3.42)$$

Normal gerininin tanımından sonra

$$\bar{\delta}_{c2} = \bar{\epsilon}_{c2} L_2, \quad \bar{\delta}_{f2} = \bar{\epsilon}_{f2} L_f, \quad \bar{\delta}_{m2} = \bar{\epsilon}_{m2} L_m \quad (3.43)$$

verilir ve denklem (3.42) şu hale gelir:

$$\bar{\epsilon}_{c2} L_2 = \bar{\epsilon}_{f2} L_f + \bar{\epsilon}_{m2} L_m. \quad (3.44)$$

RVE'nin boyutları 1 yönü boyunca değişmeyeceğinden, uzunluk kesirleri hacim kesirlerine eşit olmalıdır ve denklem (3.44), enine gerinim için karışım kurallarına göre düzenlenebilir:

$$\bar{\epsilon}_{c2} = \bar{\epsilon}_{f2} v_f + \bar{\epsilon}_{m2} v_m. \quad (3.45)$$

Bu durumda bir boyutlu Hooke kanunları

$$\bar{\sigma}_{c2} = E_2 \bar{\epsilon}_{c2}, \quad \bar{\sigma}_{f2} = E_{f2} \bar{\epsilon}_{f2}, \quad \bar{\sigma}_{m2} = E_m \bar{\epsilon}_{m2} \quad (3.46)$$

şeklinde düzenlenir. Burada Poisson gerinimleri ihmal edilmiştir. Denklem (3.46) ve denklem (3.45) birleştirildiğinde

$$\frac{\bar{\sigma}_{c2}}{E_2} = \frac{\bar{\sigma}_{f2}}{E_{f2}} v_f + \frac{\bar{\sigma}_{m2}}{E_m} v_m \quad (3.47)$$

elde edilir. Kompozit, fiber ve matrislerdeki gerinmelerin hepsinin birbirine eşit olduğunu kabul edersek denklem (3.47), enine modüller için ters karışım kurallarına indirgenir:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{v_f}{E_{f2}} + \frac{v_m}{E_m}. \quad (3.48)$$

Boyuna durumlarda, gerinim enerji yaklaşımı, enine yükleme durumlarının mikromekaniğine ek bilgiler sağlar. Kompozit gerinim terimlerinde, fiber ve matris gerinimleri tanımlayalım

$$\bar{\epsilon}_{f2} = a_2 \bar{\epsilon}_{c2}, \quad \bar{\epsilon}_{m2} = b_2 \bar{\epsilon}_{c2} \quad (3.49)$$

burada a ve b katsayılarıdır. Denklem (3.49), denklem (3.44)'de yerine yazılırsa şu ifade elde edilir:

$$a_2 v_f + b_2 v_m = 1. \quad (3.50)$$

Enine yükleme durumu ve gerinme enerjisi için, denklem (3.49) ve (3.46) denklem (3.38)'e benzetilerek şu ifade elde edilir [40]:

$$E_2 = a_2^2 E_{f2} v_f + b_2^2 E_m v_m. \quad (3.51)$$



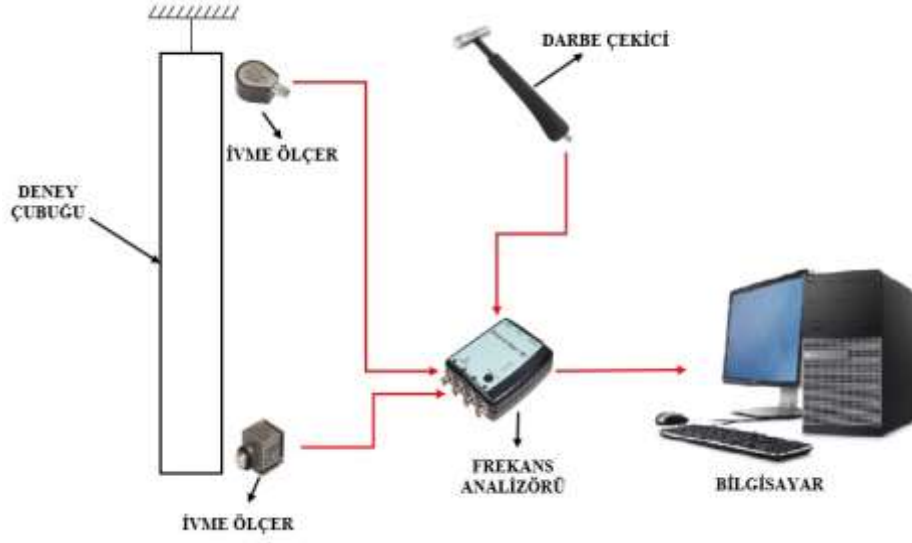
BÖLÜM 4. KOMPOZİT C KİRİŞLERİN DENEYSEL MODAL ANALİZİ

4.1. Deneysel Modal Analiz (DMA)

Çoğu yapıda birtakım nedenlerden dolayı titreşim meydana gelmektedir. Faal durumda iken tüm makinalar, araçlar ve binalar titreşime neden olan dinamik kuvvetlere maruz kalmaktadır. Çok sık meydana gelen titreşimler, ani problemlere neden oldukları için, bir standarda göre ya da bir test talimatına göre araştırılmalıdırlar. Yapının titreşime verdiği cevap incelenerek, yapının performans ve yorulma gibi faktörlerine olan etkisi değerlendirilmelidir. Sinyal analiz teknikleri kullanılarak yapıdaki titreşimler ölçülebilir ve frekans analizleri yapılabilir.

Modal analiz, bir yapının doğal dinamik özelliklerini; doğal frekanslar, sönüm oranları, mod şekilleri şeklinde belirleyerek yapının dinamik davranışı için matematiksel bir model oluşturup, kullanma sürecidir. Modal analiz hem teorik hem deneysel teknikler içermektedir. Bu süreç; yapı üzerinden modal verinin ölçülmesi, ölçülen modal verinin analiz edilmesi ve mod biçimlerinin tahmini ve elde edilen mod biçimleri kullanılarak dinamik davranışın belirlenmesi şeklinde 3 aşamada gerçekleştirilebilir [41].

Deneysel modal analiz yönteminde sistem doğal olarak deprem, rüzgâr, motor vb. gibi etkenler nedeniyle titreşmektedir ya da titreştirici ve darbe çekici gibi yapay yöntemler kullanılarak titreştirilmektedir. Yapay titreştiriciler ise ölçülebilen etkilere karşı sistemin davranışının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bunlar kullanılacakları yapının hacimsel büyüklüğüne ve rijitliğine bağlı olarak seçilmektedirler. Yapay titreştiriciler yapıya verilen etkinin ölçülmesine de imkân sağlamaktadır. Şekil 4.1.'de deneysel modal analiz sistemine ait bir şematik gösterim yer almaktadır.



Şekil 4.1. Deneysel modal analiz şematik gösterimi.


4.2. Deneysel Modal Analizde Kullanılan Ölçüm Araçları

Bu kısımda tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde kullanılan ölçüm araçlarına değinilecektir.

4.2.1. Darbe çekici

Günümüzde en çok uygulama alanı olan darbe çekici testi, giriş ve çıkış noktalarındaki FRF hesaplanması yöntemiyle uygulanır. Giriş, çekicinin uyguladığı kuvvet, çıkış ise algılayıcının kaydettiği titreşim (ivme)'dir. Kuvvet sensörü, genliğin ve test ögesine verilen uyarı enerjisinin frekans içeriğinin ölçülebilmesini sağlar. İvmeölçerler ise çekicinin vuruşuna bağlı olarak yapının cevabını ölçmek üzere çekiçle birlikte kullanılırlar [42]. Tablo 4.1.'de tez kapsamında deneysel modal analiz çalışması için kullandığımız Brüel & Kjør Type 8602-002 model darbe çekicinin teknik özellikleri gösterilmiştir.



Tablo 4.1. B&K 8206-002 darbe çekici için kalibrasyon değer tablosu

Model	B&K 8206-002
Hassasiyet	2,27 mV/N
Maksimum Kuvvet	2200 N
Çalışma Sıcaklığı	-73 ile +60 °C arasında
Toplam Uzunluk	221,5 mm
Toplam Kütle	100 gram
Çekiç görseli	

4.2.2. İvme ölçerler

Bir malzemenin ya da fiziksel sistemin rezonans frekanslarını (titreşimlerini) doğru bir şekilde ölçebilmek için doğru bir ivmeölçer seçmek gerekmektedir. Aksi takdirde, ölçümlerden kaliteli sinyaller alınamaz. İvmeölçerleri seçerken, ölçebileceği frekans aralığı, hassasiyeti, ölçebileceği maksimum ivme değeri, çalışma sıcaklığı, ağırlığı gibi özellikleri dikkate alınmalıdır. Mesela düşük frekanslara sahip fiziksel sistemlerin ölçümlerinde yüksek hassasiyetli ivmeölçerleri kullanılmalı, yüksek frekanslara sahip fiziksel sistemlerin ölçümlerinde ise düşük hassasiyetli ivmeölçerler kullanılmalıdır. Ayrıca ivmeölçerlerin boyutları ve ağırlıkları ölçülecek yapıdan ağır ve büyük olmamalıdır. Tez kapsamında, laboratuvar ölçümlerini gerçekleştirmek için B&K 4507 tipi tek eksenli ivmeölçer ve B&K 4517-002 tipi tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Bu ivmeölçerlere ait kalibrasyon değerlerini ve genel özelliklerini belirten değerler Tablo 4.2.'de verilmektedir.

Tablo 4.2. B&K 4507 ve B&K 4517 ivmeölçerler için kalibrasyon değer tablosu

Model	B&K 4507	B&K 4517-002
Hassasiyet	98,41 mV/g	10,25 mV/g
Frekans Aralığı	0,3 Hz – 6 kHz	1 Hz – 20 kHz
Maksimum İvme	±71 g	±500 g
Çalışma Sıcaklığı	-54 ile +121 °C arası	-51 ile +121 °C arası
Boyutlar	10x10x10 mm	Ø7,85x12,2x4,6 mm
Toplam Kütle	4,8 gram	0,7 gram
İvmeölçer görselleri		

4.2.3. Dinamik sinyal analizörü ve yazılımları

Bir veri toplama ünitesi, dinamik sinyal analizöründen ve bilgisayar yazılımından oluşmaktadır. Veri toplama ünitesi ses ve titreşim ölçümlerinde, titreştiricilerden ve ivmeölçerlerden gelen sinyalleri kaydetmek ve ilgili bilgisayar yazılımına göndermek için kullanılmaktadır. PHOTON+ yazılımı ise, sinyallerin toplanmasında ve işlenmesinde gerekli ara yüzü sağlamaktadır. Veri toplama ünitesinin sinyal toplama ve işleme süreci şöyledir: Fiziksel sistemden ivmeölçerlere gelen elektrik sinyalleri doğrudan ya da çeşitli sinyal koşullanma ünitelerinden geçirildikten sonra veri toplama sistemine aktarılmaktadır [43]. Toplanan sinyaller dinamik karakteristiklerine uygun bir hızda ve çözünürlükte örneklendikten (sayısal forma dönüştürüldükten) sonra bilgisayar programında işlenmekte ya da saklanmaktadır. Deneyde kullanılan dinamik sinyal analizörü Şekil 4.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Brüel & Kjær PHOTON+ Dinamik Sinyal Analizörü.

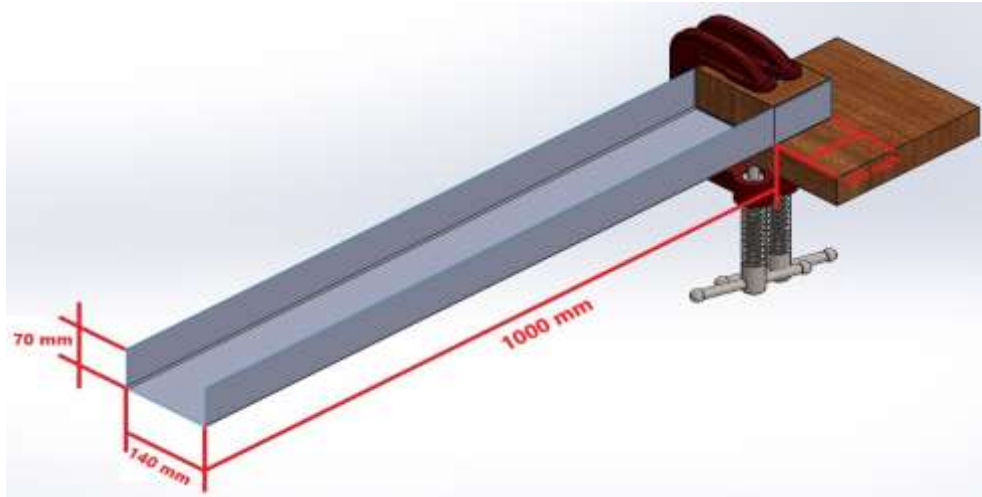
4.3. Kompozit C Kirişlerin Doğal Frekanslarının Sonlu Elemanlar Metoduyla Belirlenmesi

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında dinamik karakteristiği araştırılan kompozit C kirişlerin, sonlu elemanlar programı yardımıyla, ankastre-serbest sınır şartlarında doğal frekanslarının ve mod biçimlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kompozit C kirişin üç boyutlu modeli SolidWORKS 2019 programında sonlu elemanlar modeli ise ANSYS Workbench 2019 R1 programında yapılmıştır. Şekil 4.3.'te ankastre-serbest sınır şartlarında modellenmiş bir C kirişin üç boyutlu modeli yer almaktadır. Deneysel analiz çalışmalarında ise C kiriş yaklaşık 100x136 mm ölçülerinde bir ahşap malzeme

ve marangoz mengenesi kullanılarak masaya ankastre olarak bağlanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde ve deneysel çalışmalarda kullanılan kompozit C kirişlere ait fiziksel ölçüler ve mekanik özellikler, C kirişlere ait x, y eksenlerine göre hesaplanan kesit atalet momentleri, ağırlık merkezi ile kayma eksenine arasındaki mesafe ve boyutsuz frekans parametreleri Tablo 4.3.'te verilmiştir.

