

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GRAFEN NANOLEVHA TAKVİYELİ
KOMPOZİT KİRİŞLERİN KARIŞIK SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman GÜNER

NİSAN - 2025

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GRAFEN NANOLEVHA
TAKVİYELİ KOMPOZİT KİRİŞLERİN KARIŞIK SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman GÜNER

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Merve ERMİŞ
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ümit Necmettin ARIBAŞ

Nisan – 2025

“FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GRAFEN NANOLEVHA TAKVİYELİ KOMPOZİT KİRİŞLERİN KARIŞIK SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ” adlı tez çalışması **Osman GÜNER** tarafından hazırlanmış olup aşağıdaki jüri tarafından **OY BİRLİĞİ** ile Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Merve ERMİŞ
Kırklareli Üniversitesi

.....

Eş Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Ümit Necmettin ARIBAŞ
İstanbul Medipol Üniversitesi

.....

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Nihal ERATLI
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Zafer KANBİR
Kırklareli Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 10/04/2025

.....
Doç Dr. H. Hale KARAYER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Kırkırelı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Osman GÜNER
10/04/2025

ÖZET

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GRAFEN NANOLEVHA TAKVİYELİ KOMPOZİT KİRİŞLERİN KARIŞIK SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ

Osman GÜNER

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Merve Ermiş

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ümit Necmettin Arıbaş

Nisan 2025, 60 sayfa

Bu tezin amacı, grafen nano-levha (GNL) ile güçlendirilmiş, kesit yüksekliği boyunca fonksiyonel olarak derecelendirilmiş doğru eksenli kirişlerin serbest titreşim davranışını incelemektir. Polimer yapıda matris malzeme, GNL ile güçlendirilmektedir. GNL'lerin hacim oranının kirişin yüksekliği boyunca değişmesiyle kompozit bir malzeme oluşmaktadır. Matris malzeme içerisinde GNL takviyelerinin geometrisini ve dağılımını dikkate alan Halpin-Tsai mikromekanik modeli kullanılarak etkin elastisite modülü elde edilmiştir. Timoshenko kiriş teorisine dayalı iki düğümlü bir eleman için kesitte çarpılma etkilerinin göz önüne alındığı bir karışık sonlu eleman formülasyonu geliştirilmiştir. Bu formülasyon, her düğümde üç yer değiştirme, üç kesit dönmesi, üç kuvvet, iki eğilme momenti ve bir burulma momenti olmak üzere toplam on iki serbestlik derecesi içermektedir. Kapsamlı bir parametrik çalışma, malzeme dağılım türlerinin, GNL ağırlık oranının ve sınır koşullarının serbest titreşim davranışı üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde araştırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar Yöntemi, Timoshenko Kiriş Teorisi, Grafen Nano-Levha Takviyeli Kompozitler, Enine Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Kirişler, Serbest Titreşim Analizi

ABSTRACT

FREE VIBRATION ANALYSIS OF FUNCTIONALLY GRADED GRAPHENE NANOPATELET-REINFORCED COMPOSITE BEAMS USING MIXED FINITE ELEMENT METHOD

Osman GÜNER

MSc Thesis

Kirklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Merve Ermiş

Co-supervisor: Assist. Prof. Dr. Ümit Necmettin Arıbaş

April 2025, 60 pages

The objective of this thesis is to investigate the free vibration behavior of transversely functionally graded straight beams reinforced with graphene nanoplatelets (GPLs). The matrix material is a polymer, forming a composite with GPLs, where the volume fraction of the reinforcement varies along the beam's thickness. The effective elasticity modulus is determined using the Halpin-Tsai micromechanical model, which accounts for the geometry and distribution of GNL reinforcements within the matrix material. A warping-included mixed finite element formulation has been developed for a two-node element based on Timoshenko beam theory. This formulation includes twelve degrees of freedom at each node, comprising three displacements, three section rotations, three forces, two bending moments, and one torsional moment. A comprehensive parametric study explores the effects of material distribution types, GPL weight fraction, and boundary conditions on the free vibration behavior in detail.

Keywords: Finite Element Method, Timoshenko Beam Theory, Graphene Nanoplatelet-Reinforced Composites, Transversely Functionally Graded Beams, Free Vibration Analysis

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerini paylaşarak beni yönlendiren, büyük özveriyle destek veren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Merve ERMİŞ' e katkıları ve destekleri için içten teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım. Kendisinin büyük desteği ve değerli katkıları bu çalışmanın motivasyonunu oluşturmuştur. Bunun yanı sıra, çalışmam boyunca değerli katkıları ve rehberliğiyle bana yol gösteren eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ümit Necmettin ARIBAŞ' a da teşekkürlerimi en derin şekilde ifade ederim. Tez çalışmam süresince bana göstermiş olduğu sabrından ve verdiği desteklerinden dolayı eşim Begüm BEŞELMA' ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ	3
2.1. Kompozit Malzemeler	3
2.2. Matris Malzemesinin Türüne Göre Kompozit Malzemeler	6
2.2.1. Metal matrisli kompozit malzemeler	6
2.2.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler	7
2.2.3. Polimer matrisli kompozit malzemeler.....	9
2.3. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemeler.....	10
2.3.1. Elyaf (Fiber) takviyeli kompozit malzemeler	10
2.3.2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler	11
2.3.3. Tabakalı kompozit malzemeler.....	12
2.3.4. Karma (Hibrit) kompozit malzemeler.....	13
2.4. Nanoteknoloji	13
2.4.1. Nanokarbonlar	15
2.4.2. Grafen ve özellikleri	16
2.4.3. Grafen üretim yöntemleri.....	18
2.4.4. Grafen takviyeli nanokompozitler	20
2.4.5. Grafen nanolevha takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kırımlar	22
3. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON.....	27
3.1. FD-GNL Takviyeli Doğru Eksenli Kırımların Etkin Malzeme Özellikleri	27
3.2. Bünye Bağlantıları.....	29
3.3. Alan Denklemleri	31
3.4. Fonksiyonel	31

3.5. Karışık Sonlu Eleman Formülasyonu.....	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
4.1. FD-GNL Takviyeli Kirişin Doğal Frekanslarına GNL Dağılım Tipi, Ağırlık Oranı ve Sınır Koşullarının Etkisi	33
4.2. GNL Takviyeli Kirişin Sönümlü Serbest Titreşim Davranışı: Rayleigh Sönüm Modeli ile Sayısal Bir İnceleme	46
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ	51



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2. 1. Bazı metallerin ve metal kompozitlerin özellikleri (Kaw, 2005).....	6
Çizelge 2. 2. Mühendislik seramiklerinin sınıflandırılması (Akbulut, 2009).....	8
Çizelge 2.3. Termosetlerin ve termoplastiklerin temel özelliklerinin karşılaştırılması (Paksoy, 2008).....	9
Çizelge 2. 4. Bazı elyaf takviyelerin özelliklerinin karşılaştırılması (Ceylan, 2005).....	11
Çizelge 2. 5. Karbon allotroplarının fiziksel özellikleri (Doğan, 2014).....	17
Çizelge 2.6. Yukarıdan aşağıya grafen üretim yöntemleri (Orellana, Hermosilla, E., Pucci, Hermosilla, R., 2024; Park ve Ruoff, 2009; Wang ve diğerleri 2023).....	19
Çizelge 2.7. Aşağıdan yukarıya grafen üretim yöntemleri (Orellana, Hermosilla, E., Pucci, Hermosilla, R., 2024; Park ve Ruoff, 2009; Wang ve diğerleri 2023).....	20
Çizelge 4.1. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin birinci doğal frekans değerleri (Hz).....	36
Çizelge 4.2. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin ikinci doğal frekans değerleri (Hz).....	36
Çizelge 4.3. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin üçüncü doğal frekans değerleri (Hz).....	37
Çizelge 4.4. Ankastre-sabit sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin birinci doğal frekans değerleri (Hz).....	37
Çizelge 4.5. Ankastre-sabit sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin ikinci doğal frekans değerleri (Hz).....	38
Çizelge 4.6. Ankastre-sabit sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin üçüncü doğal frekans değerleri (Hz).....	38
Çizelge 4.7. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin birinci doğal frekans değerleri (Hz).....	39
Çizelge 4.8. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin ikinci doğal frekans değerleri (Hz).....	39
Çizelge 4.9. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin üçüncü doğal frekans değerleri (Hz).....	40
Çizelge 4.10. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip kirişin hesaplanan sönümlü serbest titreşim frekans değerleri ve Rayleigh sönüm katsayıları ($L/h=20$, $W_{GNL}=\%0,1$)	46

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 3. 1. Farklı dağılım modellerine sahip fonksiyonel derecelendirilmiş grafen nanolevha (FD-GNL) takviyeli kompozit kirişin kesit görünümü:	28
(a) UD, (b) FD-O, (c) FD-X ve (d) FD-A.	28
Şekil 4. 1. FD-GNL takviyeli doğru eksenli kiriş geometrisi ve sınır koşulları (a) ankastre-ankastre sınır koşulu (b) ankastre-sabit sınır koşulu (c) ankastre-serbest sınır koşulu ..	33
Şekil 4.2. Dağılım türlerine göre kesit yüksekliği boyunca efektif elastisite modülünün değişimi ($W_{GNL} = \%0,1$).....	34
Şekil 4.3. Uniform GNL dağılımına sahip GNLTk kirişin farklı sınır koşulları altındaki düzlem dışı ilk üç doğal frekansına ait mod şekilleri ($L/h = 20$, $W_{GNL} = \%0,1$)	35
Şekil 4.4. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTk kirişlerde GNL ağırlık oranının (W_{GNL}) birinci doğal frekans üzerindeki etkisi	42
Şekil 4.5. Ankastre-sabit sınır koşuluna sahip FD-GNLTk kirişlerde GNL ağırlık oranının (W_{GNL}) birinci doğal frekans üzerindeki etkisi	43
Şekil 4.6. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip FD-GNLTk kirişlerde GNL ağırlık oranının (W_{GNL}) birinci doğal frekans üzerindeki etkisi	43
Şekil 4.7. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTk kirişlerde GNL dağılım tipinin birinci doğal frekans üzerindeki etkisi ($\beta_{D.T.} = f_{D.T=i} / f_{D.T=0}$).....	44
Şekil 4.8. Ankastre-sabit sınır koşuluna sahip FD-GNLTk kirişlerde dağılım tipinin birinci doğal frekans üzerindeki etkisi.....	44
Şekil 4.9. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip FD-GNLTk kirişlerde dağılım tipinin birinci doğal frekans üzerindeki etkisi.....	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Kesit alanı
B	Şekil fonksiyonlarının kısmi türevlerine ait vektör
C	Kompliyans matrisine ait alt matris
d	Sonlu eleman ağı koordinat vektörü
E	Elastisite modülü
E	Elastisite matrisi
f	Frekans
F	Kuvvet vektörü
G	Sonlu eleman ağına ait kayma modülü matrisi
h	Kalınlık
Hz	Hertz
I	Eylemsizlik momenti vektörü
k	Tabaka numarası
l	Uzunluk
M	Moment vektörü
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N_L	Kesitteki toplam tabaka sayısı
nm	Nanometre
q	Yayıllı kuvvet
S/cm	Siemens/santimetre
TPa	Terapaskal

u	Yer değiştirme vektörü
V	Toplam hacim oranı
w	Geniřlik
W	Toplam ağırlık oranı
α	Kütle ile orantılı Rayleigh sönüm katsayısı
β	Rijitlik ile orantılı Rayleigh sönüm katsayısı
γ	Kayma şekil deęiřtirmesi
ε	şekil değiştirme tensörü
μm	Mikrometre
ξ	Boyutsuz koordinat
ζ	Sönüm oranı
ρ	Yoğunluk
σ	Gerilme tensörü
ν	Poisson oranı
$\hat{\psi}$	Düğüm noktalarında çarpılma büyüklüklerini içeren vektör
ω	Açısal frekans
Ω	Kesit dönmeleri

Kısaltmalar

Açıklamalar

DKY	Diferansiyel kuadratür yöntemi
D.T.	Dağılım Tipi
EFD	Eksenel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş
FD-GNL	Fonksiyonel derecelendirilmiş grafen nanolevha
FDM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
GNL	Grafen Nanolevha
GNLTK	Grafen Nanolevha Takviyeli Kompozit
KBB	Kimyasal Buhar Biriktirme
KNT	Karbon Nanotüp
KNTTK	Karbon Nanotüp Takviyeli Kompozit
SEY	Sonlu Eleman Yöntemi
UD	Uniform Dağılım

1. GİRİŞ

Günümüzde malzeme bilimi ve mühendislik alanlarında, üstün mekanik, termal ve elektriksel özelliklere sahip yeni nesil malzemelerin geliştirilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bu bağlamda, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), yapısal gereksinimleri karşılayacak şekilde belirli bir yönde özelliklerin kontrollü olarak değiştirilebildiği yapıları sayesinde yüksek performans sunmakta ve bu özellikleriyle öne çıkmaktadır.

Grafen, olağanüstü mekanik mukavemeti, yüksek elektriksel iletkenliği, düşük yoğunluğu ve nanometrik yapısı sayesinde, kompozit malzemelerde önemli bir takviye elemanı olarak öne çıkmaktadır. Bu üstün özellikleri nedeniyle, FDM yapılarında grafenin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Grafen katkısının, FDM'lerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirme potansiyeli, bu malzemelerin mühendislik uygulamalarındaki performansını artırmaktadır.

Bu çalışmada, polimer yapıda matrise sahip, grafen nano-levha (GNL) ile güçlendirilmiş, kesit yüksekliği boyunca fonksiyonel olarak derecelendirilmiş doğru eksenli kirişlerin serbest titreşim davranışları doğal frekanslar üzerinden incelenmiştir. Grafen katkısının serbest titreşim üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması, ileri yapısal malzeme tasarımı açısından önemli bir araştırma konusudur.

Bu tez, giriş, literatür bilgisi, matematiksel formülasyon, bulgular ve tartışma, sonuç ve öneriler olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, çalışmanın amacı, kapsamı ve önemi vurgulanmaktadır. İkinci bölümde, kompozit malzemeler, grafen takviyeli nanokompozit yapılar ve ilgili literatür kapsamlı olarak ele alınmıştır. Üçüncü bölümde, fonksiyonel derecelendirilmiş grafen nanolevha (FD-GNL) takviyeli doğru eksenli kirişlerin matematiksel formülasyonu ayrıntılı olarak açıklanarak karışık sonlu eleman formülasyonu sunulmuştur. Dördüncü bölümde, polimer yapıda matrise sahip, grafen nano-levha (GNL) ile güçlendirilmiş, kesit yüksekliği boyunca fonksiyonel olarak derecelendirilmiş doğru eksenli kirişlerin serbest titreşim davranışları doğal frekanslar üzerinden incelenmiştir. Bu bölümde, yapılan sayısal analizler ve elde edilen bulgular kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır. Bu kapsamda, GNL dağılım tipi, ağırlık oranı ve sınır

koşullarının doğal frekanslar üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, Rayleigh sönüm modeli kullanılarak GNL takviyeli kirişin sönümlü serbest titreşim davranışı değerlendirilmiştir. Son bölümde ise elde edilen bulguların yorumlanması ve ileri araştırmalara yönelik öneriler sunulmuştur. Bu bağlamda, elde edilen sonuçların ileri malzeme tasarımı, yapı güvenliği ve dinamik analiz çalışmalarına katkı sağlaması beklenmektedir.



2. LİTERATÜR BİLGİSİ

Bu bölümde, kompozit malzemelerin sınıflandırılması, matris ve takviye elemanlarının yapısal özellikleri, nanoteknoloji ile güçlendirilmiş malzemeler ve grafen takviyeli nanokompozitler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. İlk olarak, matris malzemesinin türüne göre kompozit malzemeler (Bölüm 2.1) incelenmiş ve metal matrisli (Bölüm 2.2.1), seramik matrisli (Bölüm 2.2.2) ve polimer matrisli (Bölüm 2.2.3) kompozitlerin temel özellikleri değerlendirilmiştir. Ardından, takviye elemanlarına göre kompozit malzemeler (Bölüm 2.3) ele alınarak elyaf (Bölüm 2.3.1), parçacık (Bölüm 2.3.2), tabakalı (Bölüm 2.3.3) ve karma (Bölüm 2.3.4) kompozit sistemlerinin yapısal avantajları ve kullanım alanları karşılaştırılmıştır. Bölüm 2.4'te, nanoteknoloji alanındaki gelişmeler incelenmiş, nano karbon yapıları (Bölüm 2.4.1) ve özellikle grafenin üstün özellikleri (Bölüm 2.4.2) detaylandırılmıştır. Ayrıca, grafen üretim yöntemleri (Bölüm 2.4.3) açıklanarak, farklı üretim tekniklerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Grafen takviyeli nanokompozitler (Bölüm 2.4.4) üzerine yapılan araştırmalar analiz edilerek, bu malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal performansları ele alınmıştır. Son olarak, grafen nanolevha takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kirişler (Bölüm 2.4.5) üzerine yapılan güncel çalışmalar incelenmiş ve literatürde mevcut bilgi birikimi sistematik bir şekilde özetlenmiştir.

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, farklı bileşenlerin belirli koşullar altında bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve istenen fiziksel veya mekanik özellikleri sağlamak amacıyla tasarlanan malzemelerdir. Tek bir saf malzeme, çoğu zaman tüm gerekli özellikleri karşılayamadığından, iki veya daha fazla malzemenin kombinasyonu ile üstün performans sunan kompozit yapılar elde edilir. Kompozit malzemelerin homojen özellik göstermesi, malzemenin mekanik ve fiziksel performansı açısından kritik bir faktördür. Homojenlik, bileşenlerin matris içinde dengeli dağılmasıyla sağlanır. Ancak üretim süreçlerinden kaynaklanan topaklanma, boşluk oluşumu veya düzensiz lif dağılımı gibi kusurlar, kompozitin genel performansını olumsuz etkileyebilir. Bu tür kusurlar, malzemenin beklenen mekanik dayanımını düşürebilir ve yük taşıma kapasitesini

zayıflatılabilir. İzotropik malzemeler mekanik, termal ve fiziksel özellikleri tüm yönlerde aynı olan malzemelerdir. Bu malzemelerde elastisite modülü, ısı genleşme katsayısı, ısı iletkenlik gibi özellikler, uygulanan kuvvet veya yükleme yönünden bağımsızdır. İzotropik malzemelerde gerilme ve şekil değiştirme ilişkisi tüm eksenlerde aynı olduğundan, mühendislik hesaplamalarında daha öngörülebilir ve basitleştirilmiş modellerle analiz edilebilirler. İzotropik malzemeler, doğal olarak homojen yapıya sahip olabileceği gibi, kompozit malzeme tasarım süreçleriyle homojenleştirilmiş şekilde üretilir. Doğada doğal olarak izotropik davranış sergileyen bazı malzemeler şunlardır: metaller, cam ve kuvars ve bazı amorf silikat malzemeler atom düzenleri nedeniyle izotropik davranış gösterebilir. Kompozit malzemeler genellikle anizotropik özellik gösterse de belirli üretim yöntemleri ve takviye düzenlemeleri ile izotropik hale getirilebilir. Anizotropik malzemeler, mekanik ve fiziksel özellikleri uygulanan yükleme yönüne bağlı olarak değişen malzemelerdir. Yani, belirli bir doğrultuda yüksek mukavemet gösterirken, başka bir doğrultuda daha zayıf olabilirler. Kompozit malzemeler, lif takviyeli polimerler, doğal malzemeler (ahşap, kemik vb.) ve yönlendirilmiş kristal yapılar anizotropik özellikler sergiler. Örneğin, karbon fiber takviyeli polimerlerde, liflerin doğrultusundaki mukavemet yüksek iken, liflere dik doğrultuda mukavemet önemli ölçüde düşüktür.