Tablo. 4.3. Deneysel modal analiz ve sonlu elemanlar analizi çalışmalarında kullanılan C kirişlere ait ölçüler, fiber dizilim açıları

Parametreler	Kompozit C Kiriş
Uzunluk, L	1100 mm
Flanş ölçüsü, b	70 mm
Kiriş gövde ölçüsü, h	140 mm
Kalınlık	3 mm
h/b oranı	2
Yoğunluk, ρ	1850 kg/m ³
Kiriş kütlesi, m_L	1,65 kg
Deneysel ve Sonlu Elemanlar modal analiz sınır şartları	Ankastre - Serbest ve Serbest - Serbest
Sırasıyla 9 adet 4 katmanlı C kirişler için fiber dizilim açıları	[0°] ₄
C1-Kirişi	[90°] ₄
C2-Kirişi	[0°/30°] _s
C3-Kirişi	[0°/45°] _s
C4-Kirişi	[0°/60°] _s
C5-Kirişi	[0°/90°] _s
C6-Kirişi	[0°/45°/0°/45°]
C7-Kirişi	[0°/60°/0°/60°]
C8-Kirişi	[0°/90°/0°/90°]
C9-Kirişi	
E/Cam boyuna elastisite modülü, E_1 [44]	72 GPa
Epoksi elastisite modülü, E [44]	3,5 GPa
Fiber kesiri, v_f	0,545
Matris kesiri, v_m	0,455
I_x – Kesit atalet momentleri	398491,9983 mm ⁴
I_y – Kesit atalet momentleri	2516722,6368 mm ⁴
Kayma eksenine ile ağırlık merkezi arasındaki uzaklık, r	38,3483 mm
Eğilmede ki boyutsuz frekans parametresi, λ_B	4,545



Şekil 4.3. C kirişlere ait üç boyutlu model ve kiriş ölçüleri.

Kompozit kiriş malzemesi olarak ANSYS Workbench programının malzeme kütüphanesinde bulunan Epoxy E-Glass Wet seçilmiştir. Şekil 4.4.'te Epoxy E-Glass Wet için ANSYS programında verilen mühendislik verileri gösterilmiştir.

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source Description
3	Epoxy E-Glass Wet			Composite_Materials
Properties of Outline Row 3: Epoxy E-Glass Wet				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1850	kg m ⁻³	
3	Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
8	Orthotropic Elasticity			
9	Young's Modulus X direction	35000	MPa	
10	Young's Modulus Y direction	9000	MPa	
11	Young's Modulus Z direction	9000	MPa	
12	Poisson's Ratio XY	0,28		
13	Poisson's Ratio YZ	0,4		
14	Poisson's Ratio XZ	0,28		
15	Shear Modulus XY	4700	MPa	
16	Shear Modulus YZ	3500	MPa	
17	Shear Modulus XZ	4700	MPa	
18	Orthotropic Stress Limits			
19	Tensile X direction	780	MPa	
20	Tensile Y direction	31	MPa	
21	Tensile Z direction	31	MPa	
22	Compressive X direction	-480	MPa	
23	Compressive Y direction	-100	MPa	
24	Compressive Z direction	-100	MPa	
25	Shear XY	60	MPa	
26	Shear YZ	35	MPa	
27	Shear XZ	60	MPa	

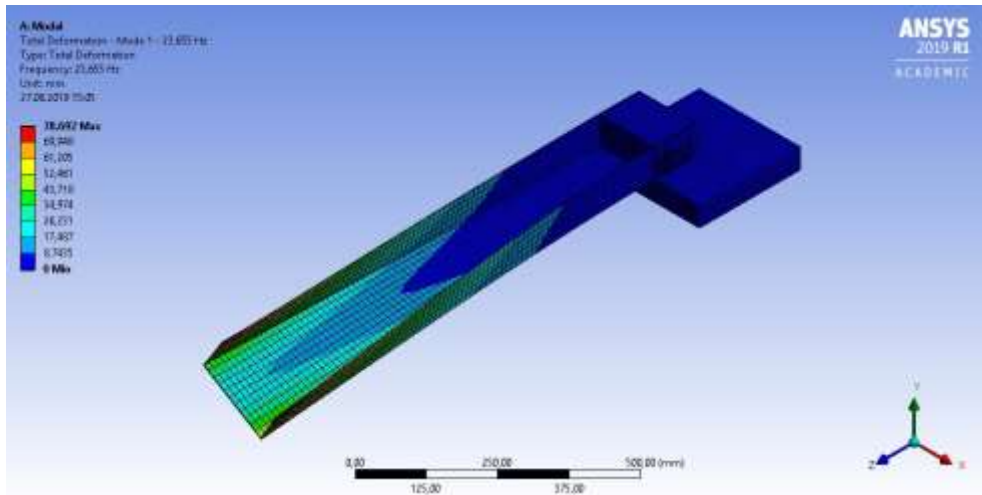
Şekil 4.4. ANSYS Workbench programında ki Epoxy E-Glass Wet malzemesine ait mühendislik değerleri.

Şekil 4.3.'de katı modeli ve ankastre-serbest sınır şartları gösterilen farklı fiber dizilimindeki dört katmanlı C kirişlerin ANSYS Workbench programı kullanılarak modal analiz metoduyla elde edilen doğal frekanslarına ait değerler Tablo 4.4.'te sunulmuştur.

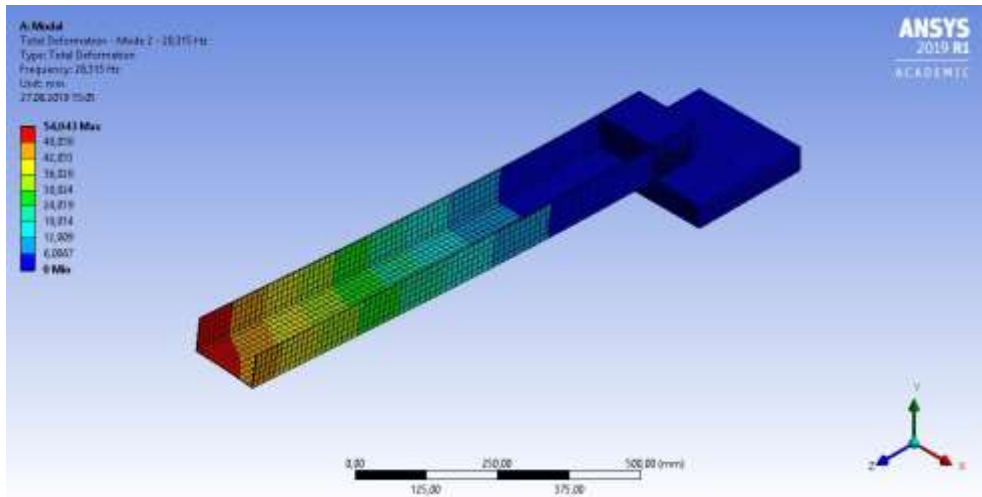
Tablo. 4.4. Ankastre-serbest sınır şartlarında sonlu elemanlar modal analiz metoduyla elde edilen C kirişlerin ilk 10 mod için doğal frekans değerleri (Hz)

MOD	C1-Kirişi [0°] ₄	C2-Kirişi [90°] ₄	C3-Kirişi [0°/30°] _s	C4-Kirişi [0°/45°] _s	C5-Kirişi [0°/60°] _s	C6-Kirişi [0°/90°] _s	C7-Kirişi [0°/30°/0°/30°]	C8-Kirişi [0°/60°/0°/60°]	C9-Kirişi [0°/90°/0°/90°]
1	23,655	39,205	24,554	27,977	28,331	33,114	26,522	28,701	33,019
2	28,315	46,912	32,264	33,483	36,403	42,888	33,41	36,262	42,622
3	90,583	102,14	90,272	104,27	99,72	125,73	92,632	98,926	113,48
4	126,45	115,61	130,85	138,72	146,35	149,20	138,01	138,40	137,39
5	140,65	123,63	142,10	145,34	150,63	153,42	142,55	144,62	145,37
6	154,59	137,86	154,19	154,86	156,56	172,26	147,92	156,22	160,64
7	175,45	147,96	176,76	171,53	178,52	178,39	175,16	172,06	170,41
8	198,53	177,91	198,18	199,93	206,75	198,34	201,17	200,56	194,78
9	201,82	190,00	208,37	215,00	217,63	232,13	213,65	226,04	227,41
10	234,79	206,72	239,91	235,40	235,48	250,22	245,88	239,29	233,23

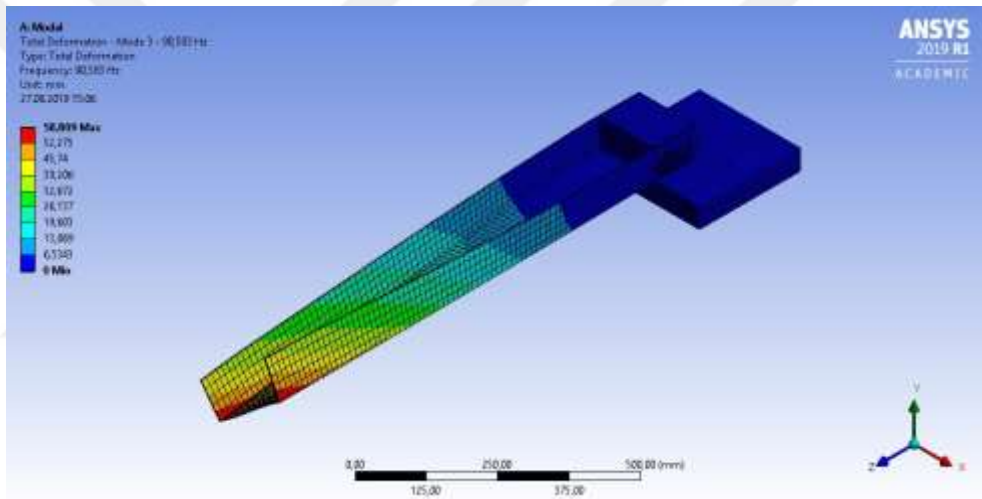
Şekil 4.5. – 4.14.'de E-cam/epoksi kompozit C1 ve C2 kirişlerine ait ilk 5 moda ait mod biçimleri gösterilmiştir. Şekil 4.15. – 4.21.'de de sırasıyla C3-C9 kirişlerine ait eğilmenin 1. modu olan mod 2'nin mod biçimleri sunulmuştur.



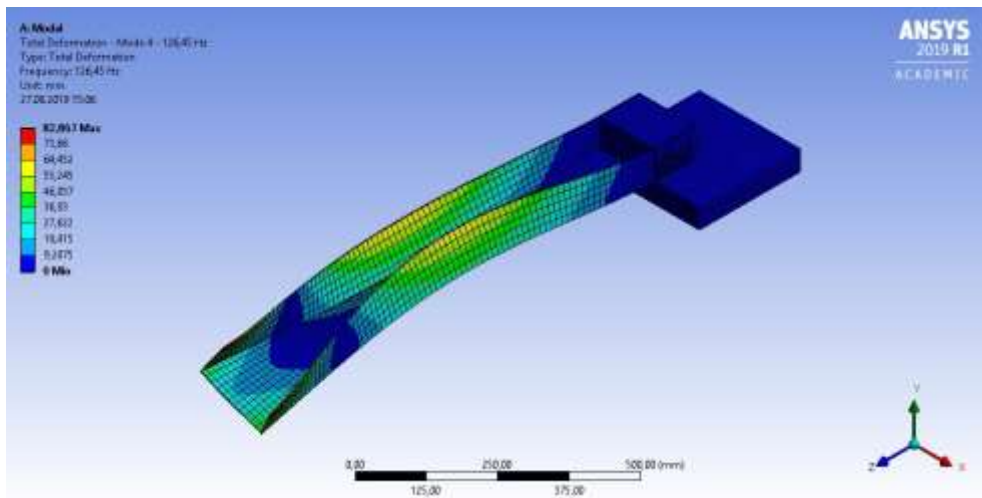
Şekil 4.5. E-Cam/Epoksi kompozit C1-[0°]₄ kirişinin Mod 1 şekli (1. burulma).



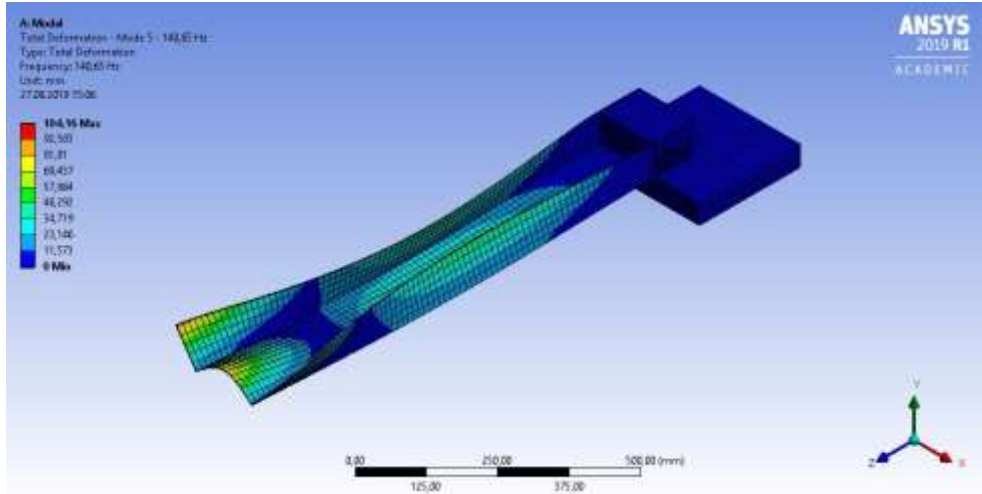
Şekil 4.6. E-Cam/Epoksi kompozit C1-[0°]₄ kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).



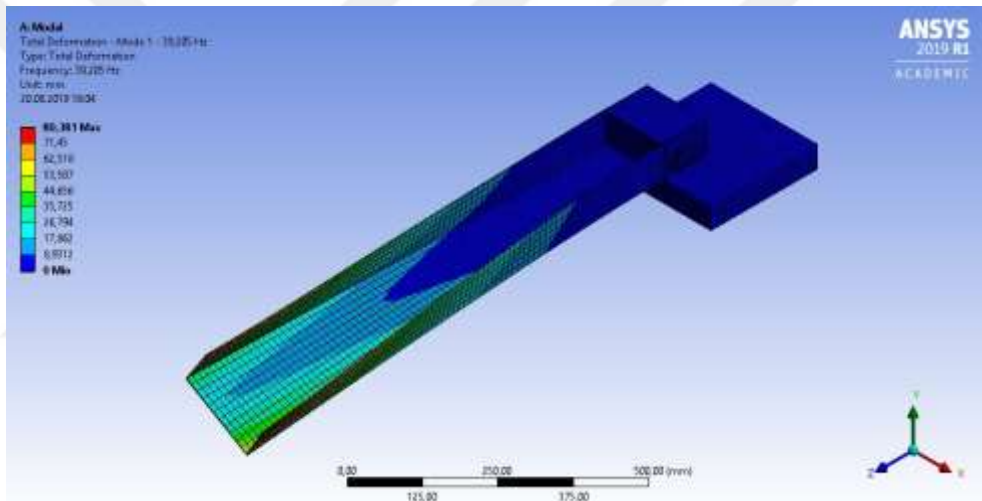
Şekil 4.7. E-Cam/Epoksi kompozit C1-[0°]₄ kirişinin Mod 3 şekli.



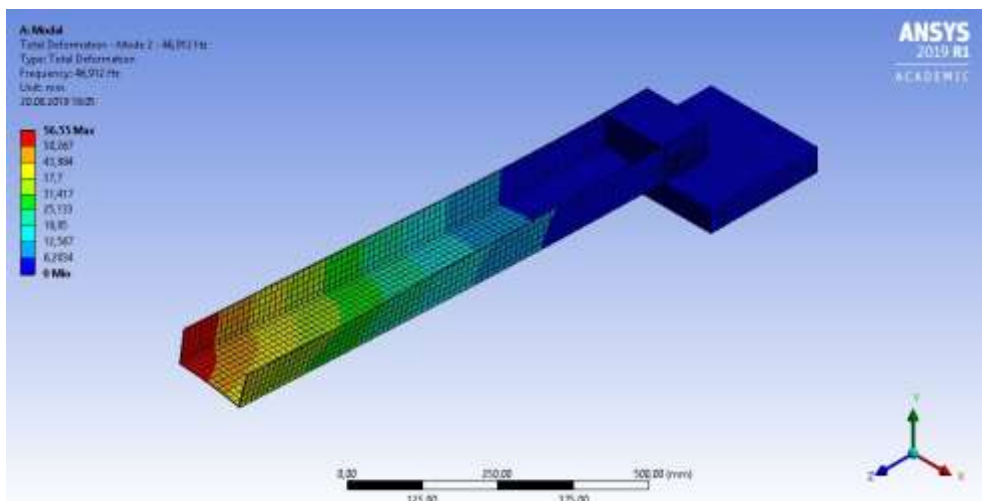
Şekil 4.8. E-Cam/Epoksi kompozit C1-[0°]₄ kirişinin Mod 4 şekli.



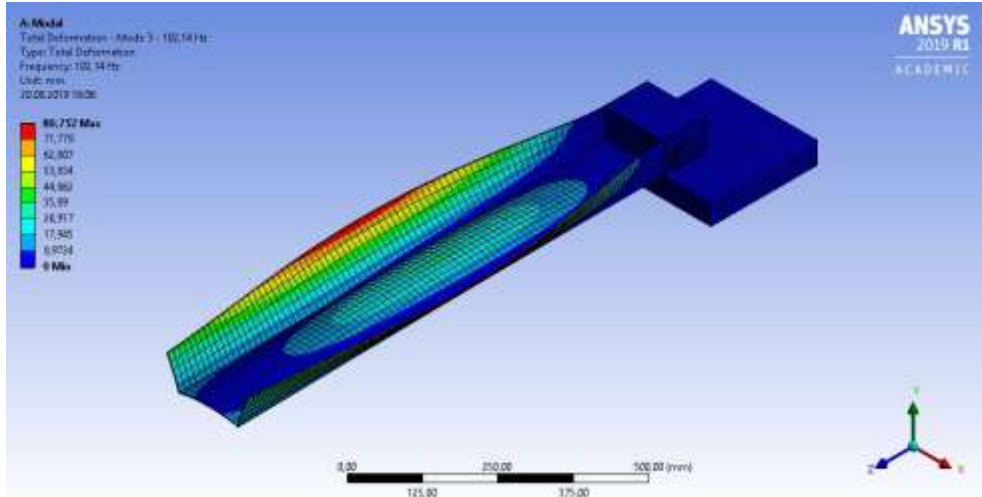
Şekil 4.9. E-Cam/Epoksi kompozit C1-[0°]₄ kirişinin Mod 5 şekli.



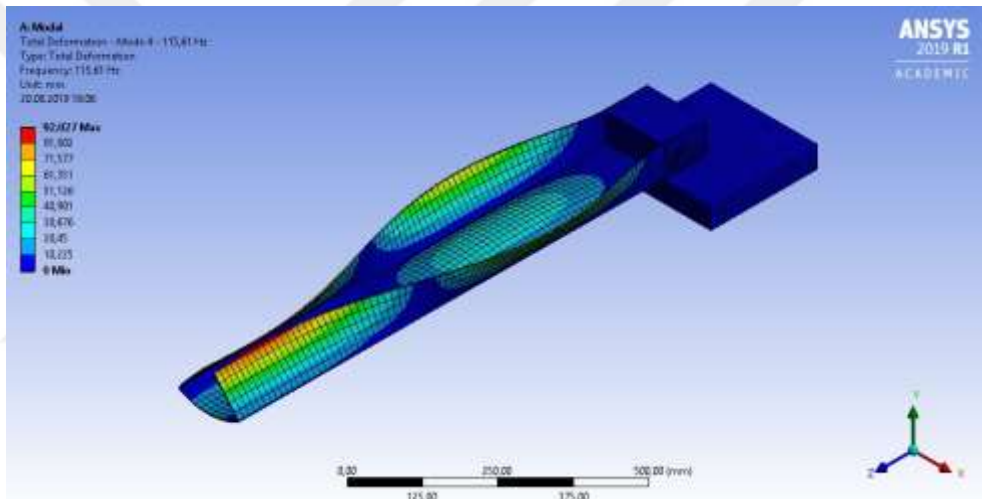
Şekil 4.10. E-Cam/Epoksi kompozit C2-[90°]₄ kirişinin Mod 1 şekli (1. burulma).



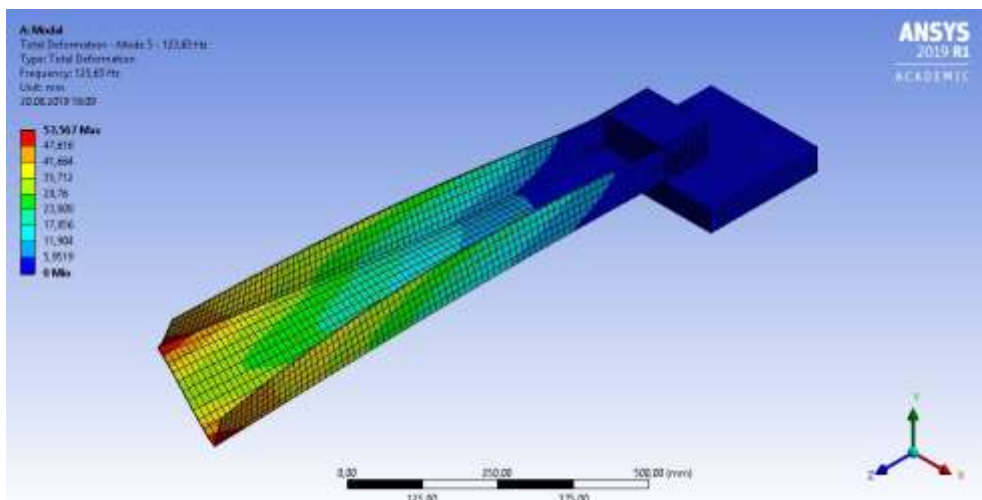
Şekil 4.11. E-Cam/Epoksi kompozit C2-[90°]₄ kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).



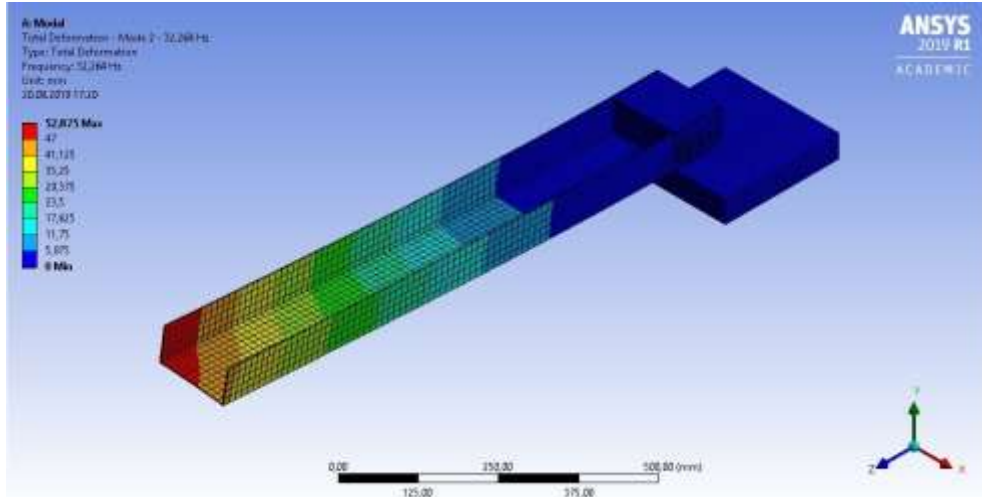
Şekil 4.12. E-Cam/Epoksi kompozit C2-[90°]₄ kirişinin Mod 3 şekli.



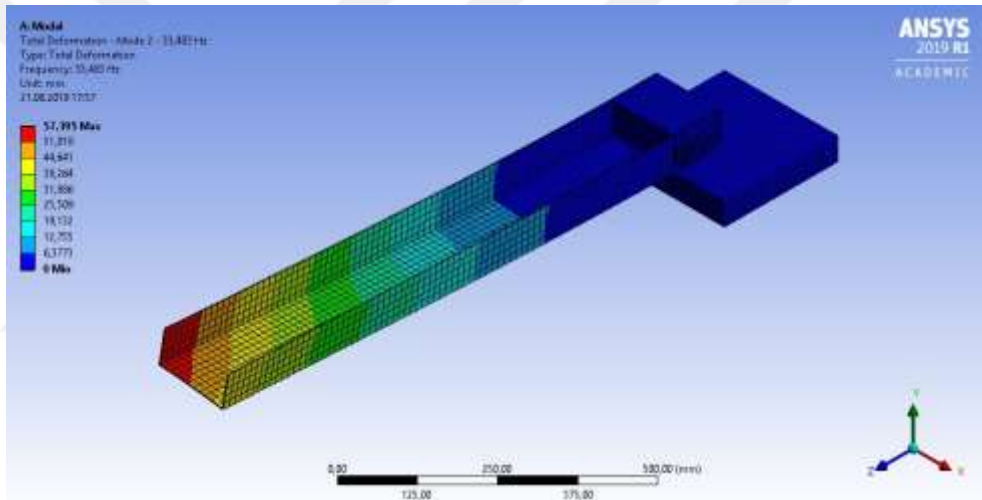
Şekil 4.13. E-Cam/Epoksi kompozit C2-[90°]₄ kirişinin Mod 4 şekli.



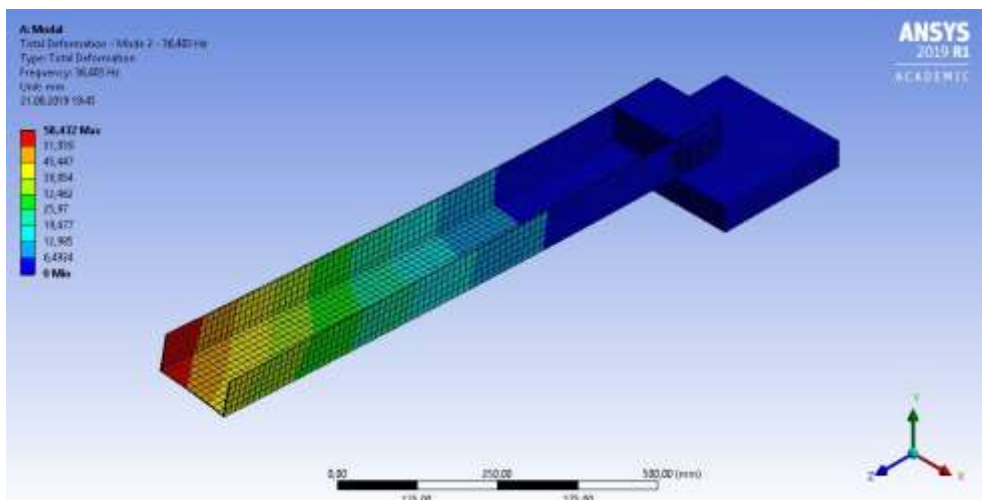
Şekil 4.14. E-Cam/Epoksi kompozit C2-[90°]₄ kirişinin Mod 5 şekli.