Kompozit malzemeler oldukça geniş bir yelpazeye sahip olup, belirli koşullar altında ve spesifik amaçlara yönelik olarak bir araya getirilerek, her bileşenin özelliklerini tek bir yapı içerisinde optimize etmeyi amaçlar. Monolitik, tek parça halinde üretilen metal, plastik veya seramik malzemeler, ileri teknoloji gerektiren uygulamalarda her zaman yeterli performansı sağlayamayabilir. Yüksek mekanik, ergonomik ve fonksiyonel gereksinimlerin karşılanması için genellikle kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Kompozitler, üretim sürecinde yüksek maliyetli olabilse de aynı özellikleri sağlamak amacıyla kullanılan monolitik malzemeler; boyut, ağırlık, birleştirme zorlukları ve yapısal kararlılık açısından genellikle dezavantajlıdır veya uygulanabilir olmayan tasarımlara neden olur. Özellikle havacılık ve yüksek performans gerektiren otomotiv sektörlerinde, ağırlığı azaltırken sertlik ve mukavemeti korumak temel bir hedef olmuştur. Ancak bu hedef, geleneksel malzemelerle etkin bir şekilde sağlanamamaktadır. Bunun yanı sıra, darbe emme kapasitesi, termal iletkenlik, korozyon direnci, eksenel yük altında stabilite, elastik ve elastoplastik davranış gibi çok sayıda yapısal ve işlevsel özellik, aynı parça, araç, ekipman veya makine içinde kompozit malzemeler kullanılarak

optimize edilebilir (Kaw, 2005). Bu malzemeler, birbiriyle uyumlu ancak farklı mekanik özelliklere sahip bileşenlerden oluşur. Kompozit malzemelerde, bileşenlerden biri sürekli fazı oluşturan, nispeten daha zayıf ve daha düşük sertlikte olan matris olarak adlandırılır. Diğer bileşen veya bileşenler ise daha az miktarda bulunan, süreksiz yapıda olup takviye elemanı olarak görev yapar. Matris fazı, takviye elemanlarını bir arada tutmanın yanı sıra, yükü bu elemanlara etkin bir şekilde iletme fonksiyonunu da üstlenir (Gay, Hoa, Tsai, 2002). Kompozit malzemenin özellikleri, temel olarak matris ve takviye malzemelerinin bireysel özelliklerine, takviye malzemesinin dağılım şekline, yönelimine, yoğunluğuna ve iki malzemenin ara yüzeylerindeki kusurların varlığına veya kusursuzluğuna bağlıdır. Takviye bileşeni, sürekli veya süreksiz lifler, farklı geometrilere sahip parçacıklar halinde düzenli ya da düzensiz şekilde dağılmış olabilir. Bu faktörler, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirleyerek, izotropik veya anizotropik davranış sergilemesine neden olur. Bu bağlamda, malzemelerin birleştirilme sürecinin belirli koşullar altında ve özel yöntemlerle gerçekleştirildiği açıktır. Lifler ile matris arasındaki bağ, kompozit malzemenin üretim aşamasında oluşturulur ve bu bağın kalitesi, kompozitin mekanik performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir (Gay ve diğerleri, 2002)

Kompozitler, takviye malzemesinin geometrik şekline veya matris malzemesinin türüne göre sınıflandırılır. Genel olarak kompozit malzemelerde matris sünek, hafif ve düşük dayanımlı; takviye ise rijit, yüksek dayanım ve sertliğe sahiptir. Matris malzemesi olarak metal, seramik ve polimer, takviye elemanı olarak karbon, cam, elyaf, grafit ve seramik partiküller kullanılmaktadır (Demircioğlu, 2006).

- Takviye malzemesinin geometrisine göre
 - Elyaf (Fiber) takviyeli kompozitler
 - Parçacık (Partikül) takviyeli kompozitler
 - Tabakalı kompozitler
 - Karma (Hibrit) kompozitler
- Matris malzemesinin türüne göre
 - Metal matrisli kompozitler
 - Seramik matrisli kompozitler
 - Polimer matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, rijitlik ve dayanım açısından polimer matrislere göre daha üstün mekanik özelliklere sahiptir. Seramik matrisli kompozitlerle karşılaştırıldığında ise

sürtünme direnci, tokluk ve aşınma direnci açısından daha avantajlıdır. Öte yandan, seramik matrisli kompozitler yüksek sıcaklıklara karşı metal matrisli kompozitlere göre daha dayanıklıdır, ancak gevrek davranış sergilemeleri nedeniyle mekanik darbelere karşı daha zayıftır.

2.2. Matris Malzemesinin Türüne Göre Kompozit Malzemeler

2.2.1. Metal matrisli kompozit malzemeler

Metal matrisli kompozitler, metal ve alaşımlarından oluşan bir matris içinde dağıtılmış takviye malzemelerinden meydana gelir. Takviye malzemeleri genellikle seramik elyaflar, karbon elyaflar veya bazı polimerlerden oluşabilir. Bu kompozitler, sürekli ve süreksiz takviye elemanları içerebilir ve monolitik malzemelerle elde edilemeyen üstün mekanik özellikler sunar. Malzeme türüne bağlı olarak, bu özellikler yüksek elastisite modülü, yüksek dayanım ve rijitlik, iyi sönümleme kapasitesi, yüksek aşınma direnci ve düşük ısı genleşme katsayısı gibi avantajları içerebilir (Ekerer, 2007). Çizelge 2.1.' de bazı alüminyum kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ile çelik ve alüminyumun mekanik özellikleri verilmiştir. Bu verilere göre, SiC takviyeli alüminyum kompozitin çekme dayanımı çeliğe kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksekken, özgül ağırlığının çeliğin üçte biri kadar düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 2. 1. Bazı metallerin ve metal kompozitlerin özellikleri (Kaw, 2005)

Özellik	Birim	SiC / Alüminyum	Grafit / Alüminyum	Çelik	Alüminyum
Özgül Ağırlık	g/cm ³	2,6	2,2	7,8	2,6
Young Modülü	GPa	117,2	124,1	207	68,95
Maksimum Çekme Dayanımı	MPa	1206	448,2	648	234,4
Termal Genleşme Katsayısı	µm/m/°C	12,4	18	11,7	23

Metal matrisli kompozitler, çelik ve alüminyum gibi geleneksel malzemelere kıyasla çok daha yüksek dayanım ve aşınma direncine sahip malzemeler üretmeye olanak tanır. Ancak, metal matrisler genellikle seramik ve polimer matrislere kıyasla daha maliyetlidir ve yüksek sıcaklıklarda performans açısından dezavantaj oluşturabilir. Bu sorun, yüzey

kaplamaları ile giderilebilmektedir. Yapılan çalışmalar, kompozit malzeme kullanımının, aynı parçanın geleneksel metalik malzemelerle üretilmesine kıyasla, aynı performans seviyesinde %10 ila %50 arasında ağırlık tasarrufu ve %10 ila %20 arasında maliyet düşüşü sağladığını göstermektedir (Gay ve diğerleri, 2002).

2.2.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler

Seramik matrisli kompozitler, yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve kimyasal inertlik gibi üstün özellikler sunan malzemelerdir. Takviye malzemesi olarak seramik elyaflar, nanofiberler ve belirli uygulamalarda karbon nanotüpler gibi yüksek performanslı malzemeler kullanılabilir. Bu takviyeler, seramiklerin kırılgan yapısını iyileştirerek mekanik dayanımını ve darbe direncini artırır (Hvizdoš, Puchý, Duszová, Dusza, 2011). Bu özellikleri sayesinde seramik matrisli kompozitler, ekstrem koşullarda güvenilir bir malzeme seçeneği sunar. 1000°C üzerindeki sıcaklıklar, aşırı oksidatif, korozif ve karbürize ortamlar, yüksek radyasyon seviyeleri ve mekanik strese maruz kalan yapılar, bu tür kompozitlerin kullanım alanları arasında yer almaktadır. Seramik matrisli kompozitlerin temel amacı, seramiklerin yüksek sıcaklık ve korozyon direncinden yararlanırken, aynı zamanda malzemenin tokluğunu artırmaktır. Bu tür kompozitlerde kullanılan elyaf takviyeleri, çatlak ilerlemesini durdurarak veya geciktirerek malzemenin tokluğunu iyileştirir (Çerezci, 2008; Kaya, 2014; Güneş, 2013). Özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan motor parçaları ve termal bariyer kaplamaları gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel seramikler; yapısal, sanatsal ve refrakter olarak üç ana kategoriye ayrılabilir. Geleneksel seramikler, genellikle toz halinde işlenerek fayans, porselen gibi malzemelerin üretiminde kullanılırken, ileri düzey (yapısal) seramikler, kimyasal ve fiziksel işlemlerden geçirilerek teknolojik ve mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Geleneksel seramikler tamamen doğal hammaddelerden (kaolin, kil, kuvars, feldspat gibi) şekillendirilip pişirilerek üretilirken, yapısal seramikler yalnızca sentetik hammaddelerden elde edilir. 20. yüzyılın 1970'li yıllarından itibaren önemli gelişmeler kaydeden yapısal seramikler, özellikle aşırı koşullar altında birçok teknik uygulamada kullanılmakta ve sahip olduğu üstün özellikler sayesinde geleneksel seramiklerin yerini almaktadır. Bu seramik malzemeler aynı zamanda fonksiyonel ve biyo-seramikleri de kapsamaktadır. Yapısal seramikler genellikle 1 µm' den küçük taneciklere sahip, ince taneli, çok kristalli bir yapıyı temsil eder. Yapısında rastgele teknolojik kusurlar ve mikro yapısal heterojenlikler bulunabilir.

Genel olarak, yapısal seramik malzemeler heterojen, çok kristalli ve çok fazlı olarak karakterize edilmektedirler (Jonsta Z., Bolanos, Hrabalova, Jonsta P., 2011).

Seramik matrisin en büyük avantajları, metale kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle hafifliği, yüksek aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda yapısal bütünlüğünü koruyarak performansını sürdürebilmesidir. Ancak, kırılğan yapıları nedeniyle darbe emici özellikleri düşüktür ve ani sıcaklık değişimlerine karşı hasar alma olasılıkları yüksektir. Bu kırılğanlık, seramiklerde çatlak oluştuğunda hızlı bir şekilde yayılmasına ve ani kırılmalara yol açmasına neden olur. Bu nedenle, seramiğin refrakter (yüksek sıcaklığa dayanıklı) özelliklerinden tam anlamıyla yararlanılabilmesi için, kırılğan davranışlarını azaltacak şekilde güçlendirilmesi gerekmektedir (Tobin, 2021). Çizelge 2.2.' de mühendislik seramiklerinin fonksiyonel özellikleri ve uygulama alanları gösterilmiştir.

Çizelge 2. 2. Mühendislik seramiklerinin sınıflandırılması (Akbulut, 2009)

Fonksiyonları	Özellikleri	Uygulama Alanları
Biyolojik/ Kimyasal	Biyolojik uygunluk	Kemik
	Adsorpsiyon	Diş
	Katalizör	Katalizör taşıyıcı
	Korozyona dirençli	Kimyasal ekipmanlar
Mekanik	Yüksek mukavemet	Kesici uçlar
	Aşınma direnci	Aşındırıcılar
	Düşük ısı genleşmesi	Turbine pervaneleri
	Yağlayıcılık	Katı yağlayıcı
Isıl	Refrakterlik	Yüksek sıcaklık endüstri fırınlarında tuğla
	Yalıtım	Elektrot malzemesi
	Isı toplama	Elektronik parçalar için ısı kalkanı
	Isı iletkenlik	
Nükleer	Radyasyon direnci	Nükleer yakıt
	Refrakterlik	Kontrol malzemesi
	Yüksek sıcaklık mukavemeti	Reaktör tuğlaları
Optik	Optik odaklama	Lazer diodları
	Floresans özellik	Isıya dayanıklı geçirgen porselenler
	Geçirgenlik	Optik fiber
Elektrik ve Manyetik	Elektriksel yalıtkanlık	Rezistans ısıtıcı elemanı
	Elektriksel iletkenlik	Varistör
	Piezoelektrik	Sensör
	Dielektrik	Hafıza elemanı

2.2.3. Polimer matrisli kompozit malzemeler

Polimer matrisli kompozitler, polimer bir matris içinde takviye malzemelerinin homojen veya heterojen dağılımıyla oluşur. Polimer matrisli kompozitlerde en yaygın kullanılan takviye malzemeleri cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafıdır. Cam takviyeli polimer kompozitler, yüksek ısı ve korozyon dayanımı, iyi boyutsal kararlılık, kolay işlenebilirlik ve düşük maliyet gibi avantajlarıyla geniş bir uygulama alanına sahiptir. Öte yandan, karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler, yüksek mukavemet-ağırlık oranları nedeniyle profesyonel spor ekipmanlarından denizcilik, otomotiv, savunma ve havacılık sektörlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Ancak, bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda fiziksel ve mekanik özelliklerini koruma konusunda sınırlı performans gösterebilir.

Metallerle karşılaştırıldığında, polimerik kompozitlerin daha yüksek yorulma mukavemetine, daha iyi korozyon direnci ve daha düşük ağırlığa sahip olup birçok avantaja sahiptir (Banakar, Shivananda, Niranjan, 2012).

Polimer matrisler, termoset polimerler ve termoplastik polimerler olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Bu iki polimer türü arasındaki temel fark, ısıtılma işleminden sonraki davranışlarıdır. Çizelge 2.3.'te termosetler ve termoplastikler arasındaki temel farklar gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Termosetlerin ve termoplastiklerin temel özelliklerinin karşılaştırılması (Paksoy, 2008)

TERMOSETLER	TERMOPLASTİKLER
Düşük gerilimlerde kopar.	Yüksek gerilimlerde kopar.
Raf ömrü sürdürür.	Raf ömrü uzundur.
Yapışkandır.	Yapışkan değildir, kullanımı kolaydır.
Kirlenme süresi uzundur.	Process zaman ister.
Üretim sıcaklığı düşüktür.	Üretim sıcaklığı ve viskozitesi yüksektir.
Çözücü direnci çok kötüdür.	Çözücü direnci mükemmeldir.
İş altında bozulur, geri dönüşüm yoktur.	Isıtma ve basınca dayanıklıdır.
Örnek: Epoksi, Melamin, Bakalit, Silikon, Polietiren (PUR)	Örnek: Poliamid (PA), Polikarbonat (PC), Polipropilen (PP), Akrlonitril Butadien Stiren (ABS), Polivinil Klorit (PVC)

Polimer matrisli kompozitler, yoğun ve uzun ömürlü kullanıma uygun malzemelerdir. Bu kompozitlerde, matris ile takviye arasındaki güçlü bağ, dış yüklerin matristen liflere arayüzdeki kesme kuvveti yoluyla iletilmesini sağlar (Abramovich, 2017; Callister ve

diğerleri, 2007). Özellikle, fiber takviyeler zayıf matris içerisinde dağıldığında (örneğin, karbon epoksi kompozitlerdeki gibi), yük taşıma kapasitesinin büyük bir kısmını, hatta neredeyse tamamını üstlenirler. Kompozitin dayanımını ve sertliğini belirleyen temel bileşen liflerdir (Evirgen, 2023).

Termoplastik polimerler, belirli sıcaklıklarda eritilip şekillendirilebilir ve bu işlem tekrar edilebilir. Soğuma hızına bağlı olarak kristal, yarı kristal ve amorf yapı oluşturabilirler. Geri dönüştürülebilir olmaları ve sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlamaları nedeniyle plastik endüstrisinde büyük öneme sahiptirler. Plastik enjeksiyon veya plastik ekstrüzyon makineleri kullanılarak seri üretimde istenilen şekle kolayca getirilebilirler. Termoset polimerler ise ısıya karşı daha dayanıklı olup erimezler; ancak yüksek sıcaklıklarda yapısal bozunmaya uğrarlar. Bu nedenle, termoplastiklerin aksine geri dönüştürülemezler. Bununla birlikte, termoplastiklere kıyasla daha yüksek ısıl direnç gösterirler. Bazı termoplastik reçinelere polipropilen, polifenilen sülfon, poliamid, polietereterketon örnek verilebilirken, bazı termoset reçineler arasında poliesterler, fenolikler, melaminler, silikonlar, poliüretanlar, epoksiler yer alır (Gay ve diğerleri, 2002).

2.3. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemeler

2.3.1. Elyaf (Fiber) takviyeli kompozit malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler, uzun elyaf formundaki takviye malzemelerinin bir matris malzemesi içine yerleştirmesiyle oluşturulur. Bu kompozitler, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, yüksek rijitlik ve düşük termal genleşme gibi avantajlar sunar. Elyaf takviyeli kompozitlerde, takviye malzemesinin homojen dağılımı, izotropik yapı elde etmek açısından kritik bir faktördür.

Sürekli veya uzun elyaflar belirli bir yönde hizalandığında, kompozit malzeme elyafların yönüne paralel olarak yüksek mukavemet (özellikle çekme gerilmelerine karşı) gösterirken, elyaflara dik yönde daha düşük mukavemet sergiler. Bu tür kompozitler, genellikle yapısal uygulamalarda, spor ekipmanlarında ve denizcilik endüstrisinde yaygın olarak kullanılır.

Elyaf takviyeli kompozitler, kompozit malzemeler arasında en yaygın tercih edilenlerdir. Takviye malzemesi olarak, aramid, bor, silikon karbür (SiC), cam, alüminyum oksit

(Al_2O_3) ve karbon gibi malzemeler kullanılır. Çizelge 2.4.'te elyaf takviye olarak kullanılan bazı malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 4. Bazı elyaf takviyelerin özelliklerinin karşılaştırılması (Ceylan, 2005)

Takviye Fazı	Avantajları	Dezavantajlar
Cam fiber	Yüksek mukavemet Düşük maliyet	Düşük sertlik Kısa yorulma ömrü Yüksek sıcaklıklara dayanıksızlık
Aramid (Kevlar)	Yüksek çekme mukavemeti Düşük yoğunluk	Düşük basınç dayanımı Yüksek oranda nem emme
Boren	Yüksek sertlik Yüksek basınç dayanımı	Yüksek maliyet
Karbon	Yüksek dayanıklılık Yüksek sertlik	Yüksek maliyet
Grafit	Aşırı yüksek sertlik	Düşük dayanım Yüksek maliyet
Seramik (Silisyum)	Yüksek sertlik	Düşük dayanım
Karbür	Yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygunluk	Yüksek maliyet

2.3.2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Parçacık takviyeli kompozitler, mikro ve nano ölçekli parçacıkların bir matris içinde homojen olarak dağılmasıyla oluşturulan kompozit malzemelerdir. Takviye malzemesinin geometrisi küresel, kübik veya pul şeklinde olabilir ve bir kompozit içerisinde birden fazla türde parçacık takviyesi bulunabilir.

Takviye malzemesinin şekli, yüzey özellikleri ve boyutları kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Genellikle mikroskobik ölçekte homojen dağılmış takviye malzemeleri içerdiğinden, bu kompozitler izotropik davranış gösterir. Bu özellikleri sayesinde yüksek dayanıklılık, daha yüksek çalışma sıcaklığı ve oksidasyon direnci gibi avantajlar sunar.

Parçacıklar genellikle seramik, metal veya polimer malzemelerden oluşur. Parçacıklı kompozitler sürtünme direnci, aşınma dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Polimer matrisli kompozitlerde yaygın olarak uygulanan yöntem, metal parçacıklarının polimer matrise takviye edilmesidir. Bu sayede, az miktarda kullanılan metal takviye malzemesinin sertliği ve dayanımı, büyük oranda kullanılan, ucuz, kolay bulunabilir ve işlenebilir polimer matrisin yapısına kazandırılmış olur. Kompozit malzemenin özelliklerini belirleyen temel faktörler arasında, parçacık boyutları, hacim oranları, parçacıklar arası mesafe, matris içerisindeki dağılım homojenliği, çözünürlükleri ve ısıl kararlılıkları yer almaktadır (Kaya, 2014). Bu üstünlüklerinin yanı sıra, değiştirilebilir mikroyapı, üstün mekanik özellikler ve düşük yoğunluk değerleri sayesinde kompozit malzemeler daha da önemli hale gelmiştir.

Kompozit üretimi sırasında kullanılan partiküllerin boyutları ve hacim oranları, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Dağılımla sertleştirilmiş alaşımlarda, ikinci fazın varlığı dislokasyon hareketlerini engelleyerek malzemenin mukavemetini artırmaktadır. Ancak, hacim oranı %3-5 arasında olan ve angström boyutundaki partiküller, gerilme taşıma kapasitesine sahip değildir (Çavuşoğlu, 2013).

Matris malzemesi içerisine partikül takviyesinin homojen bir şekilde uygulanması nispeten daha kolaydır. Bu durum, kompozit malzemelerin üretim maliyetlerini düşürerek ekonomik bir avantaj sağlamaktadır.

2.3.3. Tabakalı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozitler, aynı veya farklı malzemelerden oluşan tabakaların belirli bir düzen içinde bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerdir. Her bir tabaka, farklı bir matris malzemesi ve çeşitli takviye elemanları içerebilir. Bu tür kompozitler, özellikle yüksek yapısal mukavemet, rijitlik ve darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Kompozit malzemelerde matris ve takviye malzemesi arasındaki yüzey bağı, malzemenin tüm mekanik ve fiziksel özelliklerini belirleyen kritik bir faktördür. Tabakalı kompozitlerde ise bu etkiye ek olarak, tabakalar arası bağlayıcı fazın kalitesi de malzemenin genel performansını doğrudan etkilemektedir. Örneğin, karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler, yüksek mukavemet ve hafiflik özelliklerinden dolayı, yüksek performanslı spor araçlarında, savunma sanayi araç ve ekipmanlarında ve zırh sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.3.4. Karma (Hibrit) kompozit malzemeler

Karma kompozitler, birden fazla takviye malzemesinin belirli bir düzen içinde bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerdir. Bu tür kompozitler, farklı takviye malzemelerinin avantajlarını birleştirerek daha yüksek performans ve özelleştirilmiş çözümler sunabilir. Örneğin, karbon elyaf ile cam elyafın bir araya getirilmesiyle oluşturulan karbon-cam hibrit kompozitler, yüksek mukavemet sağlarken aynı zamanda maliyetleri düşürebilir (Tüzemen, 2023).

2.4. Nanoteknoloji

Nano terimi, genellikle teknik ölçü birimleriyle birlikte kullanılan bir kavram olup, bir birimin milyarda birini ifade eder.

En genel tanımıyla nanoteknoloji, maddenin nano boyutlara indirgenmesi ve bu ölçekte yapılan işlemler olarak anlaşılabılır. 100 nanometreden küçük ölçekte gerçekleştirilen maddesel işlemler, nanoteknolojik çalışmalar olarak adlandırılır (Menceloğlu, Kırca, 2008; Ersöz ve diğerleri, 2018)

Nanoteknolojinin temelleri, 1965 Nobel Fizik Ödülü sahibi Richard Feynman'ın 1959 yılında verdiği "There's Plenty of Room at the Bottom" başlıklı konferansında, maddenin atomik seviyede incelenip işlenebileceğini ve bu işlemin atom ölçeğinde ölçme ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesiyle mümkün olabileceğini belirtmesiyle atılmıştır (Hulla, Sahu, Hayes, 2015).