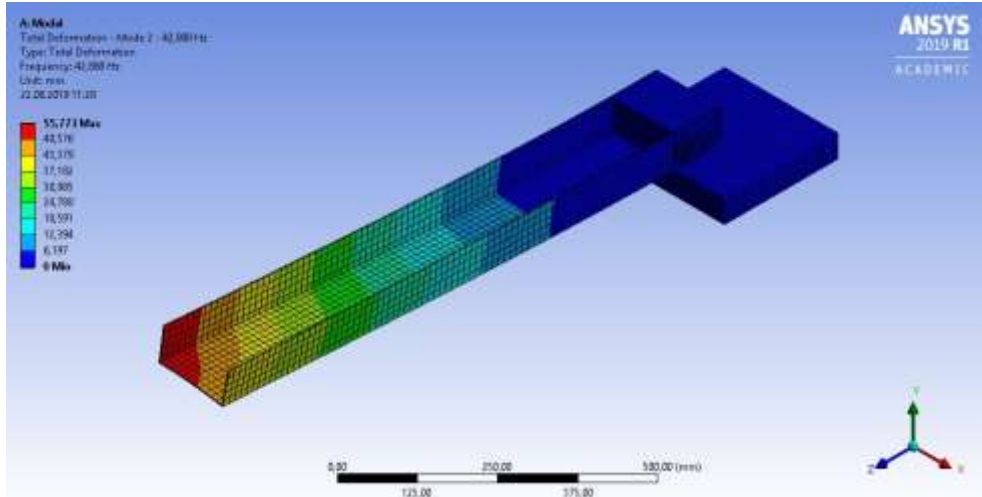
Şekil 4.15. E-Cam/Epoksi kompozit C3-[0°-30°]_s kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).



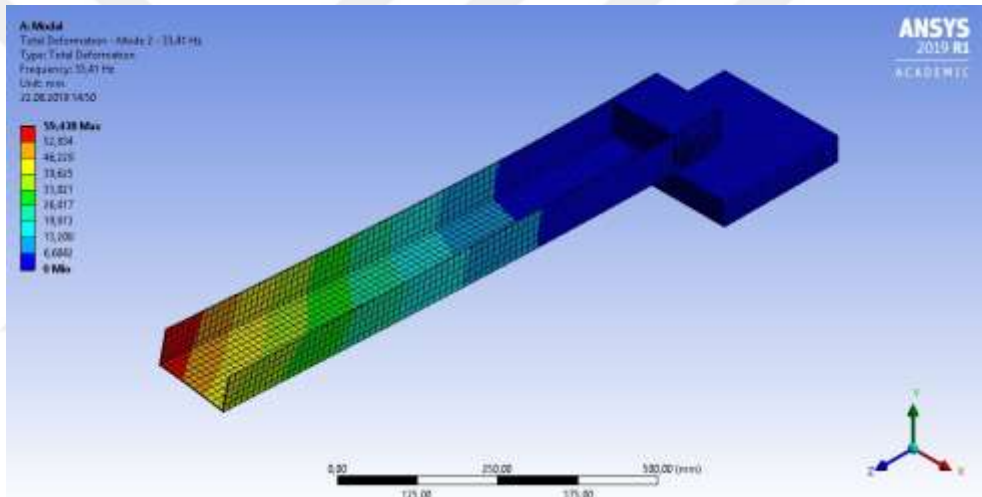
Şekil 4.16. E-Cam/Epoksi kompozit C4-[0°-45°]_s kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).



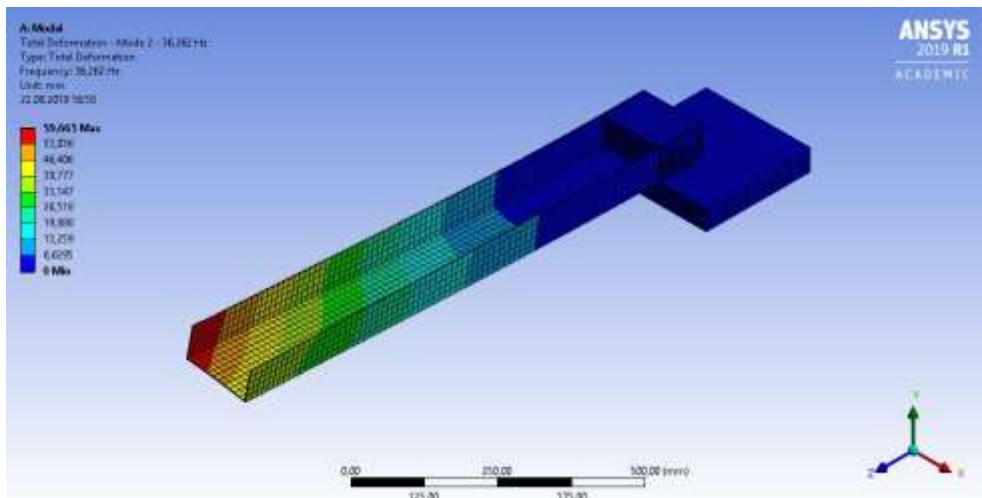
Şekil 4.17. E-Cam/Epoksi kompozit C5-[0°-60°]_s kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).



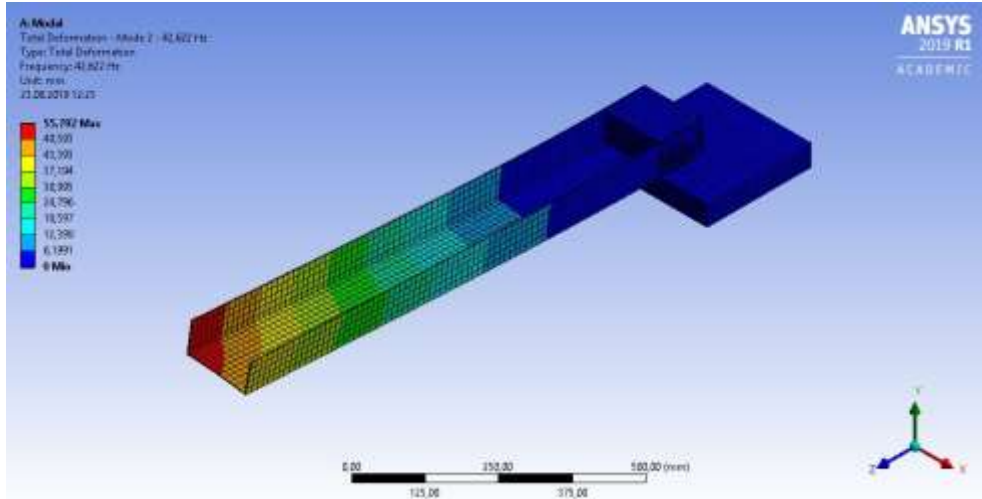
Şekil 4.18. E-Cam/Epoksi kompozit C6-[0°-90°]_s kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).



Şekil 4.19. E-Cam/Epoksi kompozit C7-[0-45-0-45°] kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).



Şekil 4.20. E-Cam/Epoksi kompozit C8-[0-60-0-60°] kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).



Şekil 4.21. E-Cam/Epoksi kompozit C9-[0-90-0-90°] kirişinin Mod 2 şekli (1. eğilme).

Analiz sonucunda elde edilen mod biçimleri değerlendirildiğinde; kesme deformasyonları ve eylemsizlik momentleri hariç tutulduğunda mod1, mod3 ve mod4'ün baskın burulma modları olduğu, mod2'nin ise eğilme modu olduğu anlaşılmaktadır. Malzemenin eğilme dayanımı, kesme deformasyonu ve eylemsizlik momentlerinin etkisi göz önüne alındığında mod1 ve mod3'ün baskın burulma modları olduğu mod 2'nin ise baskın eğilme modu olduğu anlaşılmaktadır. Mod4 ve mod5 kuvvetli birleşik modlardır.

4.4. Kompozit C Kirişlerin Deneysel Modal Analizi

Bu bölümde dört katmanlı, farklı fiber dizilimler de ve açık kesite sahip olan C kirişlerin deneysel modal analizi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 9 farklı fiber dizilimine sahip olan, fiber malzemesi E/Cam, matris malzemesi epoksi olan kompozit C kirişler, serbest-serbest ve ankastre-serbest sınır şartlarına göre doğal frekansları incelenmiştir. Şekil 4.22.'de serbest-serbest sınır şartları için hazırlanan deney düzeneği gösterilmiştir. Şekil 4.34.'de ankastre-serbest sınır şartları için hazırlanan deney düzeneği gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda; frekans toplama cihazı olarak Brüel&Kjær firmasına ait frekans analizörü ve RT Pro Photon 7.0 yazılımı kullanılmıştır.

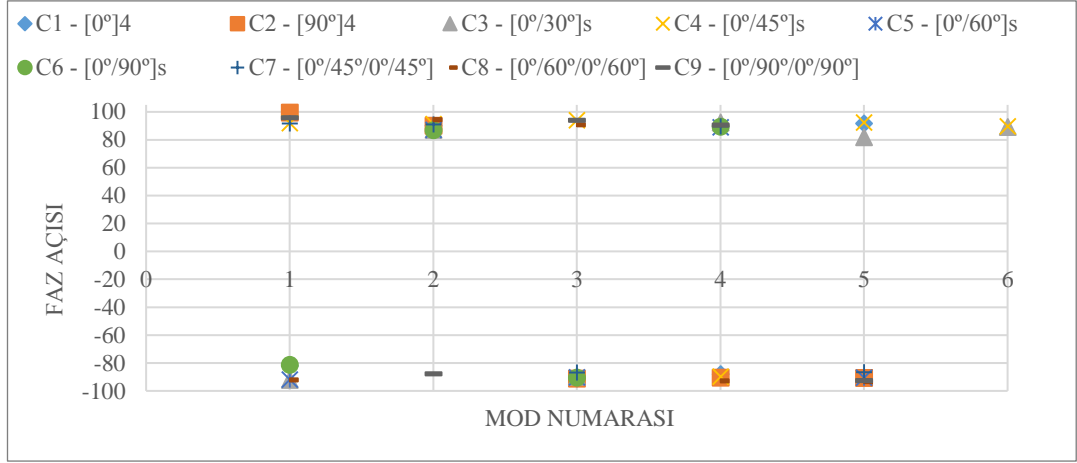
Deneysel modal analiz çalışmalarında elde edilen sonuçlar aşağıdaki tablolarda ve grafiklerde sunulmuştur. Tablo 4.3.'de fiziksel özellikleri ve fiber dizimleri sunulan C kirişlerin, Tablo 4.5.'de serbest-serbest sınır şartlarında deneysel modal analiz metoduyla ilk 5 mod için elde edilen doğal frekansları sunulmuştur. Şekil 4.23.'de sırasıyla C1-C9 kirişlerinin tüm modlardaki doğal frekanslarına ait olan faz açılarının grafiksel gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.22. Deneysel modal analiz deney düzeneği – Serbest-serbest.

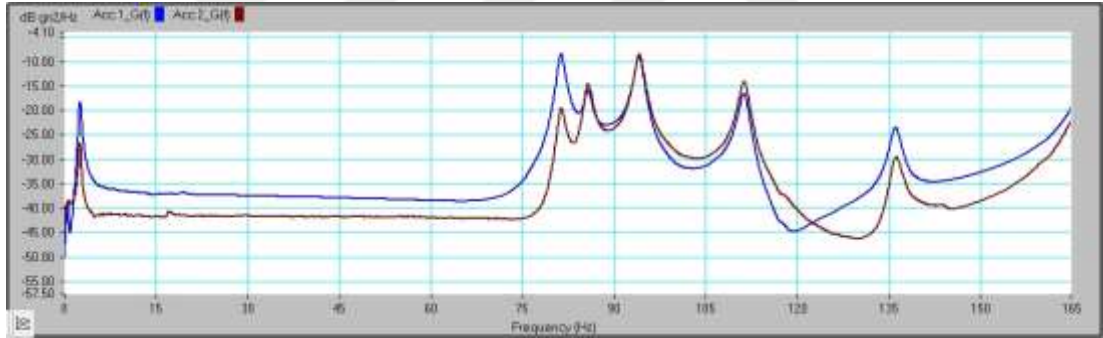
Tablo. 4.5. Serbest-Serbest sınır şartlarında DMA metoduyla elde edilen, farklı fiber dizimlerindeki C kirişlerin mod numaraları ve doğal frekansları (Hz)

C Kiriş	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5
C1-Kirişi - $[0^0]_4$	2,56	81,20	94,11	111,32	135,86
C2-Kirişi - $[90^0]_4$	3,02	134,39	143,09	146,48	158,29
C3-Kirişi - $[0^0/30^0]_s$	3,02	89,72	101,16	119,38	122,77
C4-Kirişi - $[0^0/45^0]_s$	3,29	81,57	85,87	93,75	110,13
C5-Kirişi - $[0^0/60^0]_s$	3,29	93,93	103,54	121,03	124,42
C6-Kirişi - $[0^0/90^0]_s$	3,75	95,85	105,01	122,68	-
C7-Kirişi - $[0^0/45^0/0^0/45^0]$	3,66	95,03	106,56	126,16	152,25
C8-Kirişi - $[0^0/60^0/0^0/60^0]$	3,57	104,27	108,21	112,97	134,12
C9-Kirişi - $[0^0/90^0/0^0/90^0]$	2,56	83,12	93,38	110,50	133,57

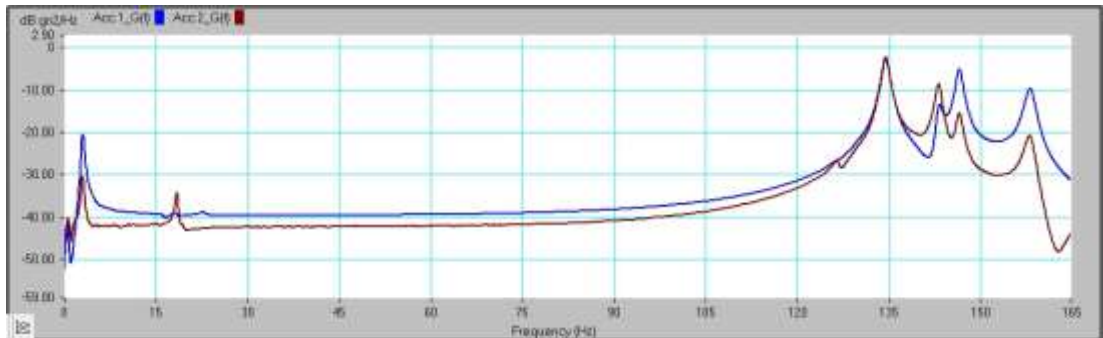


Şekil 4.23. C-Kirişlerin serbest-serbest sınır şartlarında elde edilen doğal frekanslarının faz açıları grafiği.

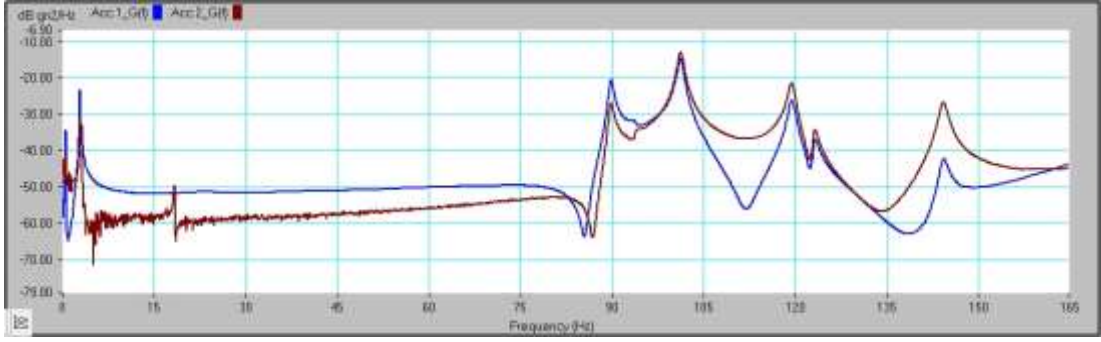
Şekil 4.24. – 4.32’de C1-C9 kirişlerine ait; serbest-serbest sınır şartlarında DMA metoduyla, Brüel&Kjær firmasına ait frekans analizörü ve RT Pro Photon 7.0 yazılımı kullanılarak elde edilen FFT grafikleri sunulmuştur.



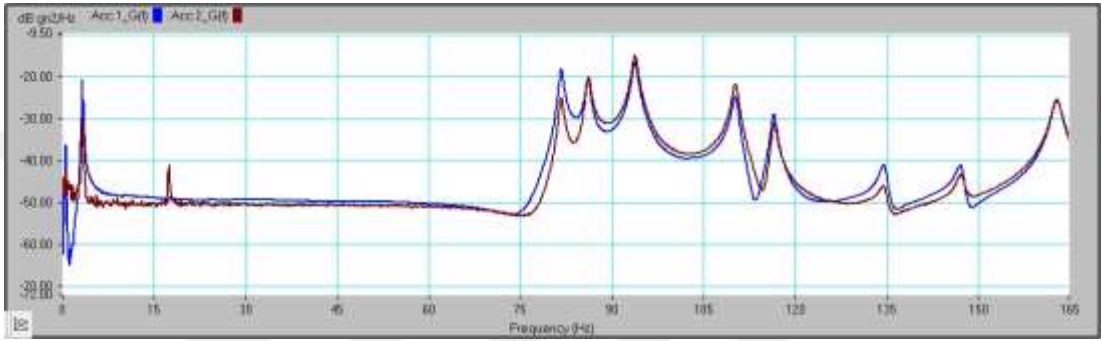
Şekil 4.24. C1-kirişine ait Serbest-Serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.



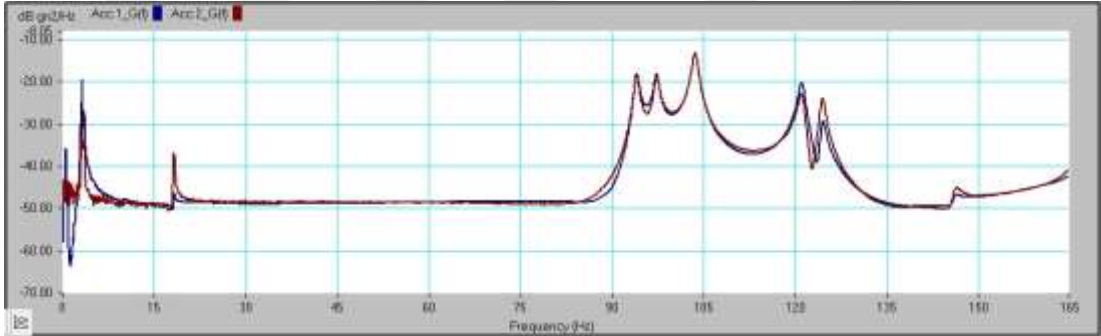
Şekil 4.25. C2- kirişine ait Serbest-Serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.



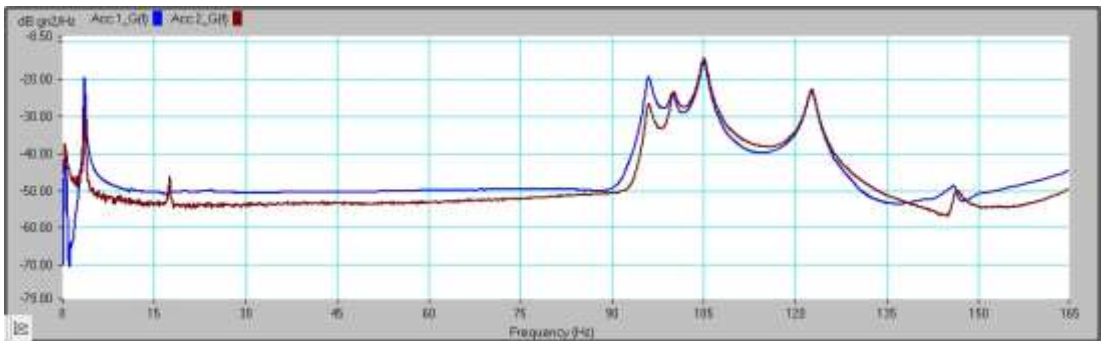
Şekil 4.26. C3- kirisine ait Serbest-Serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.



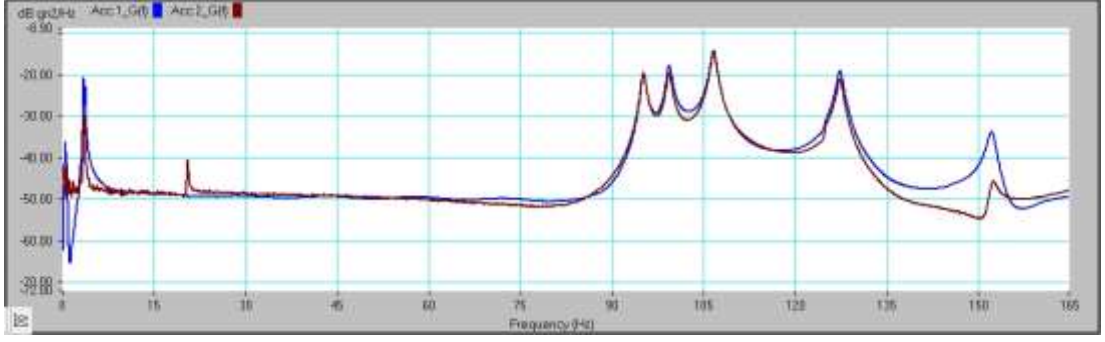
Şekil 4.27. C4- kirisine ait Serbest-Serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.



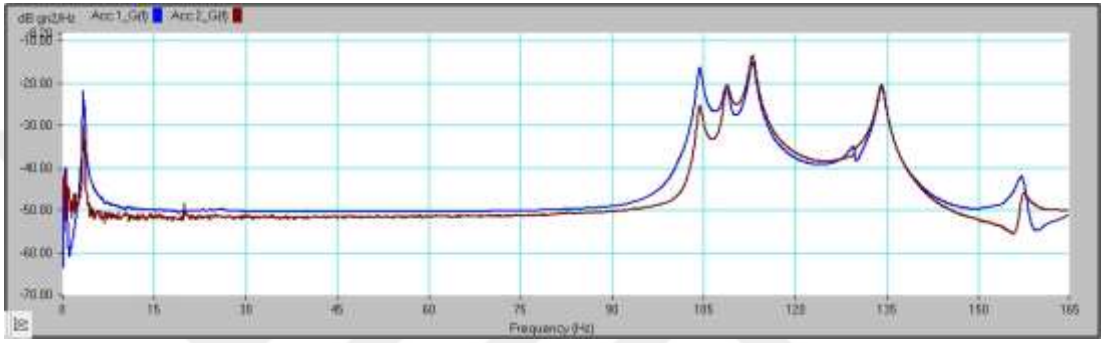
Şekil 4.28. C5- kirisine ait Serbest-Serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.



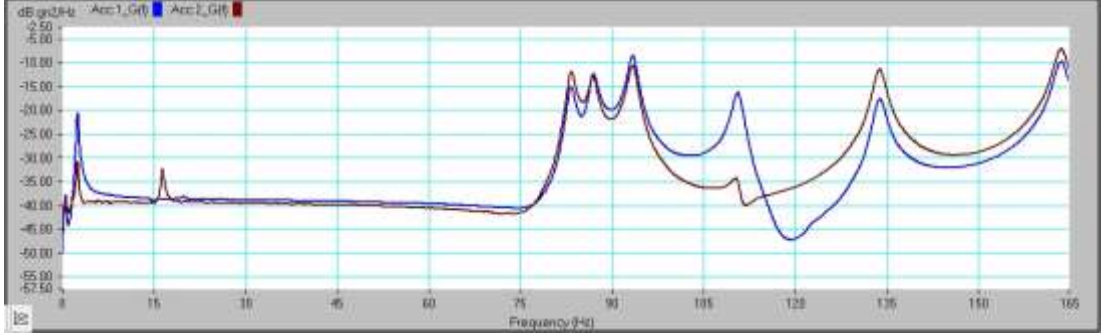
Şekil 4.29. C6- kirisine ait Serbest-Serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.



Şekil 4.30. C7- kirişine ait Serbest-Serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.



Şekil 4.31. C8- kirişine ait Serbest-Serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.

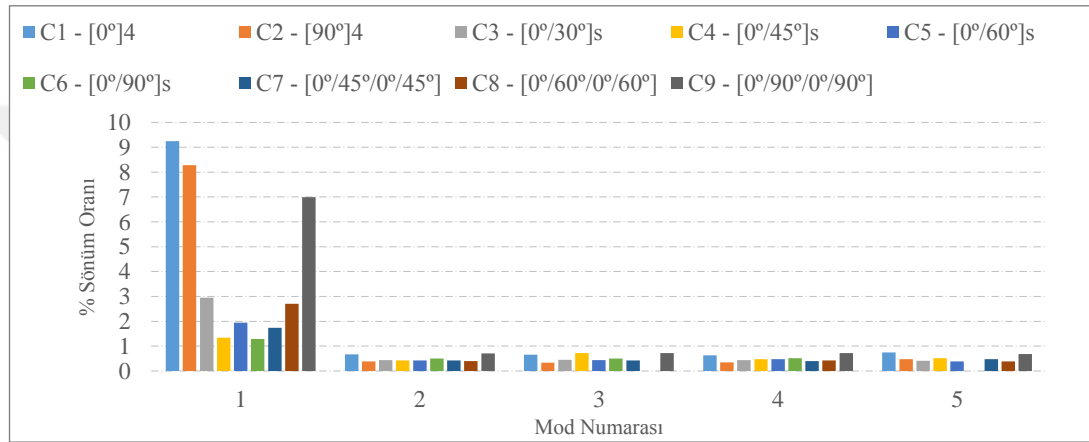


Şekil 4.32. C9- kirişine ait Serbest-Serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafikleri.

Tablo 4.6.'da C kirişlerin serbest – serbest sınır şartlarında DMA metoduyla ilk 5 modu için elde edilen sönüm oranları sunulmuştur. Şekil 4.33.'de de bu sönüm oranlarına ait grafiksel gösterim sunulmuştur.