Terim olarak "nanoteknoloji" ise ilk kez 1974 yılında Norio Taniguchi tarafından "On the Basic Concept of Nanotechnology" adlı makalede kullanılmıştır (Bayda, Adeel, Tuccinardi, Cordani, Rizzolio, 2019).

Çok küçük tane boyutları nedeniyle nanokristalli malzemeler, geleneksel iri taneli polikristalli malzemelerle karşılaştırıldığında ve genellikle daha farklı ve önemli ölçüde iyileştirilmiş özellikler gösterirler. Bu özellikler arasında artmış mukavemet ve sertlik, düşük yoğunluk, daha yüksek elektrik direnci, artan özgül ısı, daha yüksek ısısal genleşme katsayısı, daha düşük termal iletkenlik ve üstün nitelikli yumuşak manyetik özellikler yer almaktadır (Suryanarayana, Koch, 1999).

Nanomalzemeler, sıfır boyutlu, tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu olmak üzere dört gruba ayrılır (Kayan,2021; Tiwari ve diğerleri, 2012; Vollath, 2008). Tek boyutlu

nanomalzemeler, yalnızca bir boyutu 100 nm'den küçük olan malzemeleri kapsar. Nanoteller ve nanoçubuklar, kimyasal ve biyolojik sensörlerin yanı sıra optik cihazların üretiminde kullanılan bu gruba örnek olarak verilebilir. İki boyutlu nanomalzemeler, iki boyutu 100 nm'den küçük olan malzemelerdir. Üç boyutlu nanomalzemeler ise, tüm boyutları 100 nm'den küçük olan malzemeleri içerir. Bu gruba karbon nanotüpler ve trombositler örnek verilebilir (Ansari, Shahzadi, Ahmed, 2020).

2004 yılında iki boyutlu (2B) grafen levhalar üzerinde yapılan kayda değer ilerleme, bu malzemelerin 2B nanomalzemeler kategorisinde önemli bir rol üstlenmesine yol açmıştır. Araştırmacılar Andre Geim ve Konstantin Novoselov, bal peteği şeklinde düzenlenmiş tek bir karbon atomu katmanının olağanüstü elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olduğunu göstermiştir (Novoselov ve diğerleri, 2005).

Farklı otoriteler tarafından önerilen veya kullanılan çeşitli tanımlar olduğundan, nanomalzemeleri evrensel bir yapısal sınıflandırmaya tabi tutmak zordur. Ancak genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Organik Nanopartiküller
- İnorganik Nanopartiküller.
- Metal Nanopartiküller.
- Metal Oksit Nanopartiküller
- Seramik Nanopartiküller
- Biyolojik Nanopartiküller (Roy, M., Roy, A., Rustagi, Pandey, 2023).

Nanoteknoloji, günümüz dünyasında hızla gelişen ve her geçen gün yeni kullanım alanları bulan vazgeçilmez bir teknoloji haline gelmiştir.

Sensör devreleri, nano boyuttaki çipler, depolama aygıtları, yapay zekâ ve makine öğrenmesi, robot ve dronlar, bulut depolama teknolojisi, otomotiv sektörü, yenilenebilir enerji sistemleri, 3B baskı, tekstil, inşaat mühendisliği, güneş enerjisi teknolojileri, çevre uygulamaları, tıp, taşımacılık, tarım ve gıda işleme gibi modern endüstriler, nanoteknolojiye dayalı sistemlerden faydalanmaktadır (Malik, Muhammad, Waheed, 2023). Nano malzemelerin yaygın kullanım alanlarından biri de boya teknolojisidir. Nanoteknoloji sayesinde boyalar, çizilmeye karşı daha dayanıklı, uzun ömürlü, su itici ve dış etkenlere karşı daha dirençli hâle getirilmektedir (Toros, 2011).

2.4.1. Nanokarbonlar

Karbon, yerkabuğunda en bol bulunan on beşinci elementtir ve hidrojen, helyum ve oksijenden sonra evrende kütlece en bol miktarda bulunan dördüncü elementtir. Günlük hayatta tüm yaşam formlarında bulunan karbon, insan vücudunda oksijenden sonra kütlece en fazla bulunan (~%18,5) ikinci elementtir. Doğal karbon, birçok sentetik karbon malzemenin üretiminde temel hammadde olarak kullanılır. Çeşitli kömürler, katı haldeki hidrokarbonlar (petrol, zift, katran, asfalt), gaz haldeki hidrokarbonlar (örneğin metan) bu malzemelere örnek olarak verilebilir. Dünya’da yalnızca iki karbon formu mineral olarak bulunur: Grafit ve elmas (Li, 2018). Yüksek basınç altında karbon, daha yoğun bir allotropu olan elmasa dönüşür. Elmasın yoğunluğu, grafitin yoğunluğunun yaklaşık iki katıdır. Elmas, silisyum (Si) ve germanyum (Ge) ile aynı kübik kristal yapıya sahiptir. Karbon atomları tetrahedral (sp^3) bağlanarak elmasın izotropik bir yapıya sahip olmasını sağlar. Grafit, karbonun en kararlı allotropudur ve tabakalı bir yapıya sahiptir. Her bir tabakada karbon atomları 0,142 nm’lik hekzagonal örgü içinde düzenlenmiş olup, tabakalar arası mesafe 0,33 nm’dir. Tabaka içindeki karbon atomları arası bağlar sp^2 hibritleşmesiyle oluşan güçlü kovalent bağlardır, ancak tabakalar arasındaki bağlar Van der Waals etkileşimleri nedeniyle oldukça zayıftır. Grafitteki tek tabakalı hekzagonal örgüye sahip karbon atomları “grafen” olarak adlandırılır. Karbon allotropoları arasında grafit, düşük yoğunluğu ve ekonomik olması nedeniyle uzun yıllardır kurşun kalemlerin ana malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yüksek elektriksel ve termal iletkenlik gösteren grafitin iletkenliği, yapısal özelliklerine bağlıdır. Tek kristal grafit, zayıf metallerin iletkenliğiyle benzer şekilde, $4-6 \times 10^{-5}$ ohm değerinde bir elektriksel direnç sahiptir. Ancak polikristal grafit, kristal sınırları nedeniyle daha yüksek elektriksel direnç gösterir. Grafit, her katmanı altıgen örgü şeklinde düzenlenmiş çok katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu benzersiz özellikleri nedeniyle grafit, karbon fırçalarında, ısıya dayanıklı malzemelerde, yağlayıcılarda, sürtünme malzemelerinde ve çinko-karbon ile lityum iyon pillerinde katot malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Fullerenler ve karbon nanotüpler ise grafitin türevleridir (Şaşmaz, 2015).

Katı halde bulunan grafit, düşük sertliğe sahip ve kaygan bir maddedir. Yağ haline getirildiğinde, makinelerde birbirine temas eden ve göreceli hareket eden parçalar arasındaki sürtünmeyi azaltarak güç kaybını ve aşınmayı engellemek için yağlayıcı olarak kullanılır (Öztop, 2017).

Nanoteknoloji, kavramsal olarak elli yıllık bir geçmişe sahip olsa da, karbon tabanlı nanomalzemeler –fullerenler, nanotüpler ve grafen gibi malzemeler- 1990’lı yılların başlarında keşfedilmiştir. Karbon tabanlı malzemelerin üstün kimyasal ve fiziksel özellikleri ile modifiye edilebilme kabiliyeti, yeni karbon bazlı malzemelerin üretilmesini ve mevcut olanların geliştirilmesini hızlandırmaktadır.

Karbon atomu, dış yörüngesinde dört elektrona sahip olması nedeniyle çok sayıda allotrop oluşturabilir. Bu dört elektron, karbonun başka dört atomla bağlanabilmesine olanak tanır. Sıfır boyutlu fullerenler 1985 yılında Kroto, Smalley ve Curl tarafından keşfedilmiştir (Nimibofa, 2018). 1991 yılında Sumio Iijima tarafından bir boyutlu nanotüpler, 2004 yılında Konstantin Novoselov ve Andre Geim tarafından 2 boyutlu grafen keşfedilmiştir (Pennachio, 2023; Verma, Jujjavarapu, Mahapatra, Mutra, 2023).

Nanokarbonlar, birçok uygulama için hala geliştirilmeye devam etmektedir. Nanokompozitler, mikroelektrik cihazlar, sensörler, enerji depolama sistemleri, mikroelektronik ve biyotıp gibi hassas alanlarda kullanılmaktadır. Ancak nanokarbonların endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği açısından en büyük zorluk, bu malzemelerin stabilizasyonunu sağlamaktır (Alhamadani, 2018).

2.4.2. Grafen ve özellikleri

Grafen, sahip olduğu yapısal özellikler ve küçük miktarlarda başka malzemelerin (matris) bünyesine katıldığında kazandırdığı fiziksel ve kimyasal özellikler nedeniyle son derece ilgi çekici bir malzemedir. Grafen, büyük özgül yüzey alanına sahiptir ($2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) (Zhu ve diğerleri, 2014; Stoller ve diğerleri, 2008; Drieschner ve diğerleri, 2016; Zhang, Wang, Liu, Bao, 2019; Li ve diğerleri, 2015; Karaman, C., Bayram, Karaman, O., Aktaş, 2020). Ayrıca, yüksek mekanik sertlik elastisite modülüne ($\sim 1 \text{ TPa}$) (Young ve diğerleri, 2018; Tan ve diğerleri, 2013; Rodrigo ve diğerleri, 2024), yüksek termal iletkenlik 5000 W/(mK) ve elektriksel iletkenlik (6000 S/cm) (Mensah ve diğerleri, 2023; Akinyi ve Iroh, 2021; Huskic ve diğerleri, 2024) gibi üstün özelliklere sahiptir. Grafen, karbon atomlarının tek bir düzlemde altıgen örgü yapısında dizilmesiyle oluşan, yalnızca bir atom kalınlığında iki boyutlu karbon allotropudur (Lan ve diğerleri 2018; Liu, Panja, Barkema, 2023; Guilherme, Rogerio, Julia, Jackson, 2024; Selvam ve diğerleri, 2013). Çizelge 2.5. te karbon allotroplarının bazı fiziksel özelliklerine ait değerler gösterilmektedir.

Çizelge 2. 5. Karbon allotroplarının fiziksel özellikleri (Doğan, 2014)

Karbon Allotropları	Boyut	Yüzey alanı (m ² /g ²)	Yoğunluk (g/cm ³)	Termal iletkenlik (W/m ⁻¹ K ⁻¹)	Sertlik	Elektriksel iletkenlik (S/cm ⁻¹)	Esneklik
Grafit	Üç	~10-20	2,09-2,23	1500-2000, 5-10	Yüksek	Anizotropik 2,3.10 ⁴	Elastik olmayan esnek
Elmas	Üç	20-60	3,5-3,53	900-2320	Ultra yüksek	-	-
Fulleren	Sıfır	80-90	1,72	0,4	Yüksek	10 ⁻¹⁰	Elastik
Karbon nanotüp	Bir	~1300	>1	3500	Yüksek	Yapıya bağlı	Elastik esnek
Grafen	İki	~1500	>1	4840-3500	En yüksek	2000	Elastik esnek

Grafen hafifliği (Öztop ve Gürbüz, 2017; Güler ve Yenikaya, 2023), yüksek mekanik mukavemeti (Demirel, 2023), geniş yüzey alanı (Yang, Feng, Müllen, 2011; Ning ve diğerleri, 2011), kimyasal stabilitesi (Zhu ve diğerleri, 2014), yüksek elastik modülü, termal kararlılığı, gaz geçirimsizliği (Chandrasekaran ve diğerleri 2014; Compton ve Nguyen 2010; Yasmin ve Daniel, 2004; Zhu ve diğerleri, 2010) gibi üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde birçok farklı uygulama alanında ilgi görmektedir. Bu üstün niteliklerinden dolayı, grafenin ticari ölçekte etkin biçimde kullanılabilmesi amacıyla yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Ayrıca, grafen ve türevlerinin çevresel sorunlarla mücadelede potansiyel bir çözüm aracı olarak değerlendirilmesi yönünde de kapsamlı çalışmalar sürdürülmektedir.

Yakın gelecekte bilimsel ve teknolojik gelişmelerin öncüsü olması beklenen grafenin; otomotiv ve havacılık endüstrisi, elektrik-elektronik sektörü, robotik sistemler, enerji depolama teknolojileri, fotovoltaiik hücreler, telekomünikasyon, biyokimya ve tıp gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanımı öngörülmektedir (Santos, T., Souza., Santos, E., Carvalho, Nascimento, 2025; Al Faruque, Syduzzaman, Sarkar, Bilisik, Naebe, 2021; Baruah ve diğerleri, 2024). Yeniden şarj edilebilir pillere benzer biçimde enerji depolayan ve neredeyse sınırsız bir çevrim ömrüne sahip olan süper kapasitörler, grafenin gelecek vadeden başlıca uygulama alanlarından biridir. Günümüzde, boyutlandırma sınırlarına yaklaşan silisyum tabanlı elektronik teknolojisinin yerini, tek atom kalınlığındaki grafen yapılarının alabileceği ve bu malzemenin nano elektronik sistemlerde alternatif bir çözüm sunabileceği değerlendirilmektedir. Karbon esaslı bir malzeme olan grafenin, insan vücudu ile biyouyumluluğu ve iyonik sıvılar içinde yapısal bütünlüğünü koruyabilmesi sayesinde; biyonik kulak, biyonik göz gibi ileri düzey biyomedikal implantların geliştirilmesinde de kullanılabileceği öngörülmektedir. Bunlara ek olarak, grafenin

mekanik ve fiziksel özelliklerinden faydalanılarak kompozit malzeme üretiminde katkı malzemesi olarak kullanımı da önemli bir araştırma ve uygulama alanı oluşturmaktadır. 2004 yılında sentezlenmeye başlanan grafen, 2008 yılından itibaren metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Al (Alüminyum), Ti (Titanyum) ve Mg (Magnezyum) gibi matris malzemelerine yapılan grafen takviyesinin mekanik özellikleri önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu doğrultuda yakın gelecekte otomotiv, havacılık ve uzay sektörlerinde kullanılabilecek yeni nesil kompozitlerin üretilmesi mümkün olacaktır (Şenel ve diğerleri, 2015).

Grafenin elastisite modülü, çeliğin yaklaşık 100 katıdır. Grafen, elmaştan sert olmasına rağmen kolayca esneyebilerek değişik formlardaki birçok malzemenin yüzeyine kolaylıkla kaplanabilmektedir. Saydam bir yapı gösteren grafen tabakasının, iyi bir elektrik iletkeni olmasının yanı sıra, yüksek ısı iletkenliğine de sahiptir. Ayrıca, doğal yağlayıcılık özelliği sayesinde aşınma katsayısını düşürerek aşınma dayanımını artırır. Tüm bu üstün özellikleri sayesinde grafen, birçok alanda devrim niteliğinde değişimlere yol açabilecek potansiyele sahip bir malzemedir (Şenel ve diğerleri, 2015).

2.4.3. Grafen üretim yöntemleri

Grafenin maliyet ve kalite açısından verimli üretimi, ticari uygulamalar için büyük önem taşımaktadır. Teknik olarak grafen farklı yöntemlerle üretilebilse de bu yöntemlerin çoğu büyük ölçekli üretim için uygun değildir. Grafit ve türevlerinden, grafen veya modifiye grafen türlerini üretmek için avantajları ya da dezavantajları bulunan çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Park ve Ruoff, 2009). Grafen üretim yöntemleri temelde iki kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar, yukarıdan aşağıya sentezleme ve aşağıdan yukarıya sentezlenmedir (Öztürk ve diğerleri, 2024).

Yukarıdan aşağıya grafen sentezlenme yöntemleri arasında en çok araştırılan teknikler şunlardır: mekanik eksfoliyasyon, kimyasal eksfoliyasyon, grafen oksidin kimyasal indirgenmesi ve karbon nanotüplerin silindirik yapısının açılmasıdır (Anwar, Chang, Chen, 2022; Kumar ve diğerleri, 2021; Agrawal, 2024; Farjadian ve diğerleri, 2020; Adetayo, Runsewe, 2019; Öztürk, Özkan, Günkaya, Banar, 2024).

Aşağıdan yukarıya grafen sentezlenme yöntemleri arasında piroliz, epitaksiyel büyütme, kimyasal buhar biriktirme (KBB), plazma sentezi gibi teknikler bulunmaktadır (Öztürk, Özkan, Günkaya, Banar, 2024; Yılmaz, 2020; McLaren, 2021; Dhand, Rhee, Kim, Jung,

2013). Bu yöntemlerin yanı sıra, daha ucuz, kaliteli ve ticari olarak anlamlı grafen üretimi sağlayacak farklı teknikler üzerine araştırmalar devam etmektedir. Ayrıca, günümüzün öncelikli konularından biri olan sürdürülebilirlik çerçevesinde karbon ayak izini azaltmaya, geri dönüşüm ve geri kazanım süreçlerine odaklanan yeni yöntemler geliştirilmektedir. 2024 yılının ortalarında, tam da bu sürdürülebilirlik prensipleri doğrultusunda şekillenen yeni bir grafen üretim yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, 1-2 mm boyutlarında parçalanmış yüksek yoğunluklu polietilen atıkları, flaş joule ısıtma (flaş sinterleme, ani yüksek elektrik akımı uygulama) tekniğiyle hidrojen ve grafene dönüştürülmektedir. Polietilen burada karbon kaynağı olarak kullanılır ve neredeyse tüm katı polietilen türleri bu süreçte değerlendirilebilir. Kaynak malzemedeki karbon içeriği, grafen verimini doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte, flaş grafen üretiminde yalnızca polietilen gibi sentetik karbon kaynakları değil, doğal karbon kaynakları (örneğin kömür) ve karbon içeren her türlü biyokütle atığı da kullanılabilir. Bu durum, yöntemin sürdürülebilirlik açısından büyük bir avantaj sunduğunu göstermektedir (Luong ve diğerleri, 2020; Choi ve diğerleri, 2023). Grafen üretim yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.6. ve Çizelge 2.7. de gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Yukarıdan aşağıya grafen üretim yöntemleri (Orellana, Hermosilla, E., Pucci, Hermosilla, R., 2024; Park ve Ruoff, 2009; Wang ve diğerleri 2023)

		Avantajları	Dezavantajları	Yöntem	Avantajları	Dezavantajları
Yukarıdan aşağıya grafen üretim yöntemleri	Düşük maliyet - Basit üretim süreçleri - Erişilebilir malzemelerle üretim	Düşük kalite Alan homojenliği sorunları Kalınlık kontrol zorluğu		Mekanik eksfoliyasyon	- Basit ve düşük maliyetli bir yöntemdir. - Yüksek kalite grafen elde edilebilir.	- Küçük alanlarda sınırlı üretim. - Homojenlik sorunları.
				Kimyasal eksfoliyasyon	- Büyük ölçekli üretim imkânı. - Uygun maliyetli.	- Düşük kalite grafen üretimi. - Kimyasal maddelere bağımlı.
				Grafen oksidin kimyasal indirgenmesi	- Kolay erişilebilir başlangıç malzemeleri. - Düşük maliyetli.	- Düşük kalite. - İndirgeme sonrası saflık sorunları.
				karbon nanotüpün açılması	- Yüksek yüzey alanı ve yapısal çeşitlilik sunar.	- Karmaşık işlem. - Düşük verimlilik.

Çizelge 2.7. Aşağıdan yukarıya grafen üretim yöntemleri (Orellana, Hermosilla, E., Pucci, Hermosilla, R., 2024; Park ve Ruoff, 2009; Wang ve diğerleri 2023)

Avantajları		Dezavantajları	Yöntem	Avantajları	Dezavantajları
Aşağıdan yukarıya grafen üretim yöntemleri	Yüksek kalite ve saflık - Büyük alanlarda homojen üretim - İnce film üretim yeteneği	Yüksek maliyetli ekipman Karmaşık süreç Yüksek sıcaklık gereksinimi	Piroliz	- Düşük sıcaklıkta işlem yapılabilir. - Yüksek saflıkta grafen üretimi sağlar.	- Düşük verimlilik. - Üretim süresi uzundur.
			Epitaksiyel Büyütme	- Yüksek kaliteli ve homojen grafen tabakaları üretir. - Büyük alanlarda üretim yapma imkânı.	- Karmaşık ve pahalı bir süreçtir. - Yüksek sıcaklık gerektirir.
			KBB (kimyasal buhar biriktirme)	- Yüksek kalite ve büyük alanlarda homojen üretim sağlar. - İnce film üretimi için uygundur.	- Yüksek maliyetli ekipman gerektirir. - Uzun üretim süreleri.
			Plazma sentezi	- Düşük sıcaklıkta üretim yapılabilir. - Hızlı üretim imkânı.	- Düşük verimlilik. - Üretilen grafenin kalitesi değişken olabilir.

KBB yöntemi, geniş yüzey alanına sahip ve yüksek kaliteli grafen üretimi sağlayabilir. Ancak, üretim ekipmanlarının karmaşıklığı ve çalışma koşullarının zorluğu nedeniyle yüksek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Grafen oksit indirgenmesi yöntemi ile üretilen grafen ise kusurlu olup, üretim sürecinde kullanılan bazı maddeler grafenin istenilen özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir (Wang ve diğerleri, 2023).

Elektrokimyasal pul pul dökülme yöntemi, üretimde kimyasal ve mekanik yöntemlere kıyasla daha iyi kontrol edilebilen elektrik gücü kullanmaktadır. Ancak, gerekli elektrokimyasal ekipmanların kurulumu oldukça maliyetlidir (Wang ve diğerleri, 2023). Elektrokimyasal yöntem, çevre dostu bir teknik olmasına rağmen, kimyasal pul pul dökülme yöntemi nispeten daha düşük maliyetlidir ve grafenin ticari ölçekte üretimi için daha uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

2.4.4. Grafen takviyeli nanokompozitler

Kompozit malzemelerde takviye elemanlarının seçimi, hedeflenen mekanik, termal ve bariyer özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılır. Geleneksel takviye malzemeleri

genellikle üretim maliyetlerini düşürmek veya belirli uygulamalara yönelik kompozit özelliklerini optimize etmek için kullanılır (Kaya, 2016).

Grafen takviyeli (grafen dolgulu) nanokompozitlerin özellikleri, grafenin matris malzemesi ile olan uyumluluğuna, matris içindeki dağılımına ve hacim oranına bağlıdır. Üretim yöntemi, grafenin matris içinde nasıl dağıldığını doğrudan etkileyerek, nihai nanokompozitin iç yapısal özelliklerini belirler (Zhang ve diğerleri, 1998; Kumruoğlu, 2019). Takviye malzemelerinin homojen dağılımı, kompozitlerin bariyer özelliklerini ve mekanik dayanımını artırabilir. Etkili bir dağılım, takviye malzemesinin sağlayacağı faydayı maksimum düzeye çıkarır (Unalan, Cerri, Marcuzzo, Cozzolino, Farris 2014; Bousmina 2006; Fu, Sun, Huang, Li ve Hu, 2019; Ray ve Bousmina, 2005). Örneğin, polimer nanokompozitlerin makroskobik özellikleri, polimer ve dolgu fazlarının arayüz uyumluluğuna, dolgu yüzeyi ile polimer zincirleri arasındaki polarite uyumuna ve termodinamik faktörlere bağlıdır. Ayrıca, dolgunun nanoskala seviyesindeki dağılımı ve yayılımı, partikül boyutu, şekli, dağıtım teknikleri ve ekipmanları, karıştırma süresi ve uygulanan kesme kuvveti gibi değişkenlerden etkilenir (Mittal, 2014). Bu nedenle, nanokompozit üretiminde, grafen takviyesinin istenen özellikleri sağlayabilmesi için tüm bu parametreler dikkatle değerlendirilmelidir.

Grafen, üstün mekanik ve elektriksel özellikleri sayesinde nanokompozit malzemelerin performansını önemli ölçüde artıran bir takviye elemanıdır. Yapılan çalışmalar, kompozit malzemelere hacimce yalnızca %0,1-2 oranında grafen eklenmesinin elastisite modülünde %900'e kadar, mukavemetinde ise %100'e kadar artış sağlayabildiğini göstermektedir (Chatterjee ve Chu, 2016). Örneğin, %1 oranında grafen içeren epoksi bazlı nanokompozitler, saf epoksiye kıyasla %33,84' lük bir artış göstererek maksimum gerilme dayanımını yaklaşık 20 MPa seviyesine çıkarmıştır. Buna ek olarak, grafen katkısı nanokompozitin hacimsel direnç değerinde %28,2 ve yüzeyel direnç değerinde %9,7 oranında bir azalma sağlamıştır (Dogan, Altın ve Bedeloğlu, 2021).

Grafenin sunduğu bu üstün özellikler, ona olan akademik ve endüstriyel ilgiyi sürekli artırmaktadır. Espacenet patent araştırma veri tabanı incelendiğinde, “graphene” ve “composite” kelimeleri kullanılarak alınan patent sayılarında belirgin bir artış olduğu görülmektedir. 2011-2017 yılları arasında (7 yıl) yıllık ortalama patent sayısı 5.744 iken, 2018-2024 yılları arasında (7 yıl) bu sayı yaklaşık üç katına çıkarak 16.853'e ulaşmıştır (European Patent Office, 2025). Bu eğilim, grafenin gelecekteki uygulamalar açısından

büyük bir potansiyele sahip olduğunu ve nanokompozit alanında yenilikçi çözümler sunmaya devam edeceğini göstermektedir.

2.4.5. Grafen nanolevha takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kirişler

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM' ler), bileşim ve mekanik özelliklerin kademeli olarak değişim gösterdiği kompozit malzemeler olup, belirli yapısal performans gereksinimlerine uyum sağlayacak şekilde özelleştirilebilmektedir. Geleneksel kompozit malzemeler, farklı malzeme katmanlarının belirgin ara yüzeylere sahip olacak şekilde bir araya getirilmesiyle üretilirken, FDM' lerde bu geçiş süreklidir (Altay, Dördüncü, Kadioğlu, 2023; Dördüncü, Kutlu, Madenci, Rabczuk, 2023; Çömez, Arıbaş, Kutlu, Omurtag, 2022; Madenci, 2021). Bu yapı, delaminasyon problemlerinin ortadan kaldırılması ve ara yüzeylerde gerilme süreksizliklerinin önlenmesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır (Arıbaş, Atalay, Omurtag, 2023; Dördüncü, Apalak, Reddy 2019; Dördüncü, 2020). Modern mühendislikte, dayanıklılığı uyarlanabilirlikle dengeleyen yenilikçi ve ekonomik yapısal çözümler geliştirme gereksinimi her zamankinden daha belirgin hale gelmiştir. Bu gereksinim, malzeme teknolojisindeki ilerlemelerle desteklenmekte olup, karbon veya grafen bazlı malzemeler ile petek yapılar gibi olağanüstü mukavemet özelliklerine sahip yapısal tasarımların ortaya çıkmasına yol açmıştır. Özellikle, grafenden türetilen grafen nanolevhalar (GNL'ler), maliyet açısından verimli bir alternatif sunma potansiyeline sahiptir. GNL bazlı nanokompozitler, bilim ve mühendislik alanlarında hızla gelişen bir araştırma konusu haline gelmiş olup, havacılık, inşaat mühendisliği, biyomedikal sektörler, enerji depolama sistemleri ve elektronik cihazlar gibi geniş bir uygulama yelpazesinde umut vadeden kullanım potansiyeli göstermektedir. Bu bağlamda, fonksiyonel derecelendirilmiş grafen nanolevha takviyeli kompozit (FD-GNLTK) yapılar, gelişmiş mekanik özellikleri ve tasarım esnekliği sayesinde dikkat çeken ve hızla gelişen bir araştırma alanı olmuştur. Literatürde grafen nanolevha (GNL) takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) doğru eksenli kirişler ile ilgili çalışmalar sıralanacak olursa:

Chen, Yang ve Kitipornchai (2017), GNL takviyeli FD gözenekli kirişlerin doğrusal olmayan serbest titreşim ve burkulma sonrası davranışlarını incelemiştir. Çalışmada, kirişin kapalı hücreli metal köpüklerden üretildiği ve iç yapısının düzgün veya düzgün olmayan gözeneklilik dağılımlarıyla karakterize edildiği varsayılmıştır. GNL nano dolgu maddeleri, kirişin kalınlığı boyunca değişen hacim oranlarında metal matris içinde

dağıtılmıştır. Timoshenko kiriş teorisi ve Von Kármán tipi geometrik doğrusal olmayan deformasyonlar dikkate alınarak tabakalı kompozit kirişe ait matematiksel formülasyon elde edilmiştir. Daha sonra, doğrusal olmayan serbest titreşim frekansları ve burkulma sonrası kritik yükler, Ritz yöntemi ve doğrudan iteratif bir algoritma ile hesaplanmıştır. Çalışmada, gözeneklilik ve nano dolgu maddelerinin kompozit kiriş üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Feng, Kitipornchai ve Yang (2017), GNL'lerin kiriş kalınlığı doğrultusunda fonksiyonel olarak değiştiği tabakalı polimer nanokompozit kirişlerin doğrusal olmayan serbest titreşim davranışını incelemiştir. Teorik modellemeler, Hamilton ilkesi, Timoshenko kiriş teorisi ve von Kármán doğrusal olmayan şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkisi üzerinden elde edilmiştir. GNL takviyeli polimer kompozit malzemenin etkin elastisite modülü, GNL' nın geometrisi ve boyutlarının dikkate alınarak geliştirilen Halpin-Tsai mikromekanik modeli ile elde edilmiştir. Kirişin titreşim frekansları ve genlikleri, Ritz yöntemi kullanılarak sayısal olarak hesaplanmıştır. Çalışmada, GNL takviye elemanlarının dağılım modeli, ağırlık oranı, geometri ve boyutu, kirişin tabaka sayısı, titreşim genliği ve sınır koşullarının doğrusal olmayan serbest titreşim davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Wu, Yang ve Kitipornchai (2017), GNL içeriği düşük olan FD tabakalı kompozit (GNLTK) kirişlerin dinamik kararsızlık davranışını, periyodik eksenel kuvvet ve sıcaklık değişiminin birleşik etkisi altında incelemiştir. Çalışmada, her bir GNLTK tabakada GNL ağırlık oranının sabit olduğu, ancak kiriş kalınlığı boyunca tabaka bazında değişim gösterdiği kabul edilmiştir. GNLTK tabakaların etkin elastisite modülü, Halpin-Tsai mikromekanik modeli ile kullanılarak elde edilmiştir. Problemi tarifleyen temel diferansiyel denklemler, diferansiyel kuadratur yöntemi (DKY) kullanılarak Mathieu-Hill denklemlerine dönüştürülmüş ve FD tabakalı GNLTK kirişlerin temel kararsızlık bölgesi, Bolotin yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışmada özellikle, GNL dağılım modeli, ağırlık oranı, geometri ve boyutlarının dinamik kararsızlık davranışı üzerindeki etkilerine odaklanılmıştır.

Barati ve Shahverdi (2020), farklı GNL dağılım tipleriyle takviye edilmiş kompozit bir kirişin termal ortamda zorlanmış titreşim davranışı yüksek mertebeden kayma deformasyon kiriş teorisi kullanılarak geliştirilen sonlu eleman yöntemi ile incelenmiştir. Geliştirilen kiriş elemanı, eksenel, eğilme ve enine kayma yer değiştirmelerine karşılık

gelen on serbestlik derecesine sahiptir. GNLTK kiriş, harmonik salınımlar içeren düzgün yayılı dinamik bir yük uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, GNLTK kirişin rezonans davranışının GNL içeriği ve dağılımı ile kontrol edilebileceğini göstermektedir. Çalışmada, dinamik yer değiştirmenin, GNL ağırlık oranı, dağılım türü, sıcaklık değişimi, elastik zemin etkisi ve uygulanan dinamik yükün uyarım frekansından önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuştur.

Song ve diğerleri (2020), termal ortamda Pasternak tipi elastik bir zemin üzerine oturan, kenar çatlaklı FD-GNLTK tabakalı kirişlerin doğrusal olmayan serbest titreşim davranışını incelemiştir. Çalışmada, geometrik olarak doğrusal olmayan davranış von Kármán teorisi ile birinci mertebe kayma deformasyon kiriş teorisi kullanılarak probleme ait diferansiyel denklemler türetilmiştir. Çatlaklı kesitin rijitliği, dönel yay modeli üzerinden tanımlanmıştır. DKY uygulanarak çatlaklı GNLTK kirişlerin doğrusal olmayan doğal frekansları belirlenmiştir. Çalışmada, çatlak uzunluğu, GNL dağılım tipi ve ağırlık oranı ile sıcaklık değişimi ve zemin parametrelerinin doğrusal olmayan titreşim davranışı üzerindeki etkileri incelenmiş ve tartışılmıştır.

Karamanlı ve Vo (2021), karbon nanotüp takviyeli kompozit (KNTTK) ve grafen nanolevha takviyeli kompozit (GNLTK) kirişlerin eğilme, titreşim ve burkulma analizini incelemiştir. Çalışmada, kirişlerin hareket denklemlerinin türetilmesinde hem normal hem de kayma deformasyon etkileri dikkate alınmıştır. Farklı sınır koşullarına sahip kirişlerin yer değiştirmelerini, kritik burkulma yüklerini ve doğal frekanslarını belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Parametrik analiz kapsamında, takviye malzemelerinin dağılım tipi, KNT hacim oranı, GNL ağırlık oranı, kiriş boy-yükseklik oranı ve sınır koşullarının yapısal davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Liu vd. (2021), eksenel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş grafen takviyeli nanokompozit (EFD-GNLTK) kirişlerin burkulma ve serbest titreşim problemini ele almıştır. Çalışmada, GNL, nano dolgu malzemesi olarak kompozit matris içinde uniform (UD) veya beş farklı eksenel dağılım tipi (EFD-X, EFD-O, EFD-A, EFD-V) ile düzgün olmayan bir şekilde dağıtılmıştır. Etkili malzeme özellikleri, geliştirilmiş Halpin-Tsai mikromekanik modeli ve karışım kuralı kullanılarak tahmin edilmiştir. EFD-GNLTK kirişlerin temel diferansiyel denklemleri, Euler-Bernoulli kiriş teorisi üzerinden elde edilerek türetilmiş ve kritik burkulma yükleri ile doğal frekansların analitik çözümleri elde edilmiştir. Ayrıca, GNL dağılım modeli, ağırlık oranı ve geometrik parametrelerin

burkulma ve serbest titreşim davranışları üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla kapsamlı bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir.

Mojiri ve Salami (2022), termal ortamda elastik bir zemin üzerine yerleştirilmiş, kalınlık doğrultusunda düzgün olmayan şekilde dağıtılmış GNL takviyeli tabakalı polimer kompozit bir kirişin dinamik davranışını incelemiştir. Kirişin titreşim frekansları, Hamilton ilkesi ve Timoshenko kiriş teorisi esas alınarak geliştirilen teorik modelin genelleştirilmiş DKY kullanılarak elde edilmiştir. GNL takviyeli polimer kompozitin etkin elastisite modülü, Halpin-Tsai mikromekanik modeli ile kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada, GNL dağılım modeli, ağırlık oranı, tabaka sayısı, termal ortamın etkisi, kiriş boy-yükseklik oranı, sınır koşulları ve elastik zemin türlerinin dinamik davranışı üzerindeki etkileri ele alınmıştır.

Wu vd. (2022), kısmen akışkan ile temas halinde olan FD-GNLTK kirişlerin serbest titreşim analizini, birinci mertebe kayma deformasyon teorisi çerçevesinde sunmuştur. Çalışmada, GNL'nin üç boyutlu rastgele yönelimi dikkate alınarak, elastisite modülünü hesaplamak için 3B Halpin-Tsai modeli kullanılmıştır. Akışkan hız potansiyeli ve hidrodinamik yükleme, değişken ayırma yöntemi ile belirlenmiştir. Kirişin hareket denklemleri Hamilton ilkesi kullanılarak türetilmiş ve doğal frekanslar, çok alanlı genelleştirilmiş DKY ile iteratif bir şema kullanılarak hesaplanmıştır. Parametrik analizler kapsamında, GNL dağılım modeli, ağırlık oranı ve boyutu, akışkan derinliği ve yoğunluğu, kiriş geometrisi ve sınır koşullarının FD-GNLTK kiriş-akışkan etkileşim sistemi üzerindeki serbest titreşim davranışına etkileri incelenmiştir.

Zhang ve arkadaşları (2022), Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayalı çubuk kuramı sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanarak FD-GNLTK kirişlerin serbest ve zorlanmış titreşim davranışını incelemiştir. Çalışmada, GNL ağırlık oranının kirişin kalınlığı boyunca doğrusal, parabolik veya uniform bir dağılım tipine sahip ve fonksiyonel olarak sürekli değiştiği kabul edilmiştir. FD-GNLTK kirişler için, elastisite modülü, geliştirilen Halpin-Tsai mikromekanik modeli ile hesaplanırken, Poisson oranı ve kütle yoğunluğu, karışım kuralı kullanılarak belirlenmiştir.

Zhang ve arkadaşları (2023), FD kirişlerin statik, dinamik ve burkulma davranışlarını incelemek için çok ölçekli bir sayısal yöntem önermektedir. Çalışmada, iç gözeneklilik ve GNL takviyelerinin enine veya boyuna doğrultuda özelleştirilmesiyle rastgele

derecelendirilmiş FD kirişler oluşturulmuştur. Timoshenko çubuk teorisine dayalı FD-GNLTK ve gözenekli kirişlerin yapısal davranışı SEY kullanılarak elde edilmiştir.

Arıbaş ve diğerleri (2022) tarafından tabakalı kompozit kirişlerin yapısal davranışını analiz etmek amacıyla geliştirilen ve çarpılma etkisini dikkate alan Timoshenko çubuk kuramına dayalı karışık sonlu eleman yöntemi, üç boyutlu sonlu eleman yöntemleriyle karşılaştırıldığında mühendislik hassasiyeti dahilinde oldukça yakın sonuçlar vermektedir (Arıbaş, Ermiş, Kutlu, Eratlı, Omurtag, 2022; Arıbaş, Ermiş, Omurtag, 2021; Arıbaş, Aydın, Atalay, Omurtag, 2023). Bu kesitte çarpılma etkisinin göz önüne alındığı ve Timoshenko çubuk kuramı üzerinden geliştirilen karışık SEY, Ermiş (2024) tarafından FD-GNLTK doğru eksenli ve eğri eksenli kirişlerin dinamik davranışını incelemek için kullanılmıştır.

Ma vd. (2025), GNL takviyeli piezoelektrik kompozit sandviç kirişlerin serbest titreşim davranışını incelemek için yeni bir elektromekanik bağlaşım kiriş modeli geliştirmiştir. Önerilen model, ara yüzeydeki kayma gerilmelerinin sürekliliğini sağlayarak ve elektromekanik bağlaşım etkilerini doğru bir şekilde hesaba katarak mevcut yüksek mertebe kayma deformasyon kiriş teorilerine göre daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir.

Bu çalışma kapsamında, GNL ile güçlendirilmiş kesit yüksekliği boyunca FD doğru eksenli kirişlerin serbest titreşim davranışını Timoshenko kiriş teorisine dayalı ve kesitte çarpılma etkisinin göz önüne alındığı bir karışık SEY kullanarak incelenmiştir. Kapsamlı bir parametrik çalışma, malzeme dağılım türlerinin, GNL ağırlık oranının ve sınır koşullarının serbest titreşim davranışı üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde araştırılarak elde edilen sonuçlar literatüre sunulmuştur.

3. MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

3.1. FD-GNL Takviyeli Doğru Eksenli Kirişin Etkin Malzeme Özellikleri

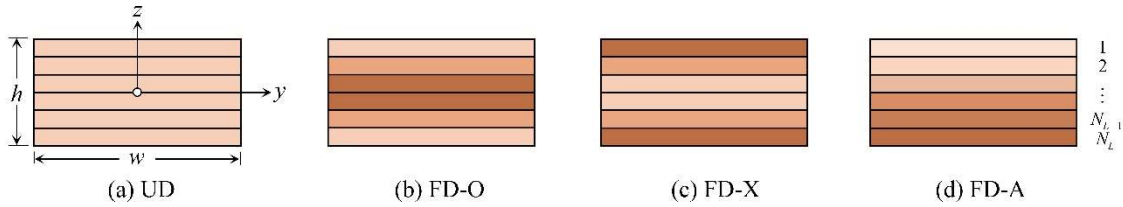
Polimer yapıda matris malzeme ve grafen nanolevha (GNL) malzemesinin belirli hacim oranlarında bir araya gelmesiyle GNL ile güçlendirilmiş nanokompozit malzemeler elde edilmektedir. Şekil 3.1’de sunulan kalınlığı h ve genişliği w dikdörtgen kesite sahip tabakalı grafen nanolevha takviyeli kompozit kiriş eşit kalınlığa sahip N_L adet tabakadan oluşmaktadır. Her bir tabakanın kalınlığı $h_k = h/N_L$ ifadesiyle tanımlanmakta olup $k = 1, 2, \dots, N_L$ şeklinde sıralanmaktadır. Her bir tabakada GNL matris malzeme içerisine uniform olarak dağılmaktadır. Tabakalardaki GNL oranları değişimi ile fonksiyonel derecelendirilmiş GNL takviyeli kompozit kirişler oluşturulmaktadır. Bu tez kapsamında aynı miktardaki GNL malzemesi dört farklı dağılım tipi ele alınmıştır. Bunlar sırasıyla, UD, X, O ve A’dır (Karamanlı ve Vo 2021, Ermiş 2024). Uniform dağılım (UD) tipinde, GNL kesitte homojen dağılmakta olup diğer dağılım tipleri ise kalınlık boyunca değişken olup ve doğrusal olarak değişim göstermektedir. FD-X tipinde, kesitin üst ve alt kısımları GNL açısından zengin iken, FD-O tipinde bunun tersi geçerlidir; bu modelde kesitin orta kısmı GNL açısından zengindir. FD-A tipi, GNL içeriğinin kesitin üstünden altına doğru düzenli bir şekilde arttığını göstermektedir. Her bir katmanda GNL’lerin rastgele ve homojen olarak dağıldığı kabul edilen GNL takviyeli nanokompozit kirişlerin yukarıda sunulan farklı dağılım tipleri için k . ncı tabakadaki her bir tabakanın GNL hacim oranı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \text{UD} & : V_{\text{GNL}}^{(k)} = V_{\text{GNL}}, \\ \text{FD-X} & : V_{\text{GNL}}^{(k)} = 2V_{\text{GNL}} \left(|2k - N_L - 1| / N_L \right), \\ \text{FD-O} & : V_{\text{GNL}}^{(k)} = 2V_{\text{GNL}} \left(1 - |2k - N_L - 1| / N_L \right), \\ \text{FD-A} & : V_{\text{GNL}}^{(k)} = V_{\text{GNL}} \left((2k - 1) / N_L \right), \end{aligned} \quad (1)$$

Burada V_{GNL} , GNL'lerin toplam hacim oranını ifade eder ve aşağıdaki formülasyon ile hesaplanır.

$$V_{\text{GNL}} = \frac{W_{\text{GNL}}}{W_{\text{GNL}} + (\rho_{\text{GNL}}/\rho_{\text{M}})(1 - W_{\text{GNL}})} \quad (2)$$

Burada, ρ_{GNL} ve ρ_{M} sırasıyla GNL ve polimer matrisin yoğunluklarını göstermektedir. W_{GNL} ise GNL'lerin toplam ağırlık oranını ifade etmektedir. Nanokompozit katmanın matris malzemesi içerisinde grafen/grafen türevi malzemelerinin düzgün ve homojen bir şekilde dağılması ancak ağırlık oranının W_{GNL} düşük değerleri için geçerlidir. Bu değer yaklaşık olarak %1~3'ten az olması gerektiği Zhao vd. 2020'de kaynakta detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 3. 1. Farklı dağılım modellerine sahip fonksiyonel derecelendirilmiş grafen nanolevha (FD-GNL) takviyeli kompozit kirişin kesit görünümü: (a) UD, (b) FD-O, (c) FD-X ve (d) FD-A.