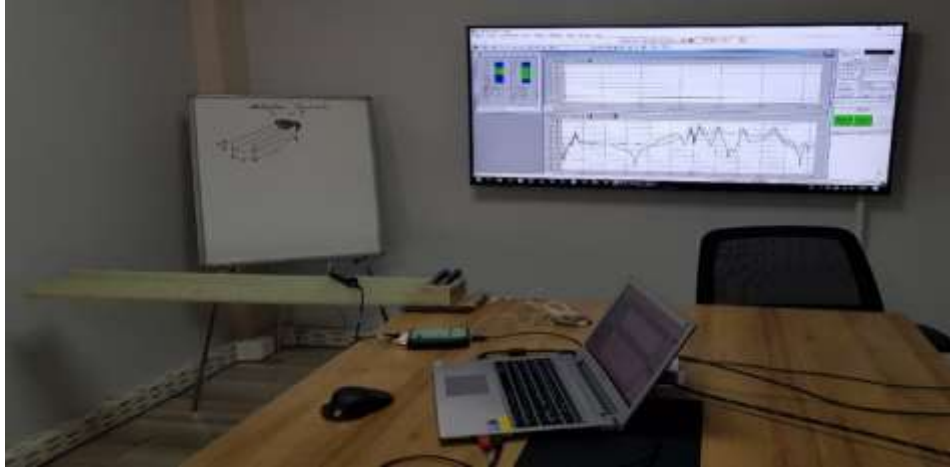
Tablo. 4.6. Serbest-Serbest sınır şartlarında DMA metoduyla elde edilen, farklı fiber dizilimlerdeki C kirişlerin sönüm oranları (%)

C Kiriş	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5
C1-Kirişi - $[0^0]_4$	9,25	0,67	0,66	0,63	0,75
C2-Kirişi - $[90^0]_4$	8,28	0,39	0,33	0,35	0,47
C3-Kirişi - $[0^0/30^0]_s$	2,95	0,44	0,45	0,44	0,41
C4-Kirişi - $[0^0/45^0]_s$	1,34	0,42	0,72	0,47	0,52
C5-Kirişi - $[0^0/60^0]_s$	1,94	0,43	0,44	0,47	0,38
C6-Kirişi - $[0^0/90^0]_s$	1,29	0,5	0,5	0,51	-
C7-Kirişi - $[0^0/45^0/0^0/45^0]$	1,74	0,43	0,42	0,4	0,48
C8-Kirişi - $[0^0/60^0/0^0/60^0]$	2,71	0,4	-	0,43	0,39
C9-Kirişi - $[0^0/90^0/0^0/90^0]$	6,99	0,71	0,72	0,72	0,68



Şekil 4.33. C- Kirişlerin, serbest-serbest sınır şartlarında elde edilen sönüm oranları grafiği (%).

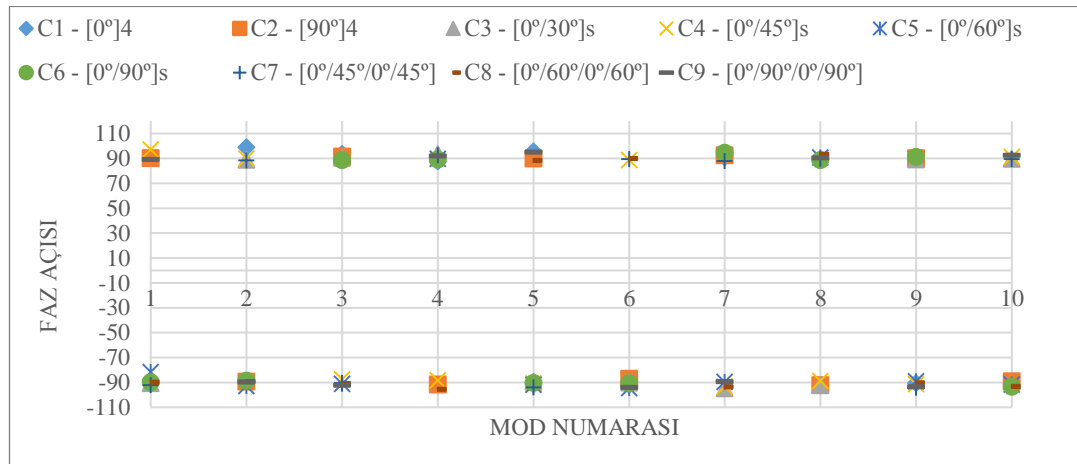
Aynı C kirişlerin ankastre–serbest sınır şartlarında yapılan DMA çalışmalarının sonuçları aşağıdaki tablolarda ve grafiklerde sunulmuştur. Şekil 4.34.’de ankastre-serbest sınır şartları için hazırlanan deney düzeneği gösterilmiştir. Tüm C kirişler tam doğrusallık sağlanacak şekilde, boyunun 100 mm’lik kısmından marangoz mingeneleri ve C profilin iç kısmı formunda ahşap destek malzemesi kullanılarak masaya ankastre olarak bağlanmıştır. Tablo 4.3.’de fiziksel özellikleri ve fiber dizilimleri sunulan C kirişlerin, Tablo 4.7.’de ankastre – serbest sınır şartlarında DMA metoduyla ilk 10 modu için elde edilen doğal frekansları sunulmuştur. Şekil 4.35’de sırasıyla C1-C9 kirişlerinin tüm modlardaki doğal frekanslarına ait olan faz açılarının grafiksel gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.34. Deneysel modal analiz deney düzeneği – Ankastre-Serbest.

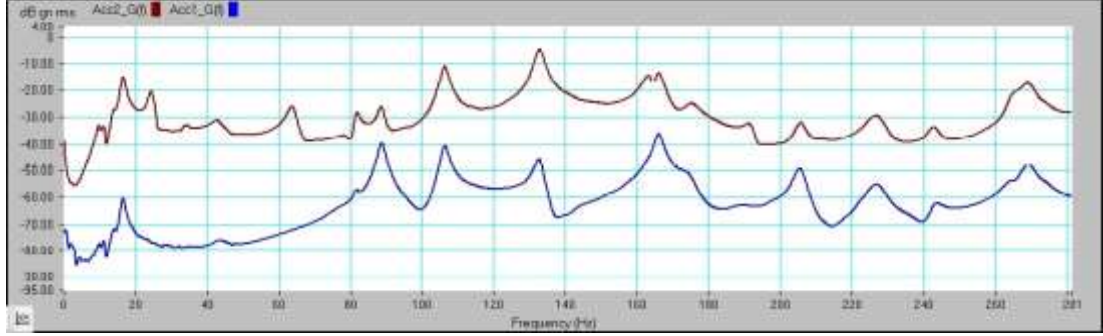
Tablo. 4.7. Ankastre-Serbest sınır şartlarında DMA metoduyla elde edilen, farklı fiber dizilimlerdeki C kirişlerin mod numaraları ve doğal frekansları (Hz)

MOD	C1-Kirişi [0°] ₄	C2-Kirişi [90°] ₄	C3-Kirişi [0°/30°] _s	C4-Kirişi [0°/45°] _s	C5-Kirişi [0°/60°] _s	C6-Kirişi [0°/90°] _s	C7-Kirişi [0°/30°/0°/30°]	C8-Kirişi [0°/60°/0°/60°]	C9-Kirişi [0°/90°/0°/90°]
1	24,375	39,687	25,781	27,343	27,031	25,625	26,093	26,562	32,812
2	28,125	45,468	31,562	33,593	45,468	45,312	38,906	38,593	44,062
3	89,218	98,906	90,000	106,406	99,687	124,37	97,968	100,937	113,281
4	108,125	117,968	134,687	137,500	144,375	145,000	122,500	129,375	137,656
5	136,406	121,875	141,093	143,750	151,093	155,468	144,218	147,187	155,156
6	164,063	135,781	153,125	152,031	155,468	170,156	149,531	154,218	161,093
7	174,531	147,031	176,562	172,812	179,062	178,906	175,937	170,625	169,375
8	203,750	177,812	198,593	199,375	203,906	196,093	199,687	200,625	196,250
9	218,750	195,625	211,250	217,187	216,406	233,750	212,343	226,093	221,093
10	236,875	205,781	237,187	237,187	235,937	264,531	245,156	236,406	234,375

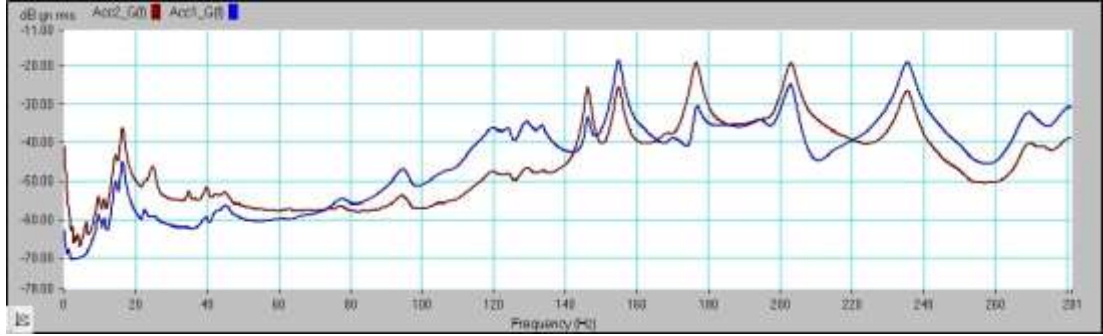


Şekil 4.35. C-Kirişlerin, ankastre-serbest sınır şartlarında elde edilen doğal frekanslarının faz açıları grafiği.

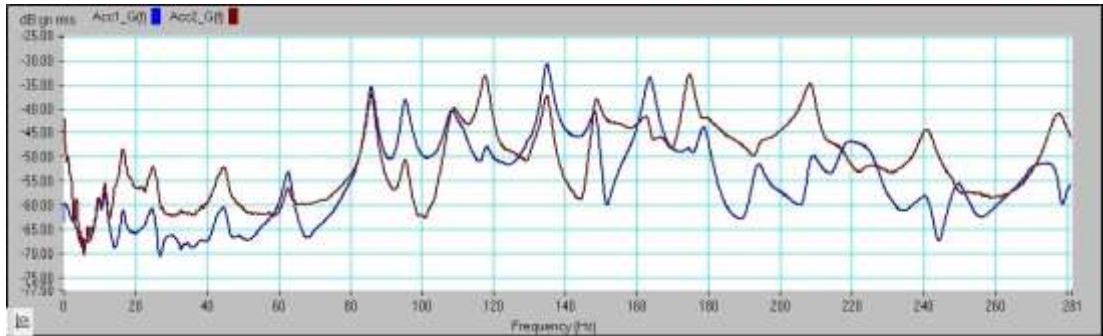
Şekil 4.36. – 4.44.’de sırasıyla C1-C9 kirişlerine ait; ankastre-serbest deneysel modal analiz çalışmalarından, Brüel&Kjær firmasına ait frekans analizörü ve RT Pro Photon 7.0 yazılımı kullanılarak elde edilen FFT grafikleri sunulmuştur.



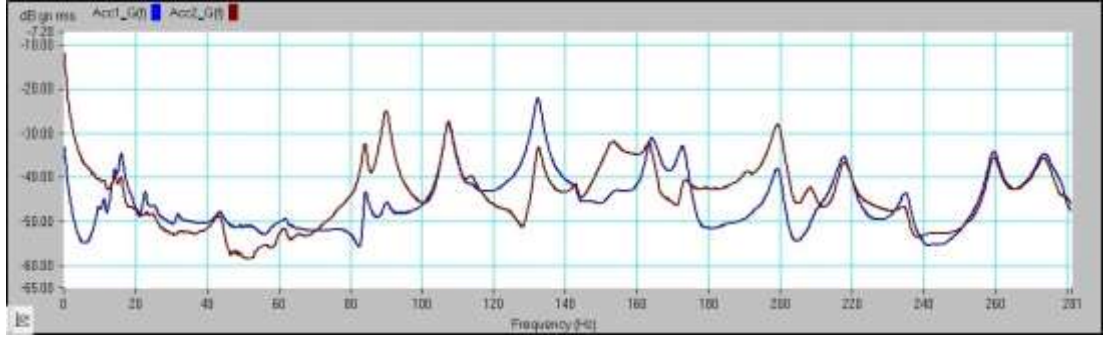
Şekil 4.36. C1-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.



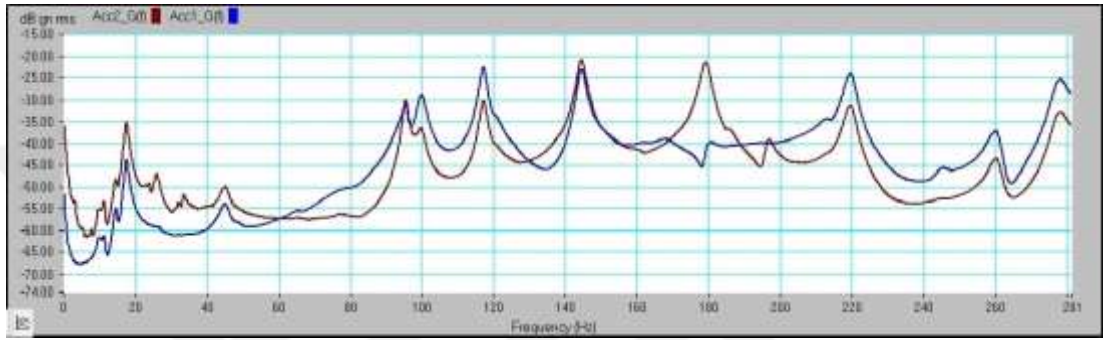
Şekil 4.37. C2-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.



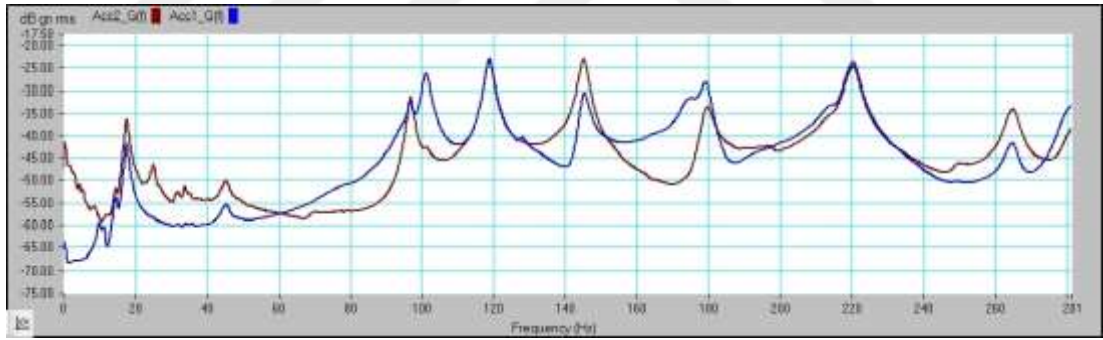
Şekil 4.38. C3-kirişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.