Halpin-Tsai mikromekanik modeli, iki fazlı nanokompozitin etkin malzeme özelliklerini tahmin etmek için kullanılmaktadır (Rafiee vd. 2009). Bu mikromekanik model GNL takviye malzemesinin her bir tabakada rastgele yönlenmiş ve polimer matris malzemesi içinde homojen olarak dağılmıştır. İki fazlı nanokompozit malzemesinin bu çok ölçekli malzeme modeli, FD-GNL takviyeli nanokompozitlerin etkin elastisite modülünü yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplar (Yang vd. 2023):

$$E_{\text{eff}}^{(k)} = \frac{3}{8} \frac{1 + \xi_l \eta_l V_{\text{GNL}}^{(k)}}{1 - \eta_l V_{\text{GNL}}^{(k)}} \times E_{\text{M}} + \frac{5}{8} \frac{1 + \xi_w \eta_w V_{\text{GNL}}^{(k)}}{1 - \eta_w V_{\text{GNL}}^{(k)}} \times E_{\text{M}} \quad (3)$$

$$\eta_l = \frac{(E_{\text{GNL}}/E_{\text{M}}) - 1}{(E_{\text{GNL}}/E_{\text{M}}) + \xi_l}, \quad \eta_w = \frac{(E_{\text{GNL}}/E_{\text{M}}) - 1}{(E_{\text{GNL}}/E_{\text{M}}) + \xi_w}$$

Burada, E_{GNL} ve E_{M} sırasıyla GNL ve polimer matrisin elastisite modüllerini ifade etmektedir. Ölçeklendirilmiş ξ ve η parametreleri GNL takviye malzemesinin geometrik özelliklerine bağlıdır. Şöyle ki;

$$\xi_l = 2l_{\text{GNL}}/h_{\text{GNL}}, \xi_w = 2w_{\text{GNL}}/h_{\text{GNL}} \quad (4)$$

Burada l_{GNL} , w_{GNL} , ve h_{GNL} sırasıyla GNL'ların uzunluğunu, genişliğini ve kalınlığını ifade eder. Ayrıca k.n.cı tabakadadaki FD-GNL takviyeli kirişin etkin malzeme yoğunluğu ve Poisson oranı, karışım kuralına göre aşağıda sunulan formülasyon ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} \rho_{\text{eff}}^{(k)} &= \rho_{\text{GNL}} V_{\text{GNL}}^{(k)} + \rho_{\text{M}} (1 - V_{\text{GNL}}^{(k)}) \\ \nu_{\text{eff}}^{(k)} &= \nu_{\text{GNL}} V_{\text{GNL}}^{(k)} + \nu_{\text{M}} (1 - V_{\text{GNL}}^{(k)}) \end{aligned} \quad (5)$$

Burada ν_{GNL} ve ν_{M} sırasıyla GNL ve polimer matrisin Poisson oranlarını ifade etmektedir.

3.2. Bünye Bağlılıları

Genelleştirilmiş Hooke yasasına göre, bir elastik sürekli ortamın gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, üç boyutlu gerilmeler $\boldsymbol{\sigma}$ ve şekil değiştirmeler $\boldsymbol{\varepsilon}$ arasındaki ilişkiyi ifade eden bağıntı $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon}$ olup, burada, $\mathbf{E}$ elastisite matrisidir. Kartezyen koordinatlar x, y ve z olacak şekilde, z eksenini doğrultusundaki bir elastik tabakanın malzeme bağıntıları, klasik çubuk teorisi koşulları $\sigma_y = \sigma_z = \tau_{yz} = 0$ uygulanarak türetilmiştir (Yıldırım 1999).

Burada gerilme vektörü $\boldsymbol{\sigma}_k = \{\sigma_x \quad \tau_{zx} \quad \tau_{xy}\}_k^T$ ve şekil değiştirme vektörü ise $\boldsymbol{\varepsilon}_k = \{\varepsilon_x \quad \gamma_{zx} \quad \gamma_{xy}\}_k^T$ dir. $\boldsymbol{\beta}_k$, 3×3 boyutunda bir elastisite matrisi olup, k ise her bir tabaka numarasını ifade etmektedir. Kesit üzerindeki σ_x ve τ_{zx}, τ_{xy} normal ve kayma gerilmelerini; ε_x ve γ_{zx}, γ_{xy} normal ve kayma şekil değiştirmelerini ifade etmektedir. Timoshenko çubuk kurumunu göre, kiriş kesitindeki herhangi bir noktanın yer değiştirme bileşenleri aşağıdaki gibidir (Yousefi ve Rastgoo 2011):

$$\varepsilon_x = u_{x,x}^* \quad \gamma_{xy} = u_{x,y}^* + u_{y,x}^* = u_{y,x} - z \Omega_{x,x}, \quad \gamma_{zx} = u_{x,z}^* + u_{z,x}^* = u_{z,x} + y \Omega_{x,x} \quad (6)$$

burada $\mathbf{u}(u_x, u_y, u_z)$ yer değiştirme vektörünü, $\boldsymbol{\Omega}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ sırasıyla kiriş eksenini doğrultusundaki kesit dönmelerini ifade etmektedir. Tek bir tabakanın bünye bağıntısı ifadesi kinematik ilişkiler üzerinden aşağıdaki gibi elde edilir (Bhimaraddi ve Chandrashekhara, 2011),

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \beta_k \begin{Bmatrix} u_{x,x} \\ u_{z,x} \\ u_{y,x} \end{Bmatrix} + b \begin{Bmatrix} \Omega_{y,x} \\ 0 \\ -\Omega_{x,x} \end{Bmatrix} + n \begin{Bmatrix} -\Omega_{z,x} \\ \Omega_{x,x} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad , \quad k=1, \dots, N_L \quad (7)$$

Burada, alt indislerdeki virgüller kısmi türeleri ifade eder. N_L , kesitteki toplam tabaka sayısını ifade emektedir. Kesit yüksekliği boyunca her bir tabakadaki gerilmelerin analitik integrallerinin toplanmasıyla düğüm noktalarındaki kuvvet ve momentler aşağıdaki gibi elde edilmektedir (Arıbaş vd. 2019, 2020).

$$\begin{aligned} F_x &= \sum_{k=1}^{N_L} \left[\int_{A_k} (\sigma_x)_k \, dA_k \right] ; \\ F_y &= \sum_{k=1}^{N_L} \left[\int_{A_k} (\tau_{xy})_k \, dA_k \right] ; \\ F_z &= \sum_{k=1}^{N_L} \left[\int_{A_k} (\tau_{zx})_k \, dA_k \right] ; \\ M_x &= \sum_{k=1}^{N_L} \left[-\int_{A_k} z (\tau_{xy})_k \, dA_k + \int_{A_k} y (\tau_{zx})_k \, dA_k \right] ; \\ M_y &= \sum_{k=1}^{N_L} \left[\int_{A_k} z (\sigma_x)_k \, dA_k \right] ; \\ M_z &= \sum_{k=1}^{N_L} \left[-\int_{A_k} y (\sigma_x)_k \, dA_k \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Burada F_x , F_y , F_z , M_x , M_y ve M_z , sırasıyla eksenel kuvvet, iki doğrultudaki kesme kuvvetini, bir burulma momenti ve iki doğrultudaki eğilme momentini ifade eder. A_k , k. tabakanın kesit alanıdır. Dairesel olmayan kompozit kesitlerde çarpılma etkisinin dahil edildiği burulma rijitliği (Jog ve Mokashi, 2014),

$$GI_x = \int_A \mathbf{d} \mathbf{G} (\mathbf{d} - \mathbf{B} \hat{\Psi}) \, dA \quad (9)$$

Burada $\mathbf{d} = \{z \ -y\}^T$ (Arıbaş vd. 2022, 2024), kesit üzerindeki sonlu eleman ağı koordinat vektörünü, $\mathbf{G}$ ilgili sonlu eleman ağına ait kayma modülü matrisini, $\mathbf{B}$ şekil fonksiyonlarının kısmi türevlerine ait vektörü ve $\hat{\Psi}$ ise düğüm noktalarına ait çarpılma büyüklüklerini içeren vektörü ifade etmektedir. (9) numaralı eşitlik yardımıyla elde edilen çarpılmanın dahil edildiği burulma rijitliği, (8) numaralı eşitlikteki burulma rijitliğiyle ilgili terimlerin yerine yazılır ve dairesel olmayan kesite sahip FD kompozit kirişin bünye bağlantıları aşağıdaki yapıda elde edilir:

$$\begin{Bmatrix} u_{x,x} \\ u_{y,x} \\ u_{z,x} \\ \Omega_{x,x} \\ \Omega_{y,x} \\ \Omega_{z,x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_m & \mathbf{C}_{mf} \\ \mathbf{C}_{fm} & \mathbf{C}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Burada, $\mathbf{C}_m$, $\mathbf{C}_{mf}$, $\mathbf{C}_f$ ve $\mathbf{C}_{fm}$ dairesel olmayan kesite sahip FD doğru eksenli kirişin kompiyans matrisine ait alt matrisleri göstermektedir.

3.3. Alan Denklemleri

Timoshenko çubuk kuramına bağlı uzay eğrisel çubukların alan denklemleri (Omurtag ve Aköz 1992), kesit yüksekliği boyunca fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit çubukların alan denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Arıbaş, 2019, 2022),

$$\left. \begin{aligned} -\mathbf{F}_{,x} - \mathbf{q} + \rho_{\text{eff}} A \ddot{\mathbf{u}} &= \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_{,x} - \mathbf{i} \times \mathbf{F} - \mathbf{m} + \rho_{\text{eff}} \mathbf{I} \ddot{\mathbf{\Omega}} &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad \text{Hareket denklemleri} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_{,x} + \mathbf{i} \times \mathbf{\Omega} - \mathbf{C}_m \mathbf{F} - \mathbf{C}_{mf} \mathbf{M} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{\Omega}_{,x} - \mathbf{C}_{fm} \mathbf{F} - \mathbf{C}_f \mathbf{M} &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad \text{Bünye bağıntıları} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} -\mathbf{u} + \hat{\mathbf{u}} &= \mathbf{0}; \quad -\mathbf{\Omega} + \hat{\mathbf{\Omega}} = \mathbf{0} \\ \mathbf{F} - \hat{\mathbf{F}} &= \mathbf{0}; \quad \mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}} = \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad \text{Sınır şartları} \quad (13)$$

$\mathbf{u}(u_x, u_y, u_z)$ yer değiştirme vektörünü, $\mathbf{\Omega}(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ kesit dönmesi vektörünü, $\mathbf{F}(F_x, F_y, F_z)$ kuvvet vektörünü, $\mathbf{M}(M_x, M_y, M_z)$ ise moment vektörünü göstermektedir, ρ_{eff} kompozit kesitin etkin malzeme yoğunluğunu, A kesit alanını, $\mathbf{I}(I_x, I_y, I_z)$ eylemsizlik momenti vektörünü ifade etmektedir. $\mathbf{q}$ ve $\mathbf{m}$ sırasıyla yayılı kuvvet ve moment vektörüdür. $\ddot{\mathbf{u}}$ ve $\ddot{\mathbf{\Omega}}$ ivme terimlerini ifade etmektedir. Şapkalı terimler ise sınırlardaki bilinen değerleri ifade etmektedir.

3.4. Fonksiyonel

Potansiyel operatör ve Gâteaux türevi (Oden ve Reddy, 2012; Doğruoğlu ve Omurtag, 2000) yardımıyla, (11) ve (13) numaralı denklemler kullanılarak FD tabakalı kompozit doğru eksenli kirişlerin zorlanmış titreşime ait fonksiyonel aşağıdaki yapıda elde edilir:

$$\mathbf{I}(\mathbf{y}) = \left. \begin{aligned} & -[\mathbf{u}, \mathbf{F}_{,x}] + [\mathbf{i} \times \mathbf{\Omega}, \mathbf{F}] - [\mathbf{M}_{,x}, \mathbf{\Omega}] - \frac{1}{2}[(\mathbf{C}_m) \mathbf{F}, \mathbf{F}] - \frac{1}{2}[(\mathbf{C}_{mf}) \mathbf{M}, \mathbf{F}] \\ & - \frac{1}{2}[(\mathbf{C}_{fm}) \mathbf{M}, \mathbf{F}] - \frac{1}{2}[(\mathbf{C}_f) \mathbf{M}, \mathbf{M}] + \frac{1}{2} \rho_{\text{eff}} A [\ddot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}] + \frac{1}{2} \rho_{\text{eff}} [\mathbf{I} \ddot{\mathbf{\Omega}}, \ddot{\mathbf{\Omega}}] \\ & - [\mathbf{q}, \mathbf{u}] - [\mathbf{m}, \mathbf{\Omega}] + \left\langle (\mathbf{F} - \hat{\mathbf{F}}), \mathbf{u} \right\rangle_{\sigma} + \left\langle (\mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}}), \mathbf{\Omega} \right\rangle_{\sigma} + \left\langle \mathbf{F}, \hat{\mathbf{u}} \right\rangle_{\varepsilon} + \left\langle \mathbf{M}, \hat{\mathbf{\Omega}} \right\rangle_{\varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Burada köşeli parantezler iç çarpımı, alt indisler ε ve σ sırasıyla geometrik ve dinamik sınır koşullarını ifade etmektedir. Serbest titreşim analizinde harmonik hareket dikkate alındığında, (14) numaralı denklemde yayılı kuvvet ve moment vektörlerinin $\mathbf{q}=\mathbf{m}=\mathbf{0}$ olacağı aşıkardır. İvme terimleri ise $[\ddot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}] = -\omega^2 [\mathbf{u}, \mathbf{u}]$, $[\ddot{\mathbf{\Omega}}, \ddot{\mathbf{\Omega}}] = -\omega^2 [\mathbf{\Omega}, \mathbf{\Omega}]$ formunda yazılır, burada ω ise doğal açısal frekanstır.

3.5. Karışık Sonlu Eleman Formülasyonu

Karışık sonlu eleman formülasyonunun geliştirilmesinde Timoshenko çubuk kuramına bağlı iki düğüm noktalı sonlu eleman formülasyonu üzerinden türetilmiştir. Sonlu eleman formülasyonu boyutsuz koordinat (ξ) üzerinden türetilmiştir. Lineer şekil fonksiyonları $\phi_i = 1 - \xi$ ve $\phi_j = \xi$ olmak üzere burada $\xi = (x - x_i) / \Delta L$, $0 < \xi < 1$ ve $\Delta L = (x_j - x_i)$ 'dir. Alt indisler elemana ait düğüm noktalarını göstermektedir $x_j > x_i$. Doğrusal elemanın her bir düğüm noktasında toplamda on iki adet bilinmeyen vardır. Bu bilinmeyenler, üç adet yer değiştirme, üç adet dönme, bir eksenel kuvvet, iki kesme kuvveti, bir burulma moment ve iki eğilme momentidir. Bunlar sırasıyla,

$$u_x, u_y, u_z, \Omega_x, \Omega_y, \Omega_z, F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z \quad (15)$$

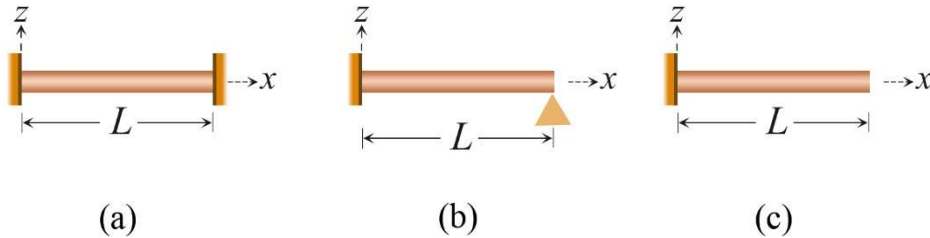
Toplam serbestlik derecesi yirmi dört adettir. Karışık sonlu eleman formülasyonuna ait detaylı bilgi Omurtag ve Aköz (1992) ve Eratlı vd. (2016)'da mevcut olup, FD çubuk ile ilgili detaylı bilgi ise Arıbaş vd. (2024)'te bulunmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, GNL takviyeli kompozit kirişlerin serbest titreşim davranışı çeşitli parametreler altında incelenmiştir. Bölüm 4.1’de, farklı sınır koşulları, GNL dağılım tipleri, GNL ağırlık oranları ve uzunluk/yükseklik oranlarının doğal frekans üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bölüm 4.2’de ise, Rayleigh sönüm modeli kullanılarak farklı sönüm oranlarının titreşim davranışı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

4.1. FD-GNL Takviyeli Kirişin Doğal Frekanslarına GNL Dağılım Tipi, Ağırlık Oranı ve Sınır Koşullarının Etkisi

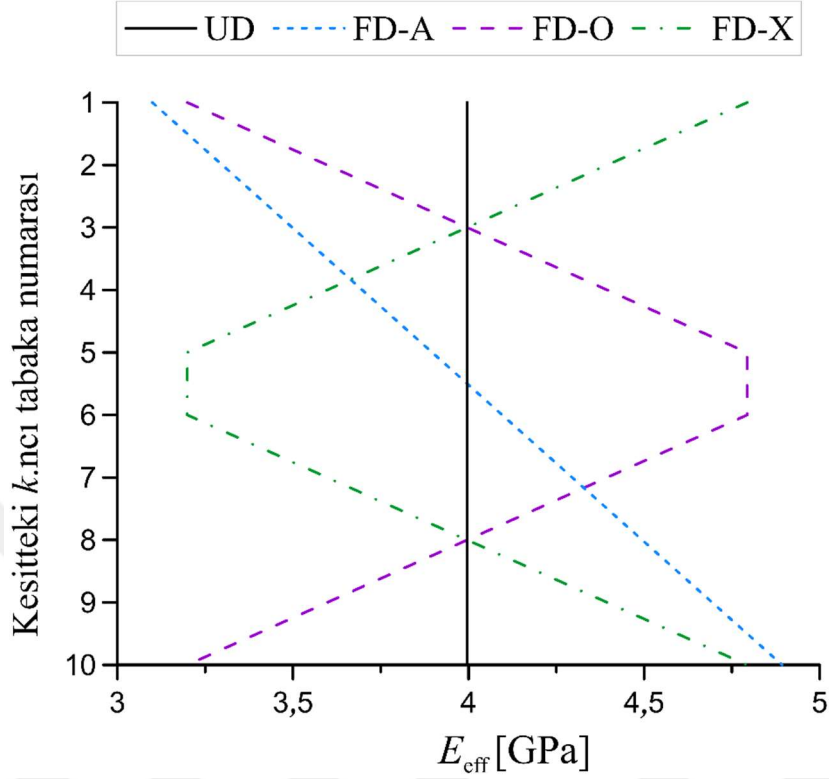
Bu bölümde, Timoshenko kiriş teorisine göre modellenen dikdörtgen kesitli FD-GNLTK kirişin; sınır koşulları, uzunluk/yükseklik oranı (L/h), GNL dağılım tipi ve GNL ağırlık oranı (W_{GNL}) gibi parametrelere bağlı olarak düzlem dışı (x, z) doğal frekanslarındaki değişim, kesitte çarpılma etkisinin gözetildiği karışık SEY kullanılarak incelenmiştir (Şekil 4.1). Sunulan karışık SEY doğruluğu Ermiş 2024’te detaylı olarak sunulduğu için bu çalışma kapsamında parametrik örneklere geçilmiştir. GNL dağılım tipi olarak UD, X, O, A olmak üzere dört farklı konfigürasyon ele alınmıştır. GNL ağırlık oranları ise %0,1, %0,3, %0,5, %1, %2 ve %3 olarak belirlenmiştir. Literatürde, GNL dağılımının homojen kabul edilebilmesi için GNL ağırlık oranının en fazla %3 olabileceği ifade edilmektedir (Zhao vd., 2020). Sınır koşulları olarak ankastre-serbest, ankastre-sabit, ankastre-ankastre olmak üzere üç farklı durum değerlendirilmiştir.



Şekil 4. 1. FD-GNL takviyeli doğru eksenli kiriş geometrisi ve sınır koşulları (a) ankastre-ankastre sınır koşulu (b) ankastre-sabit sınır koşulu (c) ankastre-serbest sınır koşulu

Uzunluk/yükseklik oranları $L/h = 10, 20, 30$ ve 40 seçilmiş olup, $w = h = 0,4$ m ve GNL’ nın malzeme özellikleri $E_{GNL} = 1,01$ TPa, $\nu_{GNL} = 0,186$, $\rho_{GNL} = 1062,5$ kg/m³,

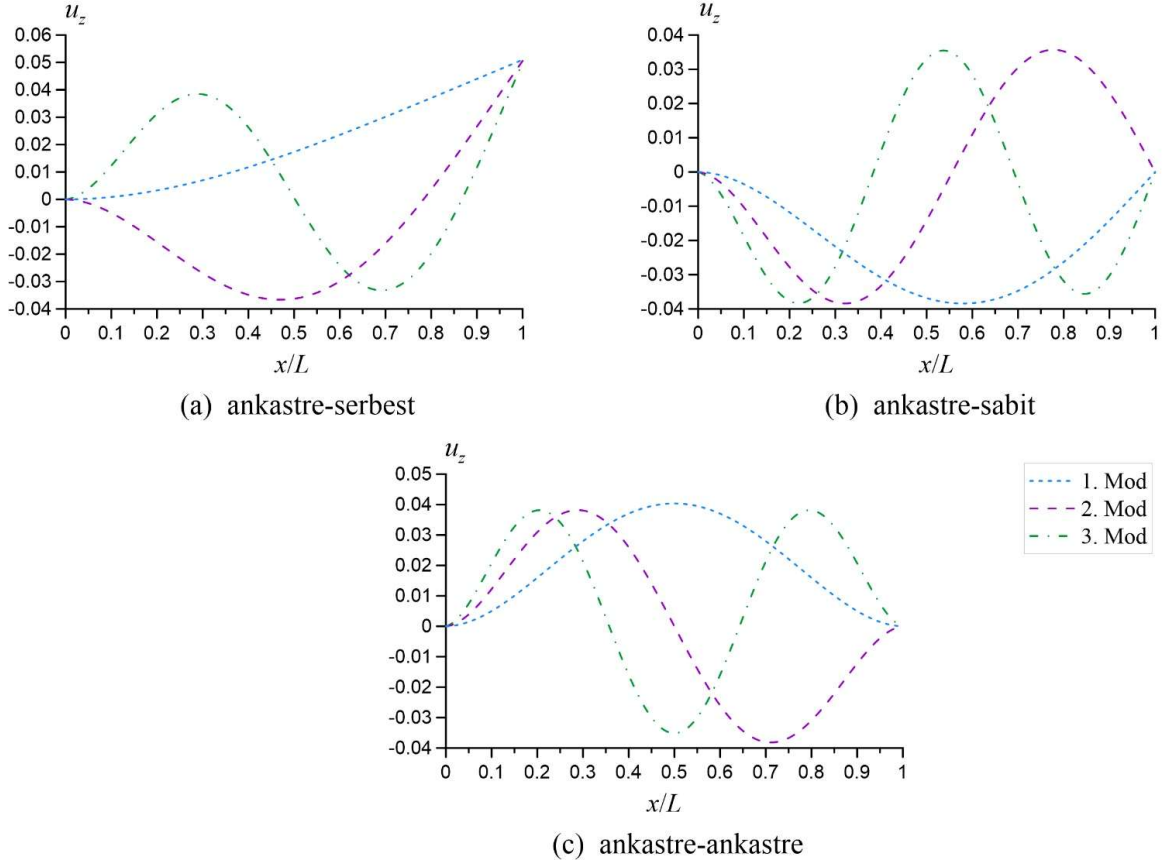
$l_{GNL} = 2,5 \mu m$, $w_{GNL} = 1,5 \mu m$, $h_{GNL} = 1,5 nm$ dir. Matris malzemesinin malzeme özellikleri ise $E_M = 3 GPa$, $\nu_M = 0,34$, $\rho_M = 1200 kg/m^3$ tür.



Şekil 4.2. Dağılım türlerine göre kesit yüksekliği boyunca efektif elastisite modülünün değişimi ($W_{GNL} = \%0,1$)

$W_{GNL} = \%0,1$ ağırlık oranı için farklı dağılım tiplerine (UD, FD-A, FD-O ve FD-X) göre efektif elastisite modülü değerinin kesit yüksekliği boyunca değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Uniform dağılım (UD) tipinde, GNL kesitte homojen dağılmakta olup diğer dağılım tipleri ise kalınlık boyunca değişken olup ve doğrusal olarak değişim göstermektedir. FD-X tipinde, kesitin üst ve alt kısımları GNL açısından zengin iken, FD-O tipinde bunun tersi geçerlidir; bu modelde kesitin orta kısmı GNL açısından zengindir. FD-A tipi, GNL içeriğinin kesitin üstünden altına doğru düzenli bir şekilde arttığını göstermektedir. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişin düzlem dışı ilk üç doğal frekans değeri; farklı uzunluk/yükseklik oranları, GNL dağılım tipleri ve GNL ağırlık oranları için Çizelge 4.1-4.3’te verilmiştir. Ankastre-sabit sınır koşulu için elde edilen düzlem dışı ilk üç frekans değeri Çizelge 4.4 – 4.6 arasında, ankastre-ankastre sınır koşulu için ise Çizelge 4.7–4.9 arasında sunulmaktadır. Ayrıca, uzunluk/yükseklik oranı $L/h = 20$ olan, $\%0,1$ GNL ağırlık oranına ve uniform GNL dağılımına sahip GNLTK

kirişin farklı sınır koşulları altındaki düzlem dışı ilk üç doğal frekansına ait mod şekilleri de örnek olarak Şekil 4.3'te sunulmuştur. Ayrıca, GNL ağırlık oranı, GNL dağılım tipi, uzunluk/yükseklik oranı ve sınır koşullarının etkilerine ilişkin genel bir değerlendirme yapıldıktan sonra, bu parametrelerin doğal frekanslar üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 4.3. Uniform GNL dağılımına sahip GNLTk kirişin farklı sınır koşulları altındaki düzlem dışı ilk üç doğal frekansına ait mod şekilleri ($L/h = 20$, $W_{GNL} = \%0,1$)

Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTk kirişlerin ilk üç doğal frekans değerleri (Çizelge 4.1-4.3) incelendiğinde, GNL ağırlık oranının artışının, her bir dağılım tipi ve L/h oranı için doğal frekans değerlerinde belirgin bir artışa yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu artış malzeme dağılım tiplerine (UD, FD-X, FD-O, FD-A) göre belirgin farklılıklar göstermektedir. Çizelge 4.1-4.3'te her bir GNL ağırlık oranı, L/h oranı ve mod sayısı için en yüksek doğal frekans değeri X tipi dağılımda meydana gelirken en düşük frekans değeri ise O tipi dağılımda meydana gelmektedir. Bu durum, X tipi dağılımda GNL oranının kiriş kesitinin alt ve üst bölgelerde yoğunlaşmasıyla, eğilme rijitliğinin daha etkin bir şekilde artmasıyla açıklanabilir. O dağılımında ise GNL, kesitin orta

kısımlarında yoğunlaşmakta ve bu durumun eğilme rijitliğinin artışında daha az etkili olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.1. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin birinci doğal frekans değerleri (Hz)

L/h	Dağılım türü	W_{GNL}					
		%0,1	%0,3	%0,5	%1	%2	%3
10	UD	7,31	8,95	10,33	13,17	17,53	21,01
	FD-X	7,73	9,95	11,76	15,38	20,83	25,14
	FD-O	6,86	7,81	8,66	10,48	13,41	15,81
	FD-A	7,23	8,58	9,66	11,84	15,23	17,98
20	UD	1,83	2,25	2,59	3,31	4,40	5,28
	FD-X	1,94	2,50	2,96	3,87	5,25	6,33
	FD-O	1,72	1,96	2,17	2,63	3,36	3,96
	FD-A	1,82	2,15	2,42	2,97	3,82	4,51
30	UD	0,81	1,00	1,15	1,47	1,96	2,35
	FD-X	0,86	1,11	1,31	1,72	2,33	2,82
	FD-O	0,76	0,87	0,96	1,17	1,49	1,76
	FD-A	0,80	0,96	1,08	1,32	1,70	2,01
40	UD	0,46	0,56	0,65	0,82	1,10	1,32
	FD-X	0,48	0,62	0,74	0,97	1,31	1,58
	FD-O	0,43	0,49	0,54	0,65	0,84	0,99
	FD-A	0,45	0,54	0,60	0,74	0,95	1,13

Çizelge 4.2. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin ikinci doğal frekans değerleri (Hz)

L/h	Dağılım türü	W_{GNL}					
		%0,1	%0,3	%0,5	%1	%2	%3
10	UD	43,77	53,59	61,87	78,88	104,99	125,84
	FD-X	46,10	59,12	69,74	91,03	123,10	148,49
	FD-O	41,26	47,17	52,39	63,58	81,46	96,09
	FD-A	43,35	51,47	58,00	71,23	91,72	108,32
20	UD	11,38	13,94	16,09	20,51	27,30	32,73
	FD-X	12,03	15,48	18,29	23,92	32,39	39,09
	FD-O	10,69	12,18	13,51	16,36	20,93	24,68
	FD-A	11,27	13,36	15,05	18,46	23,74	28,02
30	UD	5,09	6,24	7,20	9,19	12,23	14,65
	FD-X	5,39	6,94	8,20	10,73	14,54	17,55
	FD-O	4,78	5,45	6,04	7,31	9,35	11,02
	FD-A	5,04	5,98	6,73	8,26	10,62	12,54
40	UD	2,87	3,52	4,06	5,18	6,89	8,26
	FD-X	3,04	3,91	4,63	6,06	8,20	9,90
	FD-O	2,69	3,07	3,40	4,12	5,27	6,21
	FD-A	2,84	3,37	3,79	4,65	5,99	7,07

Çizelge 4.3. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin üçüncü doğal frekans değerleri (Hz)

L/h	Dağılım türü	W_{GNL}					
		%0,1	%0,3	%0,5	%1	%2	%3
10	UD	114,99	140,79	162,56	207,25	275,83	330,64
	FD-X	120,54	153,86	181,08	235,76	318,26	383,68
	FD-O	108,93	125,18	139,40	169,67	217,87	257,24
	FD-A	113,52	135,26	152,65	187,87	242,34	286,41
20	UD	31,29	38,31	44,23	56,39	75,05	89,96
	FD-X	33,02	42,41	50,08	65,43	88,53	106,82
	FD-O	29,44	33,60	37,29	45,20	57,87	68,24
	FD-A	30,98	36,77	41,41	50,83	65,41	77,23
30	UD	14,15	17,33	20,01	25,51	33,95	40,70
	FD-X	14,96	19,25	22,74	29,74	40,26	48,59
	FD-O	13,30	15,15	16,80	20,35	26,03	30,69
	FD-A	14,01	16,62	18,71	22,95	29,53	34,85
40	UD	8,01	9,81	11,33	14,44	19,22	23,04
	FD-X	8,47	10,91	25,04	16,86	22,84	27,56
	FD-O	7,52	8,57	9,50	11,50	14,71	17,34
	FD-A	7,93	9,40	10,59	12,98	16,70	19,71

Çizelge 4.4. Ankastre-sabit sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin birinci doğal frekans değerleri (Hz)

L/h	Dağılım türü	W_{GNL}					
		%0,1	%0,3	%0,5	%1	%2	%3
10	UD	31,06	38,03	43,91	55,99	74,51	89,31
	FD-X	32,74	42,01	49,57	64,73	87,55	105,62
	FD-O	29,26	33,44	37,13	45,03	57,68	68,04
	FD-A	30,81	36,75	41,57	51,37	66,51	78,75
20	UD	7,99	9,79	11,30	14,41	19,18	22,99
	FD-X	8,45	10,87	12,85	16,81	22,76	27,47
	FD-O	7,51	8,55	9,48	11,48	14,69	17,32
	FD-A	7,92	9,44	10,67	13,17	17,03	20,16
30	UD	3,57	4,37	5,05	6,44	8,57	10,27
	FD-X	3,78	4,86	5,75	7,52	10,19	12,30
	FD-O	3,35	3,82	4,23	5,12	6,55	7,72
	FD-A	3,54	4,22	4,76	5,88	7,60	9,00
40	UD	2,01	2,46	2,84	3,63	4,83	5,79
	FD-X	2,13	2,74	3,24	4,24	5,75	6,94
	FD-O	1,89	2,15	2,38	2,88	3,69	4,35
	FD-A	1,99	2,37	2,68	3,31	4,28	5,07

Çizelge 4.5. Ankastre-sabit sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin ikinci doğal frekans değerleri (Hz)

L/h	Dağılım türü	W_{GNL}					
		%0,1	%0,3	%0,5	%1	%2	%3
10	UD	94,74	115,99	133,93	170,74	227,25	272,40
	FD-X	99,34	136,84	149,31	194,43	262,49	316,46
	FD-O	89,71	103,05	114,74	139,62	179,26	211,64
	FD-A	93,90	111,80	126,25	155,56	200,90	237,58
20	UD	25,47	31,19	36,01	45,91	61,10	73,23
	FD-X	26,88	34,54	40,78	53,29	72,12	87,02
	FD-O	23,96	27,34	30,34	36,77	47,07	55,51
	FD-A	25,23	29,98	33,80	41,55	53,56	63,28
30	UD	11,49	14,07	16,24	20,71	27,56	33,03
	FD-X	12,14	15,62	18,46	24,15	32,69	39,46
	FD-O	10,79	12,30	13,63	16,51	21,13	24,91
	FD-A	11,38	13,51	15,23	18,72	24,11	28,49
40	UD	6,50	7,95	9,18	11,71	15,58	18,68
	FD-X	6,87	8,84	10,45	13,68	18,52	22,36
	FD-O	6,10	6,94	7,70	9,32	11,92	14,06
	FD-A	6,43	7,64	8,61	10,58	13,63	16,10

Çizelge 4.6. Ankastre-sabit sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin üçüncü doğal frekans değerleri (Hz)

L/h	Dağılım türü	W_{GNL}					
		%0,1	%0,3	%0,5	%1	%2	%3
10	UD	183,19	224,30	258,98	330,19	439,48	523,83
	FD-X	191,07	242,74	285,03	370,14	498,81	600,96
	FD-O	174,45	201,57	225,11	274,93	353,90	418,28
	FD-A	181,61	216,35	244,42	301,37	389,44	460,66
20	UD	51,88	63,52	73,34	93,50	124,43	149,15
	FD-X	54,63	70,05	82,63	107,84	145,82	175,90
	FD-O	48,91	55,93	62,13	75,39	96,60	113,96
	FD-A	51,38	61,05	68,83	84,60	109,02	128,80
30	UD	23,70	29,02	33,51	42,72	56,86	68,15
	FD-X	25,03	32,17	37,99	49,66	67,21	81,10
	FD-O	22,29	25,42	28,20	34,18	43,74	51,58
	FD-A	23,47	27,87	31,40	38,56	49,65	58,64
40	UD	13,47	16,49	19,04	24,28	32,31	38,72
	FD-X	14,23	18,31	21,64	28,30	38,32	46,24
	FD-O	12,65	14,42	15,99	19,36	24,77	29,20
	FD-A	13,34	15,83	17,83	21,89	28,18	33,27

Çizelge 4.7. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin birinci doğal frekans değerleri (Hz)

L/h	Dağılım türü	W_{GNL}					
		%0,1	%0,3	%0,5	%1	%2	%3
10	UD	43,88	53,73	62,03	79,09	105,26	126,17
	FD-X	46,11	59,01	69,53	90,65	122,48	147,70
	FD-O	41,46	47,51	52,84	64,21	82,35	97,18
	FD-A	43,48	51,7	58,36	71,80	92,60	109,43
20	UD	11,52	14,10	16,28	20,76	27,63	33,11
	FD-X	12,16	15,64	18,48	24,15	32,70	39,46
	FD-O	10,83	12,34	13,69	16,59	21,23	25,03
	FD-A	11,40	13,53	15,24	18,70	24,07	28,41
30	UD	5,17	6,32	7,30	9,31	12,39	14,86
	FD-X	5,46	7,03	8,31	10,87	14,72	17,77
	FD-O	4,85	5,52	6,12	7,42	9,49	11,19
	FD-A	5,11	6,07	6,83	8,38	10,78	12,72
40	UD	2,91	3,57	4,12	5,25	6,99	8,38
	FD-X	3,08	3,97	4,69	6,14	8,32	10,04
	FD-O	2,73	3,11	3,45	4,18	5,35	6,30
	FD-A	2,88	3,42	3,85	4,72	6,08	7,17

Çizelge 4.8. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin ikinci doğal frekans değerleri (Hz)

L/h	Dağılım türü	W_{GNL}					
		%0,1	%0,3	%0,5	%1	%2	%3
10	UD	112,29	137,49	158,75	202,39	269,38	322,92
	FD-X	117,30	149,23	175,34	277,87	307,24	370,22
	FD-O	106,76	123,15	137,42	167,65	215,64	254,79
	FD-A	111,37	132,82	150,16	185,30	239,56	283,42
20	UD	31,06	38,03	43,91	55,99	74,51	89,31
	FD-X	32,74	42,01	49,57	64,73	87,55	105,62
	FD-O	29,26	33,44	37,13	45,03	57,68	68,04
	FD-A	30,77	36,54	41,18	50,59	65,15	76,94
30	UD	14,10	17,27	19,94	25,42	33,83	40,55
	FD-X	14,90	19,16	22,63	29,58	40,05	48,33
	FD-O	13,26	15,11	16,76	20,31	25,99	30,65
	FD-A	13,96	16,57	18,66	22,90	29,46	34,79
40	UD	7,99	9,79	11,30	14,41	19,18	22,99
	FD-X	8,45	10,87	12,85	16,81	22,76	27,47
	FD-O	7,51	8,55	9,48	11,48	14,69	17,32
	FD-A	7,91	9,39	10,57	12,96	16,68	19,69

Çizelge 4.9. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerin üçüncü doğal frekans değerleri (Hz)

L/h	Dağılım türü	W_{GNL}					
		%0,1	%0,3	%0,5	%1	%2	%3
10	UD	202,66	248,13	286,50	365,29	486,22	582,89
	FD-X	210,56	266,52	312,41	404,91	544,98	656,30
	FD-O	193,79	224,92	251,78	308,37	397,77	470,54
	FD-A	201,14	240,45	272,32	336,94	436,58	517,03
20	UD	59,22	72,51	83,72	106,73	142,05	170,27
	FD-X	62,26	79,70	93,94	122,50	165,54	199,64
	FD-O	55,93	64,06	71,22	86,52	110,95	130,92
	FD-A	58,67	69,76	78,67	96,75	124,71	147,35
30	UD	27,28	33,41	38,57	49,18	65,45	78,45
	FD-X	28,78	36,97	43,64	57,01	77,14	93,07
	FD-O	25,68	29,31	32,53	39,44	50,50	59,56
	FD-A	27,02	32,08	36,14	44,37	57,12	67,44
40	UD	15,55	19,04	21,99	28,03	37,31	44,72
	FD-X	16,43	21,13	24,96	32,63	44,17	53,30
	FD-O	16,62	16,66	18,48	22,39	28,65	33,78
	FD-A	15,40	18,27	20,57	25,25	32,48	38,35

Örneğin (Çizelge 4.1), $L/h = 10$ durumunda, birinci mod frekans değeri FD-X dağılımı için %0,1 GNL ağırlık oranında 7,73 Hz, %3 GNL ağırlık oranında 25,14 Hz olarak elde edilmiştir. Aynı koşullar altında, FD-O dağılımı için bu değerler sırasıyla 6,86 Hz ve 15,81 Hz olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, uzunluk/yükseklik oranı (L/h) arttıkça, her bir dağılım tipi ve GNL ağırlık oranı için frekans değerlerinin azaldığı görülmektedir. Örneğin (Çizelge 4.1), X tipi ve %3 GNL içeriği için birinci modun doğal frekans değeri $L/h = 10$ durumunda 25,14 Hz iken, $L/h = 40$ durumunda ise 1,58 Hz olarak elde edilmiştir. Bu durum, kiriş rijitliğinin L/h oranıyla ters orantılı olarak değiştiğini göstermektedir.