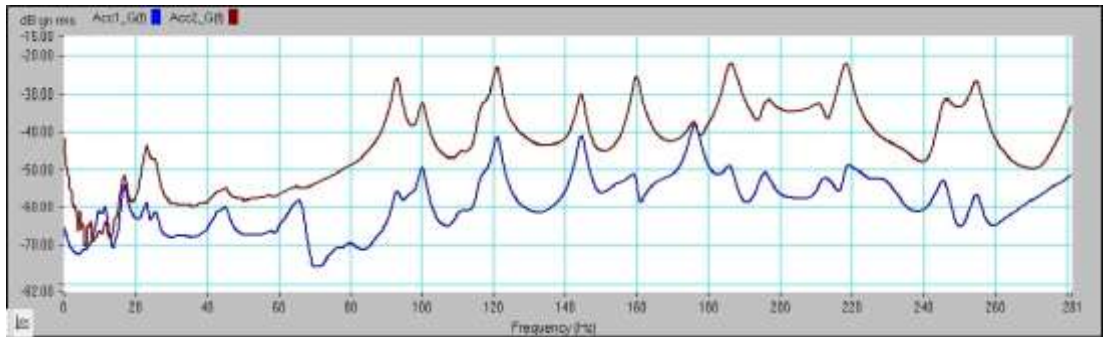
Şekil 4.39. C4-irişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.



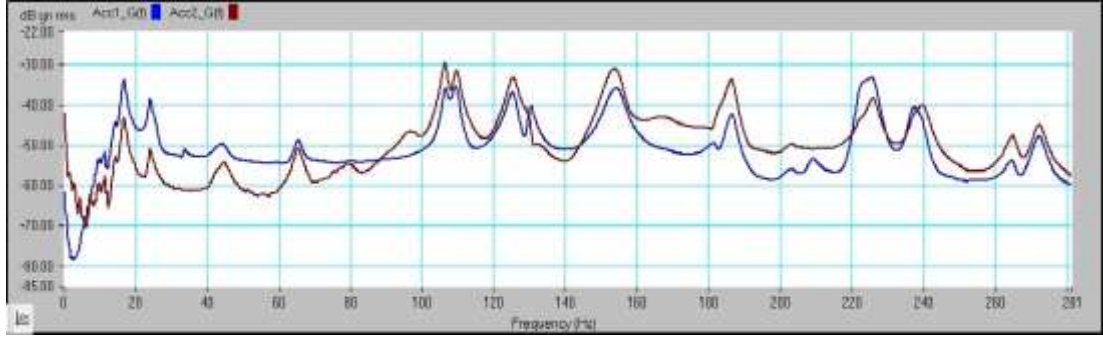
Şekil 4.40. C5-irişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.



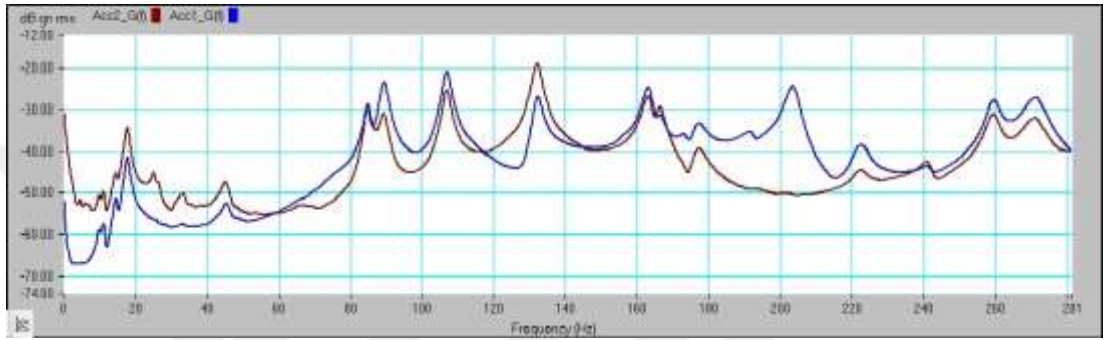
Şekil 4.41. C6-irişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.



Şekil 4.42. C7-irişine ait ankastre-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.



Şekil 4.43. C8-kirişine ait ankastr-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.

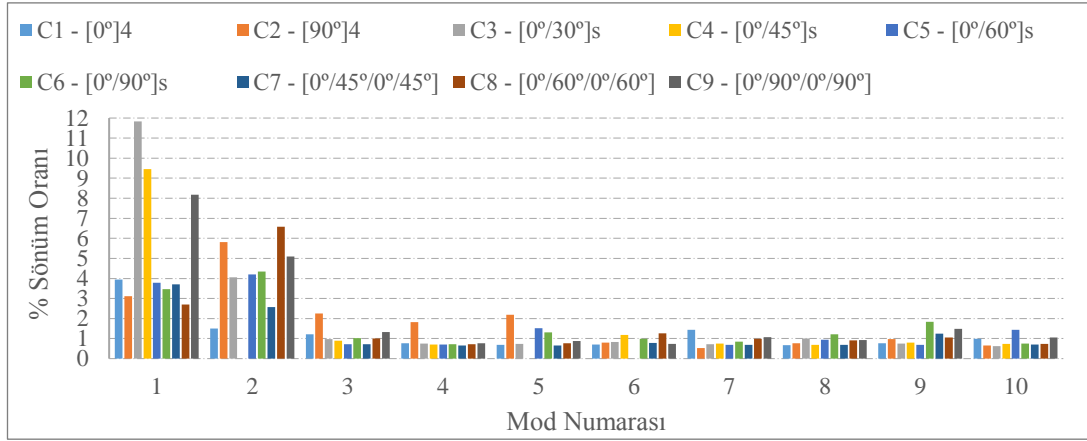


Şekil 4.44. C9-kirişine ait ankastr-serbest sınır şartlarında RT Pro Photon yazılımı ile elde edilen FFT grafiği.

Tablo 4.8.'de C kirişlerin ankastr – serbest sınır şartlarında DMA metoduyla ilk 10 modu için elde edilen sönüm oranları ve Şekil 4.45.'de de bu sönüm oranlarına ait grafiksel gösterim sunulmuştur.

Tablo 4.8. Ankastr-serbest sınır şartlarında DMA metoduyla elde edilen, farklı fiber dizimlerdeki C kirişlerin sönüm oranları (%)

MOD	C-Kiriş 1 (%)	C-Kiriş 2 (%)	C-Kiriş 3 (%)	C-Kiriş 4 (%)	C-Kiriş 5 (%)	C-Kiriş 6 (%)	C-Kiriş 7 (%)	C-Kiriş 8 (%)	C-Kiriş 9 (%)
1	3,95	3,11	11,84	9,46	3,78	3,46	3,71	2,70	8,18
2	1,50	5,82	4,05	-	4,20	4,35	2,57	6,58	5,10
3	1,21	2,25	0,98	0,90	0,72	1,03	0,72	1,00	1,33
4	0,76	1,82	0,75	0,71	0,70	0,72	0,65	0,72	0,76
5	0,68	2,18	0,73	-	1,52	1,31	0,66	0,77	0,88
6	0,71	0,80	0,83	1,18	-	0,99	0,79	1,26	0,74
7	1,44	0,53	0,72	0,75	0,68	0,84	0,68	0,99	1,07
8	0,67	0,77	1,00	0,68	0,95	1,21	0,68	0,91	0,92
9	0,77	0,97	0,75	0,80	0,69	1,83	1,25	1,05	1,49
10	0,99	0,65	0,63	0,74	1,44	0,75	0,70	0,74	1,05



Şekil 4.45. C-Kirişlerin, ankastre-serbest sınır şartlarında elde edilen sönüm oranlarının grafiği (%).

Tablo 4.9.- Tablo 4.11.'de C kirişlerin deneysel modal analiz ve sonlu elemanlar modal analiz metodlarıyla elde edilen doğal frekanslarının karşılaştırma sonuçları sunulmuştur. Tablolar dikkatle incelendiğinde hata oranlarının düşük olduğu yani her iki metodla da elde edilen doğal frekans değerlerin birbirleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Tablo 4.9. C1, C2 ve C3 kirişlerinin DMA ve sonlu elemanlar modal analiz metodlarıyla elde edilen doğal frekans sonuçlarının karşılaştırılması (Hz)

MOD	C-Kiriş 1 ANSYS	C-Kiriş 1 DMA	HATA* (%)	C-Kiriş 2 ANSYS	C-Kiriş 2 DMA	HATA* (%)	C-Kiriş 3 ANSYS	C-Kiriş 3 DMA	HATA* (%)
1	23,655	24,357	2,95	39,205	39,687	1,22	24,554	25,781	4,76
2	28,315	28,125	0,68	46,912	45,468	3,17	32,264	31,562	2,22
3	90,583	89,218	1,53	102,14	98,906	3,27	90,272	90,000	0,30
4	126,45	108,125	16,95	115,61	117,968	2,00	130,85	134,687	2,85
5	140,65	136,063	3,11	123,63	121,875	1,44	142,10	141,093	0,71
6	154,59	164,063	5,77	137,86	135,781	1,53	154,19	153,125	0,70
7	175,45	174,531	0,53	147,96	147,031	0,63	176,76	176,562	0,11
8	198,53	203,750	2,56	177,91	177,812	0,05	198,18	198,593	0,21
9	201,82	218,750	7,74	190,00	195,625	2,88	208,37	211,250	1,36
10	234,79	236,875	0,88	206,72	205,781	0,46	239,91	237,187	1,15

*Hata Oranı = $\left| \frac{\text{ANSYS} - \text{DMA}}{\text{DMA}} \right| \times 100\%$

Tablo 4.10. C4, C5 ve C6 kirişlerinin DMA ve sonlu elemanlar modal analiz metodlarıyla elde edilen doğal frekans sonuçlarının karşılaştırılması (Hz)

MOD	C-Kiriş 4 ANSYS	C-Kiriş 4 DMA	HATA* (%)	C-Kiriş 5 ANSYS	C-Kiriş 5 DMA	HATA* (%)	C-Kiriş 6 ANSYS	C-Kiriş 6 DMA	HATA* (%)
1	27,977	27,343	2,32	28,331	27,031	4,81	33,114	25,625	29,23
2	33,483	33,593	0,33	36,403	45,468	19,94	42,888	45,312	5,35
3	104,27	106,406	2,01	99,72	99,687	0,03	125,73	124,375	1,09
4	138,72	137,500	0,89	146,35	144,375	1,37	149,20	145,000	2,90
5	145,34	143,750	1,11	150,63	151,093	0,31	153,42	155,468	1,32
6	154,86	152,031	1,86	156,56	155,468	0,70	172,26	170,156	1,24
7	171,53	172,812	0,74	178,52	179,062	0,30	178,39	178,906	0,29
8	199,93	199,375	0,28	206,75	203,906	1,39	198,34	196,093	1,15
9	215,00	217,187	1,01	217,63	216,406	0,57	232,13	233,750	0,69
10	235,40	237,187	0,75	235,48	235,937	0,19	250,22	264,531	5,41

*Hata Oranı = $|ANSYS - DMA| \times 100\% / DMA$.

Tablo 4.11. C7, C8 ve C9 kirişlerinin DMA ve sonlu elemanlar modal analiz metodlarıyla elde edilen doğal frekans sonuçlarının karşılaştırılması (Hz)

MOD	C-Kiriş 7 ANSYS	C-Kiriş 7 DMA	HATA* (%)	C-Kiriş 8 ANSYS	C-Kiriş 8 DMA	HATA* (%)	C-Kiriş 9 ANSYS	C-Kiriş 9 DMA	HATA* (%)
1	26,522	26,093	1,64	28,701	26,562	8,05	33,019	32,812	0,63
2	33,41	38,906	14,13	36,262	38,593	6,04	42,622	44,062	3,27
3	92,632	97,968	5,45	98,926	100,937	1,99	113,48	113,281	0,18
4	138,01	122,500	12,66	138,40	129,375	6,98	137,39	137,656	0,19
5	142,55	144,218	1,16	144,62	147,187	1,74	145,37	155,156	6,31
6	147,92	149,531	1,08	156,22	154,218	1,30	160,64	161,093	0,28
7	175,16	175,937	0,44	172,06	170,625	0,84	170,41	169,375	0,61
8	201,17	199,687	0,74	200,56	200,625	0,03	194,78	196,250	0,75
9	213,65	212,343	0,62	226,04	226,093	0,02	227,41	221,093	2,86
10	245,88	245,156	0,30	239,29	236,406	1,22	233,23	234,375	0,49

*Hata Oranı = $|ANSYS - DMA| \times 100\% / DMA$.