Ele alınan üç sınır koşulu, hiperstatiklik derecelerine göre küçükten büyüğe doğru sıralandığında ankastre-serbest, ankastre-sabit ve ankastre-ankastre'dir. Kirişin hiperstatiklik derecesi arttıkça, yapının doğal frekans değerleri de artış göstermektedir. Her bir GNL ağırlık oranı, dağılım tipi ve L/h oranı için, ankastre-ankastre sınır koşuluna ait doğal frekans değerleri (Çizelge 4.7–4.9) en yüksek değerini alırken, ankastre-serbest sınır koşuluna ait doğal frekans değerleri (Çizelge 4.1–4.3) ise en düşük değerini almaktadır. Örneğin, $L/h = 10$, %3 GNL oranı ve FD-X dağılımı altında birinci mod

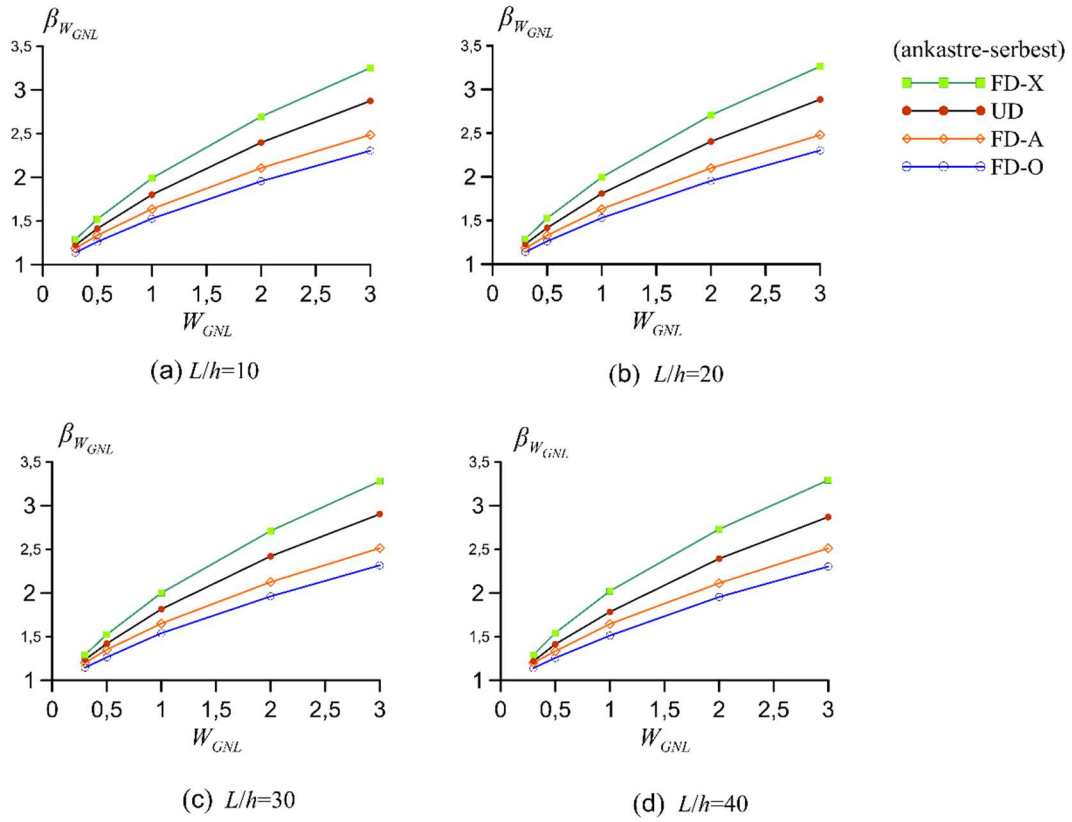
frekanslı ankastre-serbest durumda 25,14 Hz (Çizelge 4.1), ankastre-sabit sınır koşulunda 105,62 Hz (Çizelge 4.4) ve ankastre-ankastre sınır koşulu için ise 147,70 Hz' dir.

GNL ağırlık oranının etkisi: GNL ağırlık oranının kirişin doğal frekans değerleri üzerindeki etkisi $\beta_{W_{GNL}}$ oranı üzerinden incelenmiştir. Bu oran, $\beta_{W_{GNL}} = f_{W_{GNL}=i} / f_{W_{GNL}=\%0,1}$ formülü ile hesaplanmıştır ve burada $i=\%0,3, \%0,5, \%1, \%2$ ve $\%3$ 'tür. Bu kapsamda, farklı L/h oranları için birinci doğal frekans durumuna ait $\beta_{W_{GNL}}$ oranının GNL ağırlık oranına göre değişimleri, sırasıyla ankastre-serbest, ankastre-sabit ve ankastre-ankastre sınır koşulları için Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6' da sunulmaktadır.

Her üç sınır şartı ve tüm L/h oranları için, GNL miktarının artmasıyla birlikte doğal frekans değerlerinde belirgin bir yükselme gözlemlenmektedir. Bu artış, $\beta_{W_{GNL}}$ oranlarındaki yükselişten de açıkça görülmektedir. GNL ağırlık oranı artışının, X dağılımında GNL' nin yoğunlaştığı alt ve üst bölgelerde kesit rijitliğini daha fazla artırmakta, bu nedenle bu dağılım türünde daha yüksek $\beta_{W_{GNL}}$ oranları ele edilmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak, Şekil 4.4-4.6'da sunulan grafiklerde, en yüksek $\beta_{W_{GNL}}$ oranı X dağılımı için elde edilirken, en düşük değerler O dağılımı için gözlemlenmektedir. Örneğin, $L/h = 10$ için $\%3$ GNL oranında ankastre-serbest sınır koşulunda, X dağılımı için birinci doğal frekans yaklaşık 3,25 kat artarken; O dağılımı için bu artış yalnızca 2,30 kattır. Aynı koşulda ankastre-sabit sınır durumunda bu değerler sırasıyla 3,23 ve 2,32 iken, ankastre-ankastre sınır koşulunda ise 3,20 ve 2,34 şeklinde elde edilmiştir. Diğer L/h oranlarında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, GNL ağırlık oranı arttıkça $\beta_{W_{GNL}}$ oranlarındaki artışın eğimi azalmaktadır; bu durum üç sınır koşulu için de geçerlidir.

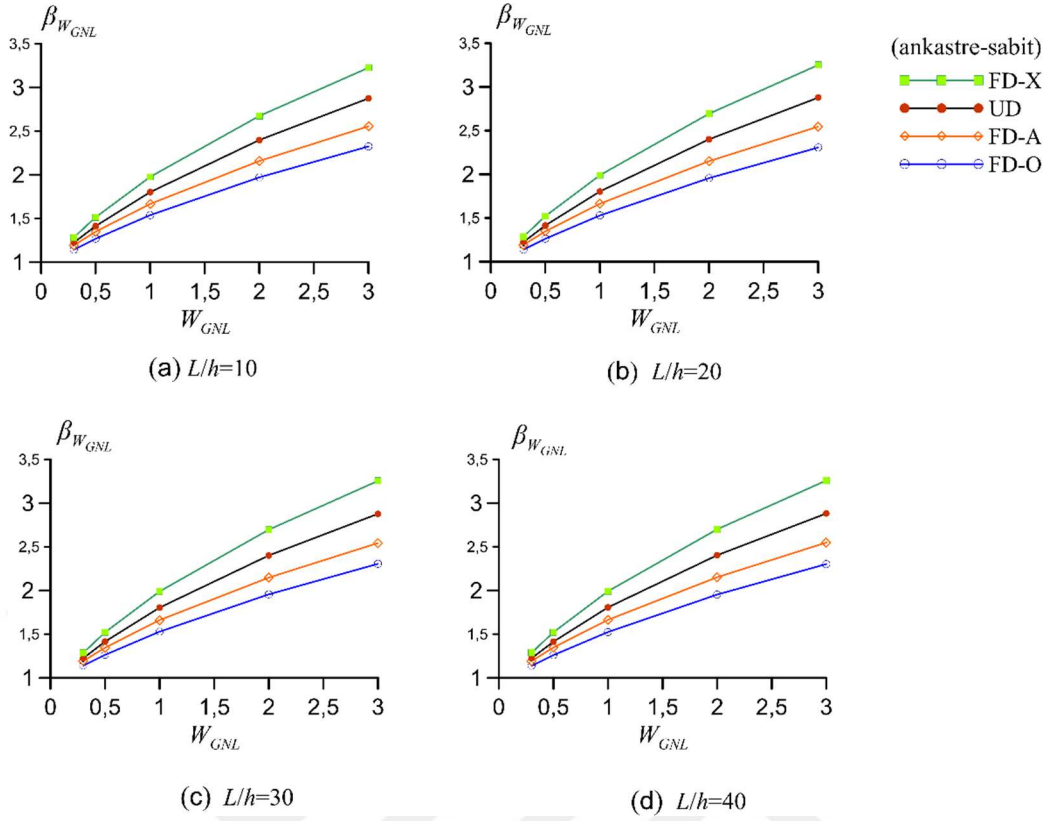
İkinci ve üçüncü doğal frekans değerleri de birinci doğal frekansta gözlemlenen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Öte yandan, GNL ağırlık oranı düşük seviyelerdeyken (örneğin $\%0,1-\%0,3$ aralığında), farklı dağılım tiplerine ait $\beta_{W_{GNL}}$ oranlarının birbirine oldukça yakın seyrettiği dikkat çekmektedir. Bu durum, GNL miktarının düşük olduğu koşullarda GNL dağılım tipinin serbest titreşim frekansı üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığını ve dağılım türleri arasındaki farkların bu seviyelerde daha az belirgin hâle geldiğini göstermektedir. Ancak GNL oranı arttıkça (özellikle $\%1$

ve üzeri değerlerde), dağılım tipleri arasındaki $\beta_{W_{GNL}}$ oranlarının arasındaki farklar belirginleşmektedir.

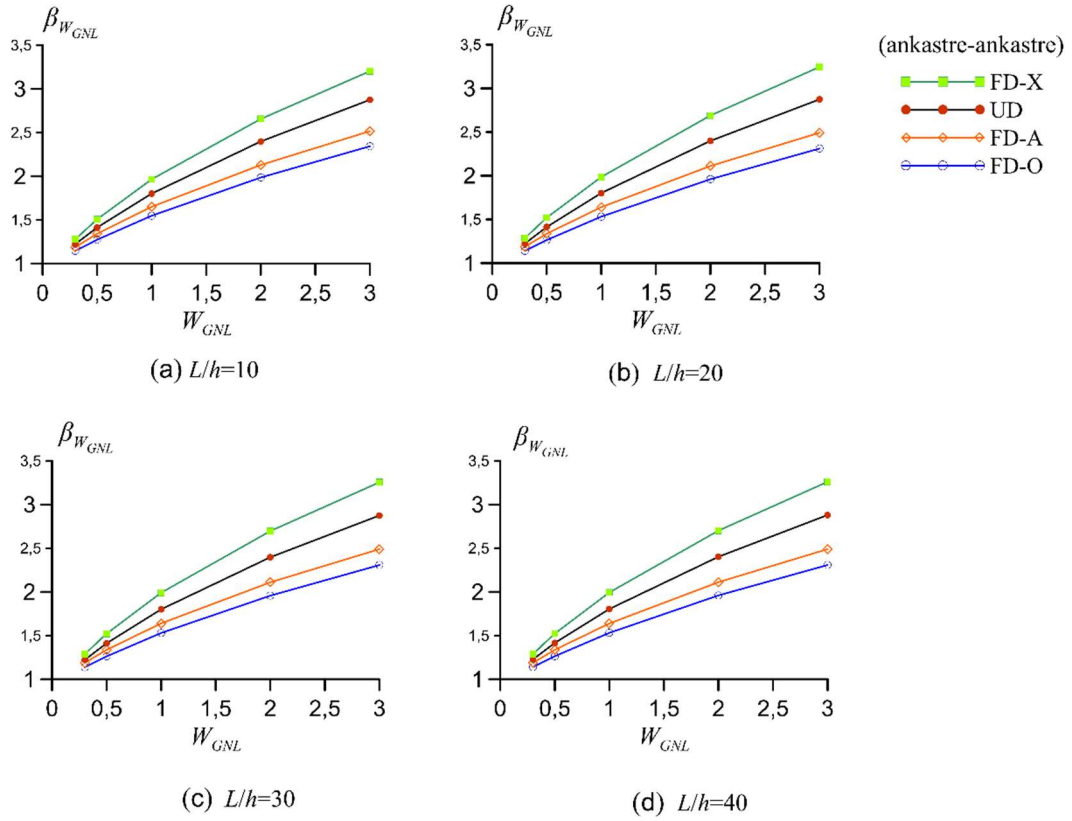


Şekil 4.4. Ankastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerde GNL ağırlık oranının (W_{GNL}) birinci doğal frekans üzerindeki etkisi

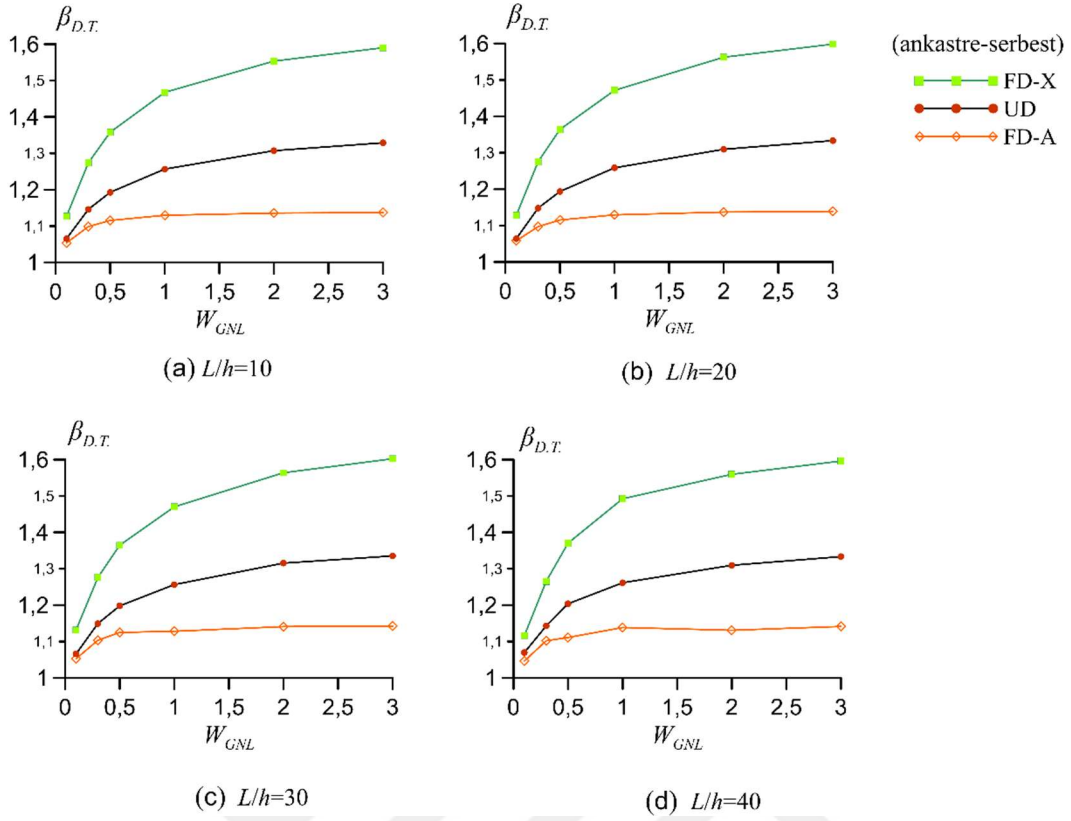
GNL dağılım tipinin etkisi: Çizelge 4.1–4.9’da sunulan verilere göre, GNL takviyesinin kiriş kesitinin orta bölgesinde yoğunlaştığı durumda (FD-O), doğal frekans değerleri en düşük değerlerini almıştır. Buna karşılık, GNL takviyesinin kesitin alt ve üst yüzeylerine yakın bölgelerde yoğunlaştığı durumda (FD-X), doğal frekans değerleri en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Homojen dağılımı ifade eden UD ile alt bölgede en yoğun, üst bölgede en az GNL takviye malzemesi içeren FD-A dağılımına ait frekans değerleri ise, tüm L/h oranları ve sınır koşullarında FD-X ile FD-O değerlerinin arasında yer almaktadır. GNL dağılım tipinin doğal frekans üzerindeki etkisi, dağılım tipleri arasında en düşük frekans değerinin elde edildiği FD-O dağılımına göre normalize edilen $\beta_{D.T.}$ (D.T.: Dağılım Tipi) oranı üzerinden detaylı olarak değerlendirilmiştir. Bu oran, $\beta_{D.T.} = f_{D.T.=i} / f_{D.T.=O}$ formülü ile hesaplanmıştır burada $i=UD, X$ ve A dağılım tipleridir. Bu kapsamda, farklı L/h oranları için birinci doğal frekans durumuna ait $\beta_{D.T.}$ oranının



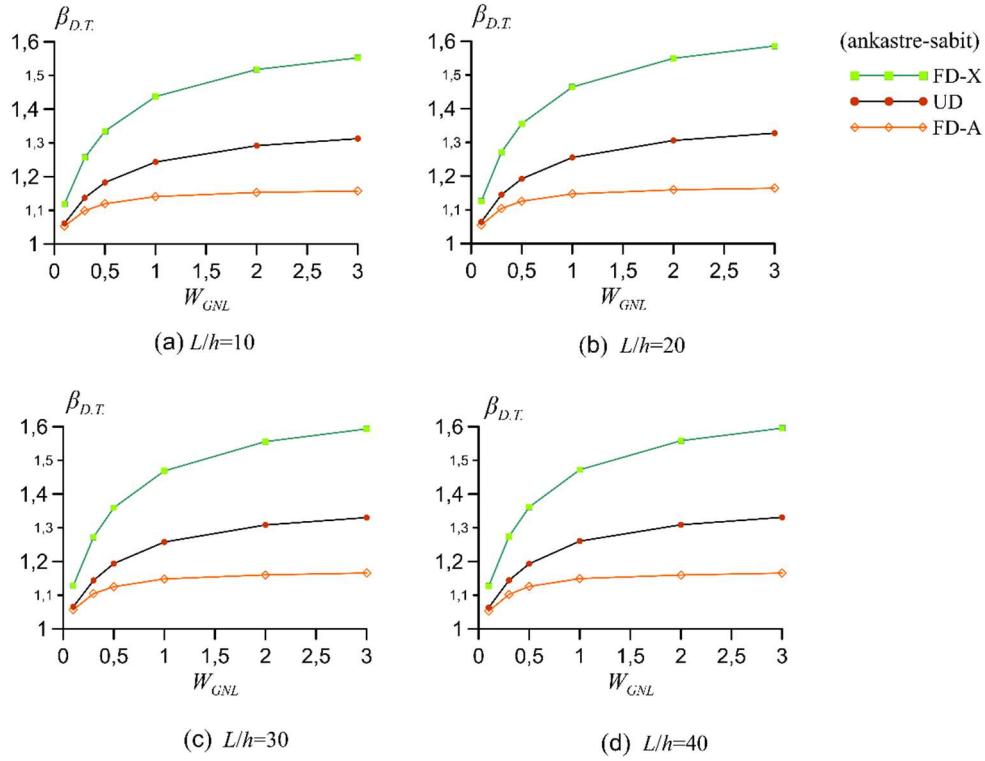
Şekil 4.5. Ankastre-sabit sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerde GNL ağırlık oranının (W_{GNL}) birinci doğal frekans üzerindeki etkisi



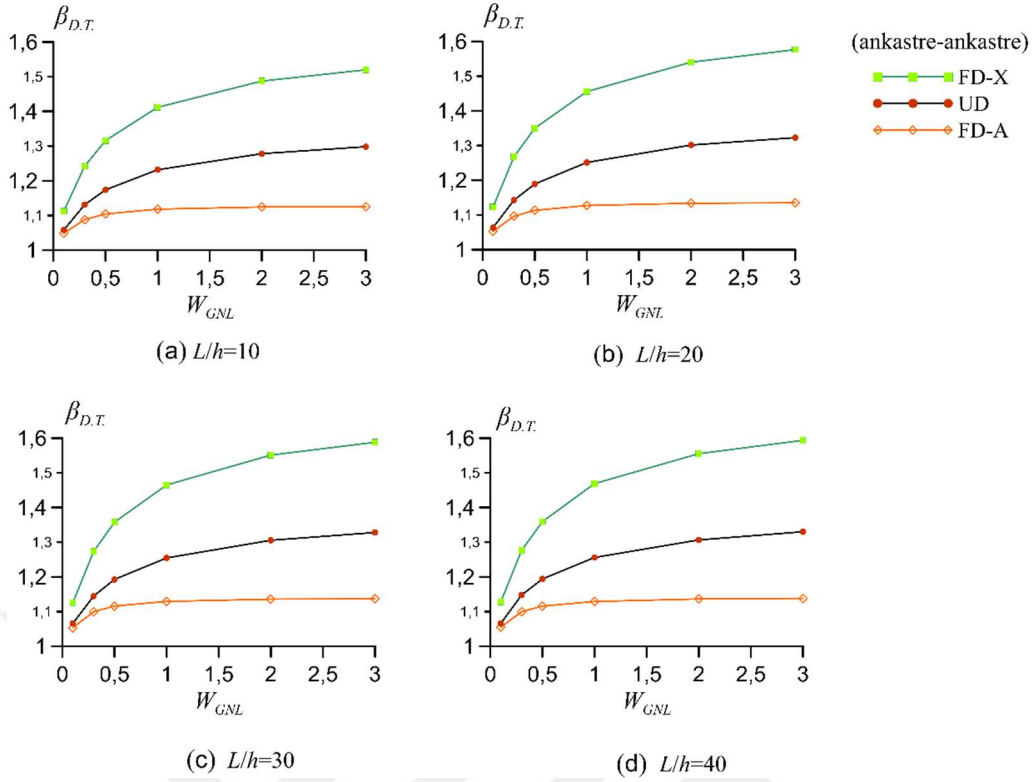
Şekil 4.6. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerde GNL ağırlık oranının (W_{GNL}) birinci doğal frekans üzerindeki etkisi



Şekil 4.7. Ankaastre-serbest sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerde GNL dağılım tipinin birinci doğal frekans üzerindeki etkisi ($\beta_{D.T.} = f_{D.T=i} / f_{D.T=0}$)



Şekil 4.8. Ankaastre-sabit sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerde dağılım tipinin birinci doğal frekans üzerindeki etkisi



Şekil 4.9. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip FD-GNLTK kirişlerde dağılım tipinin birinci doğal frekans üzerindeki etkisi

GNL ağırlık oranına göre değişimleri, sırasıyla ankastre-serbest, ankastre-sabit ve ankastre-ankastre sınır koşulları için Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9’ da sunulmaktadır.