DMA ve sonlu elemanlar modal analizi metodlarıyla bulunan tüm bu sonuçlar ışığında, kompozit C1-[0°]₄ kirişinin ve C2-[90°]₄ kirişinin fiber açılı doğrultularına bağlı olarak E₁ ve E₂ elastisite modüllerinin tahmini yapılmıştır. İlk olarak C1-[0°]₄ kirişinin sonlu elemanlar metoduyla belirlenen 1. eğilme modundaki doğal frekansı olan mod 2'deki doğal frekansı kullanılarak, $\omega = 2\pi f$ formülünden açısal frekansı hesaplanmıştır. Daha sonra hesaplanan bu değer Tablo 4.3.'de kompozit C kirişler için verilen mühendislik değerleri ile birlikte, $\lambda_B = \omega^2 m L^4 / EI_x$ denkleminde yerine yazılarak eğilme etkileri için boyutsuz frekans parametresi hesaplanmıştır ve Tablo 4.3.'de sunulmuştur. Devamında DMA ile 1. eğilme modu olan, mod 2'deki doğal frekansları belirlenen C1-[0°]₄ kirişinin ve C2-[90°]₄ kirişinin elastisite modülleri hesaplanmıştır. Tablo 4.3.'de kompozit C kirişler için verilen mühendislik değerleri ve mod 2'deki öz frekans değerinden hesaplanan açısal frekans değerleri, $E = \omega^2 m L^4 / \lambda_B I_{x,y}$

denkleminde yerine yazılarak elastisite modülleri yöne bağlı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 4.14.'de referans çalışmalardaki değerler ile birlikte karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablo 4.12.'de referans [40]'da çeşitli kompozitler için sunulan mühendislik değerleri verilmiştir. Tablo 4.13.'de de referans [45]'de E-cam epoksi için sunulan mühendislik değerleri verilmiştir. Tablo 4.14.'deki sonuçlar incelendiğinde bu çalışmada hesaplanan sonuçların, [45]. referanstaki tüm sonuçlar ile son derece uyumlu olduğu [40]. referansta da E_1 elastisite modülü sonucu ile son derece uyumlu olduğu görülmüştür.

Tablo 4.12. Referans [40]'da çeşitli kompozitler için sunulan mühendislik değerleri

Malzeme	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	ν_r
T300/934 grafit/epoksi	131	10,3	6,9	0,22	0,65
AS/3501 grafit/epoksi	138	9	6,9	0,3	0,65
p-100/ERL 1962 pitch grafit/epoksi	468,9	6,2	5,58	0,31	0,62
Kevlar®49/934 aramid/epoksi	75,8	5,5	2,3	0,34	0,65
Scotchply® 1002 E-Cam/epoksi	38,6	8,27	4,14	0,26	0,45
Boron/5505 boron/epoksi	204	18,5	5,59	0,23	0,5
Spectra® 900/826 polietilen/epoksi	30,7	3,52	1,45	0,32	0,65
E-Cam/470-36 E-Cam/vinilester	24,4	6,87	2,89	0,32	0,30

Tablo 4.13. Referans [45]'de çeşitli kompozitler için sunulan mühendislik değerleri

Malzeme	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	ν_r (%)
E-Cam/epoksi	36,2	15,4	6,34	0,28	0,60

Tablo. 4.14. Bu çalışmadaki hesaplanan E_1 ve E_2 elastisite modülü değerlerinin referans çalışmalardaki verilerle karşılaştırılması.

Çalışma	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_1 Hata Oranı* (%)	E_2 Hata Oranı* (%)
Bu Çalışma	38,44	16,56	-	-
Ref. [45]	36,2	15,4	6,18	7,01
Ref. [40]	38,6	8,27	0,414	100,24

*Hata Oranı = $\left| \frac{\text{Bu çalışma} - \text{Referans Çalışma}}{\text{Referans Çalışma}} \right| \times 100\%$

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada farklı fiber dizilimlerine sahip, dört tabakalı kompozit C kirişlerin dinamik özellikleri incelenmiştir. C kirişlerin farklı doğrultularda ki elastisite modülü (E) gibi mühendislik değerlerinin tahmini yapılmıştır. Elastisite modülünün tahmininde tahribatsız muayene yöntemlerinden olan frekans analizi metodu tercih edilmiştir. Yapılan hesaplamalar literatürde yer alan değerlerle karşılaştırılmıştır. Kompozit C kirişler için ankastre–serbest ve serbest–serbest sınır şartlarında DMA çalışmaları darbe çekici yardımıyla yapılmıştır. C kirişlere ait doğal frekanslar, sönüm oranları ve faz açıları gibi dinamik özellikler deneysel çalışmalarla hesaplanmıştır. C kirişlerin ankastre–serbest sınır şartlarındaki modal analizi ANSYS Workbench programında gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar metoduyla elde edilen doğal frekanslardan 1. eğilme modundaki doğal frekans olan mod 2 frekansı ve C kirişler için verilen mühendislik değerleri kullanılarak eğilmedeki boyutsuz frekans parametresi hesaplanmıştır. Buradan elde edilen boyutsuz frekans parametresi ve DMA ile elde edilen açısal frekans değerleri kullanılarak denklem (3.14.)’ten hesaplanan yöne bağlı elastisite modülleri Tablo 4.14.’de sunulmuştur. Hesaplanan bu değerler referans [40, 45]’deki elastisite modülleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde; hesaplanan E_1 elastisite modüllerinin, referans [40] ve [45]’deki ve E-cam/Epoksi için sunulan (E_1) elastisite modülü ile son derece uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. E_2 elastisite modüllerinin ise, referans [45]’deki E-cam/Epoksi için sunulan (E_2) elastisite modülü ile son derece uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar kompozit malzemelerin elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin tahribatsız yöntemlerle hızlı şekilde yapılabileceğini göstermektedir. Daha sonraki yapılacak çalışmalarda açık kesitli kirişler için deneysel çalışmalar eşliğinde boyutsuz frekans parametreleri üzerine ve fiber açıları sadece $[0^\circ]_4$ ve sadece $[90^\circ]_4$ olmayan örneğin $[0^\circ/45^\circ]_s$ vb. gibi olan kompozitler içinde analitik çözümler geliştirilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Jones, R. M., Mechanics of composite materials, İçinde: Introduction to composite materials, 2. Baskı, CRC Press-Taylor & Francis Group, New York, 1-53.
- [2] Michopoulos, J. G., Furukawa, T., A continuum approach for identifying elastic moduli of composites. Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures, 1341-1342, 2006.
- [3] Morgül, Ö. K., Dal, H., Bilge, H., Determining The Modulus of Elasticity in Sandwich Beams by Experimental Modal Analysis. 4th International Conference On Computationaland Experimental Science And Engineering (ICCESEN-2017), (Özetbildiri), 2017
- [4] Banaerjee, J. R., Frequency equation and mode shape formulae for composite Timoshenko beams. Compos. Struct., 51(4), 381-388, 2001.
- [5] Dugush, Y. A., Eisenberger, M., Vibrations of non-uniform continuous beams under moving loads. J. Sound Vib., 254(5), 911-926, 2002.
- [6] Gillich, G.-R., Praisach, Z. I., Modal identification and damage detection in beam-like structures using the power spectrum and time frequency analysis. Signal Processing, 96(A), 29-44, 2014.
- [7] Morassi, A., Vestroni, F., Dynamic methods for damage detection in structures, CISM International Centre for Mechanical Sciences, 2008.
- [8] Georgiades, F., Warminski, J., Cartmell, M. P., Linear modal analysis of l-shaped beam structures – parametric studies. J. Phys.: Conf. Ser., 382, 012006, 2012.
- [9] Shuklaa, A., Harshab, S. P., An experimental and FEM modal analysis of cracked and normal steam turbine blade. Materials Today: Proceedings, 2, 2056–2063, 2015.
- [10] Gürsoy, H. 2011. Kompozit malzemelerin mekanik ve modal özelliklerinin titreşim analiziyle belirlenmesi. Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.

- [11] Demirci, İ. 2010. E-Cam/epoksi örgülü kompozit plakaların analitik ve deneysel titreşim analizi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- [12] Yılmaz, A. 2018. Çatlaklı eğri kompozit kirişlerin titreşim davranışlarının deneysel ve sayısal analizleri. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- [13] Araújo, A. L., Mota Soares, C. M., Moreira de Freitas, M. J., Pedersen, P., Herskovits, J., Combined numerical-experimental model for the identification of mechanical properties of laminated structures. *Compos. Struct.*, 50, 363-372, 2000.
- [14] Guan, C., Zhang, H., Wang, X., Miao, H., Zhou, L., Liu, F., Experimental and theoretical modal analysis of full-sized wood composite panels supported on four nodes. *Materials*, 10(6), 683, 2017.
- [15] Latalski, J., Kowalczyk, M., Experimental vs. analytical modal analysis of a composite circumferentially asymmetric stiffness box beam. *AIP Conference Proceedings*, 1922, 100018, 2018.
- [16] Georgiades, F., Latalski, J., Warminski, J., Equations of motion of rotating composite beam with a nonconstant rotation speed and an arbitrary preset angle. *Meccanica*, 49, 1833-1858, 2014.
- [17] Latalski, J., Warminski, J., Rega, G., Bending–twisting vibrations of a rotating hub–thin-walled composite beam system. *Math. and Mech. of Solids*, 22(6), 1303-1325, 2017.
- [18] Günay, M. G., Tımarcı, T. 2012. Free vibration of composite box-beams by Ansys. *International Scientific Conference, Gabrovo*.
- [19] Vo, T. P., Lee, J., Free vibration of thin-walled composite box beams. *Compos. Struct.*, 84(1), 11-20, 2008.
- [20] Lee, J., Kim, S.-E., Free vibration of thin-walled composite beams with I-shaped cross-sections. *Compos. Struct.*, 55, 205-215, 2002.
- [21] Wekezer, J. W., Vibrational analysis of thin-walled bars with open cross sections. *J. Struct. Eng.*, 115(12), 2965-2978, 1989.
- [22] Lee, C. R., Kam, T. Y., Sun, S. J., Free-vibration analysis and material constants identification of laminated composite sandwich plates. *J. Eng. Mech.*, 133(8), 874-886, 2007.
- [23] Daoui, A., Zerizer, A., Identification of elasticity modulus by vibratory analysis (Application to a natural composite: Aleppo pine wood). *MATEC Web of Conferences*, 149(10), 01045, 2018.

- [24] Sharma, P., Gupta, A., Jain, A. K., Rastogi, V., Dynamic modelling and validation of continuous beam with free-free boundary conditions. IARJSET, 4(3), 47-53, 2017.
- [25] Li, J., Shen, R., Hua, H., Jin, X., Coupled bending and torsional vibration of axially loaded thin-walled Timoshenko beams. Int. J. Mech. Sci., 46, 299-320, 2004.
- [26] Bercin, A. N., Tanaka, M., Coupled flexural–torsional vibrations of timoshenko beams. J. Sound Vib., 207(1), 47-59, 1997.
- [27] Klausbruckner, M. J., Pryputniewicz, R. J., Theoretical and experimental study of coupled vibrations of channel beams. J. Sound Vib., 183(2), 239-252, 1995.
- [28] Dennis, S. T., Jones, K. W., Flexural-torsional vibration of a tapered C-section beam. J. Sound Vib., 393, 401-414, 2017.
- [29] Yaman, Y., Vibrations of open-section channels: a coupled flexural and torsional wave analysis. J. Sound Vib., 204(1), 131-158, 1997.
- [30] Vlasov, V. Z. 1961. Thin-walled elastic beams, 2. Baskı, National Science Foundation, Washington, 1-493.
- [31] Timoshenko, S. P., Gere J., M. Theory of elastic stability, 2. Baskı, International student edition, New York, 1-541
- [32] Cheng, F. Y., Dynamics of prismatic and thin-walled member grids. Proc. of Application of Finite Element Methods in Civ. Engrg., ASCE, 339-373, 1969.
- [33] Gupta, A. K., Vibration of tapered beams. J. Struct. Engrg., ASCE, 111(1), 19-36, 1985.
- [34] Gupta, A. K., Frequency-dependent matrices for tapered beams. J. Struct. Engrg., 112(1), 85-103. . (1986).
- [35] Cywinski, Z. 1968. Technical theory of thin walled bars of variable, open, composite cross sections, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdanskiej, Gdansk, Poland, 134(18), 1-91.
- [36] Cywinski, Z., and Kollbrunner, C. F., Neues zu einem paradoxon des drillknickens., Inst. for Engrg. Res., Zurich, Switzerland, (in German). 1982.
- [37] Wekezer, J. W., Free vibrations of thin-walled bars. J. Engrg. Mech., ASCE, 113(10), 1441-1453, 1987.

- [38] Barsoum, R. S., Gallagher, R. H., Finite element analysis of torsional and torsional-flexural stability problems. *Int. J. Numer. Methods Engrg.*, 2, 335- 352, 1970.
- [39] Bažant, Z. P., El Nimeiri, M. Large deflection spatial buckling of thin walled beams and frames. *J. Engrg. Mech. Div., ASCE*, 99(6), 1259-1281, 1973.
- [40] Gibson, R. F., *Principles of composite material mechanics.* , 3. Baskı, CRC Press-Taylor & Francis Group, USA, 1-425.
- [41] Baldan, E. 2018. Otomotiv fan kanadının dinamik karakteristiğinin deneysel ve teorik modal analiz metotları ile incelenmesi. Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- [42] [www.dta.com.tr.](http://www.dta.com.tr), Erişim Tarihi: 26.04.2019.
- [43] Sevim, B. 2010. Kemer barajların dinamik davranışlarının sonlu eleman ve deneysel modal analiz yöntemleriyle belirlenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- [44] Jones R. M., *Mechanics of composite materials.*, 2. Baskı, CRC Press-Taylor & Francis Group, USA, 1-538.
- [45] Pakdil, M., Failure analysis of composite single bolted joints subjected to bolt pretension. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences (IJEMS)*, 16, 79-85, 2009.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Turan Eser, 20.07.1986'da Sivas / Zara'da doğdu. İlk, orta eğitimini Sivas'ta ve lise eğitimini Sakarya'da tamamladı. 2003 yılında Adapazarı Atatürk Lisesi'nden mezun oldu. 2004 yılında başladığı Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2008 yılında tamamlayarak aynı yıl Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. İstanbul B.B. İSBAK A.Ş. ve maden makineleri ve proses teknolojileri endüstrisinde sektöründe öncü özel bir firmada proje yöneticisi olarak görev yaptı. 2016 yılında Sakarya'da 3 girişimci mühendis arkadaşıyla birlikte ISP GROUP Mühendislik San. Tic. Ltd. Şti. firmasını kurdu. Halen bu firmada yönetici olarak görevine devam etmektedir.