Şekil 4.9’ da verilen ankastre-ankastre sınır koşuluna göre, FD-X dağılımı, tüm L/h oranlarında birinci doğal frekans üzerinde en yüksek artışı sağlayan dağılım tipi olmuştur. Örneğin, $L/h = 10$ durumunda, GNL ağırlık oranı %0,1 ve %3 için FD-X dağılımında elde edilen oran sırasıyla yaklaşık 1,11 ve 1,52’dir. Aynı koşullar altında, UD dağılımı için bu değerler yaklaşık 1,06 ve 1,30; FD-A dağılımı için ise yaklaşık 1,05 ve 1,13 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, FD-X dağılımının doğal frekans artışı üzerindeki etkisinin diğer dağılım tiplerine göre daha belirgin olduğunu göstermektedir. Diğer, sınır şartları (ankastre-sabit ve ankastre ankastre) ile diğer L/h oranları (20, 30, 40) için de bu $\beta_{D,T}$ oranları yaklaşık olarak aynı seviyelere elde edilmiştir. Ayrıca, ikinci ve üçüncü mod frekans değerleri de 1. modda gözlemlenen davranışlara benzerlik göstermektedir.

Düşük GNL ağırlık oranlarında ($W_{GNL} \leq \%0,5$), dağılım tipi etkisi daha belirgin iken, GNL ağırlık oranı arttıkça bu etkinin azalmaya başladığı gözlemlenmektedir. Özellikle,

GNL ağırlık oranının %0,5'ten büyük olduğu durumlarda, FD-A dağılımına ait $\beta_{D.T.}$ oran yaklaşık olarak 1,1 civarında sabit kalmaktadır.

4.2. GNL Takviyeli Kirişin Sönümlü Serbest Titreşim Davranışı: Rayleigh Sönüm Modeli ile Sayısal Bir İnceleme

Bu örnekte farklı sönüm oranlarının (ζ), yapının serbest titreşim davranışı üzerindeki etkisi incelenecektir. Bu amaçla, Rayleigh sönüm modeli kullanılmıştır.

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\omega} + \frac{\beta\omega}{2} \quad (16)$$

Burada α ve β sırasıyla kütle ve rijitlikle orantılı Rayleigh sönüm katsayılarını ifade etmektedir (Clough ve Penzien 1993). Rayleigh sönüm katsayıları yapının ilk iki açılal frekansı f_1 ve f_2 üzerinden hesaplanmıştır.

Bu örnekte ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip ve kiriş boy-yükseklik oranı $L/h = 20$ seçilmiştir. GNL takviyesi ağırlık oranı ise %0,1 olup kiriş yüksekliği boyunca uniform dağılmaktadır. Sönümlü serbest titreşim sonuçları ANSYS yapı analiz programının 3B katı sonlu elemanı olan SOLID 186 kullanılarak 106.800 serbestlik derecesi üzerinden elde edilmiştir. Sönümsüz serbest titreşime ait düzlem dışı ilk iki frekans değeri sırasıyla

Çizelge 4.10. Ankastre-ankastre sınır koşuluna sahip kirişin hesaplanan sönümlü serbest titreşim frekans değerleri ve Rayleigh sönüm katsayıları ($L/h=20$, $W_{GNL}=\%0,1$)

ζ	$f_1(\text{Hz})$	$f_2(\text{Hz})$	α	β
0	11,583	31,245	0	0
0,05	11,569	31,206	5,3095	0,00037161
0,08	11,546	31,145	8,4952	0,00059458
0,10	11,525	31,09	10,619	0,00074323
0,12	11,500	31,021	12,7428	0,00089187
0,15	11,452	30,864	15,9285	0,00111484
0,18	11,394	30,739	19,1142	0,00133781
0,20	11,350	30,619	21,2380	0,00148646

$f_1=11,583\text{Hz}$ ve $f_2=31,245\text{Hz}$ 'tir. Bu iki frekans değeri Denklem (16) ve farklı sönüm oranları ζ için elde edilen sönümlü serbest titreşim frekans değerleri ve hesaplarda kullanılan kütle ve rijitlikle orantılı Rayleigh sönüm katsayıları Çizelge 4.10'

da sunulmuştur. Bu sonuçlar, sönüm oranı arttıkça GNL takviyeli kirişin doğal frekanslarında kademeli bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Sönüm oranı küçük değerlerdeyken bu etki sınırlı düzeyde kalmakta, ancak $\zeta \geq 0,1$ seviyelerinde frekans değerindeki azalış daha belirgin hâle gelmektedir. Bu durum, sistemin özellikle düşük sönüm oranlarında dinamik davranışını büyük ölçüde koruduğunu, ancak sönüm arttıkça frekans duyarlılığının arttığını göstermektedir.





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, grafen nano-levha (GNL) ile güçlendirilmiş, kesit yüksekliği boyunca fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) doğru eksenli kirişlerin serbest titreşim davranışı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Geliştirilen yaklaşım, polimer matris malzemeye GNL takviyesinin eklenmesiyle elde edilen kompozit yapının elastik malzeme özelliklerini modellemek için literatürde sıklıkla kullanılan Halpin-Tsai mikromekanik modeli kullanmıştır. Bu model, GNL'lerin geometrisi ve matris malzemesi içerisinde uniform olarak rastgele dağıldığı prensibine dayanmaktadır. Kiriş yüksekliği boyunca GNL takviyelerin hacim oranları sabit tutularak, farklı dağılım türlerinin etkileri incelenmiştir. Bu dağılım türleri uniform dağılım (UD), FD yapıda X, O ve A türü dağılımlardır. Serbest titreşim davranışı, dairesel olmayan kompozit kirişte çarpılmanın dahil edildiği ve Timoshenko kuramı üzerinden geliştirilen karışık sonlu eleman formülasyonu üzerinden elde edilmiştir. Bu tez kapsamında, GNL takviyelerinin kesit yüksekliği boyunca farklı dağılım türleri ve ağırlık hacim oranlarının serbest titreşim davranışı üzerindeki etkileri farklı sınır koşulları için detaylı olarak irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, GNL hacim oranının ve malzeme dağılım türlerinin, kirişlerin titreşim karakteristikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, GNL takviyeli kompozit kirişlerin tasarımında malzeme dağılımının ve GNL içeriğinin optimize edilmesinin önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Yapılan analiz sonuçlarına göre; serbest titreşim davranışında GNL dağılım tipinin etkisi incelendiğinde, aynı GNL ağırlık oranları için kiriş kesitinin orta kısmında yoğunlaşan dağılım (FD-O dağılımı) doğal frekans değerlerini en düşük değerini alırken, buna karşılık GNL'nin kirişin alt-üst yüzeylerinde yoğunlaşan durumunda (FD-X dağılımı) doğal frekans değerleri en yüksek değerini almaktadır. Bu değerlendirme, ele alınan tüm L/h oranları ve sınır koşulları için geçerlidir. Ayrıca X dağılımı frekanslardaki en yüksek artışa neden olurken, O dağılımı ise frekanslardaki en düşük artışa neden olmaktadır. Bu gözlem, GNL miktarı yükseldikçe kesit içerisindeki takviye dağılım deseninin yapının serbest titreşim davranışı üzerindeki etkisinin güçlendiğini ve rijitlik dağılımının optimize edilmesinin dinamik performans açısından daha kritik hâle geldiğini ortaya koymaktadır.

Serbest titreşim davranışında GNL ağırlık oranının etkisi incelendiğinde, ağırlık oranındaki değişime en duyarlı dağılım tipi FD-X, en az duyarlı dağılım tipi ise FD-O olarak belirlenmiştir. Düşük ağırlık oranlarında dağılım tiplerine ait $\beta_{W_{GNL}}$ oranları birbirine yakinken, W_{GNL} arttıkça $\beta_{W_{GNL}}$ oranları arasındaki fark artış göstermektedir. Bir başka deyişle, ağırlık oranı arttıkça dağılım tipleri arasındaki farklılık da belirginleşmeye başlamaktadır.

Sönümlü serbest titreşim davranışında sönüm oranının etkisi incelendiğinde, sönüm oranının artmasıyla birlikte GNL takviyeli kirişin doğal frekanslarında kademeli bir azalma gözlemlenmektedir. Bu etki, özellikle düşük sönüm oranlarında sınırlı düzeyde kalırken, $\zeta \geq 0,1$ ve üzerindeki sönüm oranlarında daha belirgin hale gelmektedir. Yapılan analizler, düşük sönüm oranlarında yapının dinamik karakteristiklerinin büyük ölçüde korunmakta olduğunu göstermektedir. Ancak, sönüm oranının artmasıyla birlikte, doğal frekansların sönüm etkisine olan duyarlılığı belirgin şekilde artış göstermektedir.

Bu tez kapsamında yapılan literatür incelemesi ve gerçekleştirilen analizler doğrultusunda, gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler şu şekilde sıralanabilir: Bu tezde kullanılan karışık sonlu eleman formülasyonu, GNL takviyeli kompozit malzemelerin farklı yükleme durumları (örneğin, dinamik ve itki türü yükler) ile termal etkiler altındaki davranışlarını da kapsayacak şekilde geliştirilerek farklı problem türleri incelenebilir. Ayrıca, geliştirilen sonlu eleman formülasyonunun deneysel sonuçlarla kıyaslanması, efektif malzeme özellikleri için sunulan teorik malzeme modellerin doğruluğunu hakkında bilgi sunarak daha güvenilir tasarım yaklaşımlarının oluşturulmasına katkı sağlayacaktır. Bu çalışmadaki serbest titreşime ait doğal frekans değerleri ve sonuçları, doğru eksenli çubuklarda düşey yükleme ile zorlanmış titreşim frekanslarını ve rezonans durumlarını incelemek için ön çalışma niteliği taşımaktadır. Bu bağlamda, elde edilen bulguların gelecekte yapılacak araştırmalara yol gösterici olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Abramovich, H.** (2017). *Stability and vibrations of thin-walled composite structures*. Woodhead Publishing.
- Adetayo, A., & Runsewe, D.** (2019). Synthesis and fabrication of graphene and graphene oxide: A review. *Open journal of composite materials*, 9(02), 207.
- Agrawal, Arpana.** (2024). "Top-down strategies for achieving high-quality graphene: Recent advancements." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*
- Akbulut, A.** (2009). *Silisyum Nitritir Tozunun Al₂O₃, MgO, MgF₂ Sinterleme Ilaveleri Kullanilarak Sinterlenmesi* (Master's thesis, Sakarya Universitesi (Turkey)).
- Akinyi, C. J., & Iroh, J. O.** (2021). Heat of decomposition and fire retardant behavior of polyimide-graphene nanocomposites. *Energies*, 14(13), 3948.
- Al Faruque, M. A., Syduzzaman, M., Sarkar, J., Bilisik, K., & Naebe, M.** (2021). A review on the production methods and applications of graphene-based materials. *Nanomaterials*, 11(9), 2414.
- Alhamadani, Y.** (2018). *Evaluation of Sonocatalytic Degradation of Ibuprofen and Sulfamethoxazole in the Presence of Various Catalysts* (Doctoral dissertation, University of South Carolina).
- Altay, U., Dorduncu, M., Kadioglu, S.** (2023). An improved peridynamic approach for fatigue analysis of two dimensional functionally graded materials. *Theoret. Appl. Fract. Mech.* 128, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.104152>
- Ansari, M., Shahzadi, K. ve Ahmed, S.** (2020). Nanotechnology: A Breakthrough in Agronomy. *Nanoagronomy* (s. 1-21). içinde Cham, Switzerland: Springer.
- ANSYS®.** (2016). Academic Research Mechanical, Release 17.1, Canonsburg, Pennsylvania.
- Anwar, A., Chang, T. P., & Chen, C. T.** (2022). Graphene oxide synthesis using a top-down approach and discrete characterization techniques: a holistic review. *Carbon Letters*, 32(1), 1-38.
- Aribas, U. N., Ermis, M., Eratli, N., & Omurtag, M. H.** (2019). The static and dynamic analyses of warping included composite exact conical helix by mixed FEM. *Composites Part B: Engineering*, 160, 285-297.
- Aribas, U. N., Ermis, M., Kutlu, A., Eratli, N., & Omurtag, M. H.** (2022). Forced vibration analysis of composite-geometrically exact elliptical cone helices via mixed FEM. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(10), 1456-1474.
- Aribas, U. N., Atalay, M., & Omurtag, M. H.** (2023). Warping included mixed finite elements for bending and stresses of functionally graded exact curved

beams. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31(20), 5040–5056. <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2211075>

- Aribas, U.N., Aydin, M., Atalay, M., Omurtag, M. H.** (2023). Cross-sectional warping and precision of the first-order shear deformation theory for vibrations of transversely functionally graded curved beams. *Appl. Math. Mech.* 44, 2109-2138 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10483-023-3065-6>
- Aribas, U.N., Ermis, M., Kutlu, A., Eratli, N., Omurtag, M.H.** (2022). Forced vibration analysis of composite-geometrically exact elliptical cone helices via mixed FEM. *Mech. Adv. Mater. Struct.* 29, 1456-1474 <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1824048>
- Aribas, U.N., Ermis, M., Omurtag, M.H.** (2021). The static and stress analyses of axially functionally graded exact super-elliptical beams via mixed FEM. *Arch. Appl. Mech.* 91, 4783-4796. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-02033-w>
- Banakar, P., Shivananda, H. K., & Niranjan, H. B.** (2012). Influence of fiber orientation and thickness on tensile properties of laminated polymer composites. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 9(1), 61-68.
- Barati, M. R., & Shahverdi, H.** (2020). Finite element forced vibration analysis of refined shear deformable nanocomposite graphene platelet-reinforced beams. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42, 1-14.
- Baruah, A., Newar, R., Das, S., Kalita, N., Nath, M., Ghosh, P., Chinnam, S., Sarma, H., Narayan, M.** (2024). Biomedical applications of graphene-based nanomaterials: recent progress, challenges, and prospects in highly sensitive biosensors. *Discover Nano*, 19(1), 103.
- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F.** (2019). The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical–physical applications to nanomedicine. *Molecules*, 25(1), 112.
- Bhimaraddi, A., & Chandrashekhara, K.** (1991). Some observations on the modeling of laminated composite beams with general lay-ups. *Composite Structures*, 19(4), 371-380.
- Bousmina, M.** (2006). Study of intercalation and exfoliation processes in polymer nanocomposites. *Macromolecules*, 39(12), 4259-4263.
- Callister, W. D., Rethwisch, D. G., Blicblau, A., Bruggeman, K., Cortie, M., Long, J., ... & Mitchell, R.** (2007). *Materials science and engineering: an introduction* (Vol. 7, pp. 665-715). New York: John Wiley & sons.
- Ceylan, D.** (2005). *Cıvatalı ve yapıştırıcı kompozit bağlantılarda gerilme analizi* (Master's thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey)).
- Chandrasekaran, S., Sato, N., Tölle, F., Mülhaupt, R., Fiedler, B., & Schulte, K.** (2014). Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 97, 90-99.

- Chatterjee, S., & Chu, B. T. T.** (2016). 11 Graphene-Based Polymer Nanocomposites. *Graphene Science Handbook: Applications and Industrialization*, 145.
- Chen, D., Yang, J., & Kitipornchai, S.** (2017). Nonlinear vibration and postbuckling of functionally graded graphene reinforced porous nanocomposite beams. *Composites Science and Technology*, 142, 235-245.
- Choi, C. H. W., Shin, J., Eddy, L., Granja, V., Wyss, K. M., Damasceno, B., ... & Tour, J. M.** (2024). Flash-within-flash synthesis of gram-scale solid-state materials. *Nature Chemistry*, 1-7.
- Compton, O. C., & Nguyen, S. T.** (2010). Graphene oxide, highly reduced graphene oxide, and graphene: versatile building blocks for carbon-based materials. *small*, 6(6), 711-723.
- Çavuşoğlu, Ü.** (2013). *Magnezyum matrisli B4C takviyeli kompozit malzeme üretimi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Çerezci, T.** (2008). Nikel partikül takviyeli alumina seramik kompozitlerin sentezi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Çömez, İ, Aribas, U.N., Kutlu, A., Omurtag, M.H.** (2022). Two-dimensional solution of functionally graded piezoelectric-layered beams. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 44, 101 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03414-0>
- Demircioğlu, G.,** (2006). Kısa cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde elyaf boyutunun etkisi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi Ankara.
- Demirel, M. Ö.** (Çözücü Değiştirme Yöntemi ile Poli (eter eter keton)(PEEK) Kompozitlerinin Üretilmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 21(1), 43-49.
- Demirel, M. Ö.** (2023). Production of poly (Ether Ether Ketone) composites via solvent exchange method. *Makina Tasarım Ve İmalat Dergisi*, 21(1), 43–49. <https://doi.org/10.56193/matim.1137838>
- Dhand, V., Rhee, K. Y., Kim, H. J., & Jung, D. H.** (2013). A comprehensive review of graphene nanocomposites: Research status and trends. *Journal of Nanomaterials*, 2013 doi:<https://doi.org/10.1155/2013/763953>
- Doğan, H. Ö.** (2014). Grafit Oksitin Elektrokimyasal İndirgenmesi ile Grafen ve Metal-Grafen kompozit Sentezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 233s, Erzurum.
- Doğan, H. Y., Altın, Y., & Bedeloğlu, A.** (2021). Grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin özelliklerinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 24(4), 1719-1727.
- Doğruoğlu, A. N., & Omurtag, M. H.** (2000). Stability analysis of composite-plate foundation interaction by mixed FEM. *Journal of engineering mechanics*, 126(9), 928-936.
- Dorduncu, M., Apalak, M.K., Reddy, J.N.** (2019). Stress wave propagation in a through-thickness functionally graded adhesive layer. *J. Adhes. Sci.*

- Technol. 33, 2329-2355 (2019).
<https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1642435>
- Dorduncu, M., Kutlu, A., Madenci, E., Rabczuk, T.** (2023). Nonlocal modeling of bi-material and modulus graded plates using peridynamic differential operator. Eng. Comput. 39, 893-909 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s00366-022-01699-2>
- Dorduncu, M.** (2020). Stress analysis of sandwich plates with functionally graded cores using peridynamic differential operator and refined zigzag theory. *Thin-Walled Structures*, 146, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106468>
- Drieschner, S., Weber, M., Wohlketter, J., Vieten, J., Makrygiannis, E., Blaschke, B. M., ... & Garrido, J. A.** (2016). High surface area graphene foams by chemical vapor deposition. *2D Materials*, 3(4), 045013.
- Ekerer, F.A.**, (2007). Alumina-SiC Parçacık Destekli T/M AlMatriksli Kompozitlerin Üretilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Eratli, N., Yilmaz, M., Darilmaz, K., & Omurtag, M. H.** (2016). Dynamic analysis of helicoidal bars with non-circular cross-sections via mixed FEM. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 57(2), 221-238
- Ermis, M.** (2024). Warping-included mixed FE approach of beating characteristics in functionally graded graphene platelet-reinforced composite spatially curved beams under harmonic excitation force. *Archive of Applied Mechanics*, 94(12), 3687-3713.
- Ersöz M., Işıtan A. ve Balaban M.** (2018). Nanoteknoloji 1, Nanoteknolojinin temelleri, Bilal Ofset Basın-yayın matbaacılık, Denizli.
- European Patent Office** (2025). *Espacenet patent search*. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search> adresinden 01 Mart 2025 tarihinde alınmıştır.
- Evirgen K. M.** (2023). “Havacılık Sektörü için Otoklavda Üretilen Karbon Fiber Takviyeli Epoksi Polimer Kompozitlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Otoklav Basıncının Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Farjadian, F., Abbaspour, S., Sadatlu, M. A. A., Mirkiani, S., Ghasemi, A., Hoseini-Ghahfarokhi, M., ... & Hamblin, M. R.** (2020). Recent developments in graphene and graphene oxide: Properties, synthesis, and modifications: A review. *ChemistrySelect*, 5(33), 10200-10219.
- Feng, C., Kitipornchai, S., & Yang, J.** (2017). Nonlinear free vibration of functionally graded polymer composite beams reinforced with graphene nanoplatelets (GPLs). *Engineering Structures*, 140, 110-119.
- Fu, S., Sun, Z., Huang, P., Li, Y., & Hu, N.** (2019). Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. *Nano Materials Science*, 1(1), 2-30.
- Gay, D., Hoa, S.V., & Tsai, S.W.** (2002). *Composite Materials: Design and Applications* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420031683>

- Guilherme Elias, S. G., Rogerio Ramos de, S. J., Julia, R. G., & Demetrio Jackson, d. S.** (2024). Graphene oxide-based nanocomposites for stereolithography (SLA) 3D printing: Comprehensive mechanical characterization under combined loading modes. *Polymers*, 16(9), 1261. <https://doi.org/10.3390/polym16091261>
- Güler, S., & Yenikaya, S.** (2023). Grafen tabanlı çift katmanlı yapının ekranlama etkinliği üzerine parametrik çalışma. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(2), 151-157.
- Güneş, A.** (2013). “Üzerinde Yüzey Çatlağı Bulunan Hibrid Tabakalanmış Kompozit Levhaların Dinamik Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Hulla, J. E., Sahu, S. C., & Hayes, A. W.** (2015). Nanotechnology: History and future. *Human & experimental toxicology*, 34(12), 1318-1321.
- Huskić, M., Kević, D., Kleut, D., Mozetič, M., Vesel, A., Anžlovar, A., ... & Jovanović, S.** (2024). The Influence of Reaction Conditions on the Properties of Graphene Oxide. *Nanomaterials*, 14(3), 281.
- Hvizdoš, P., Puchý, V., Duszová, A., & Dusza, J.** (2011). Carbon nanofibers reinforced ceramic matrix composites. *Nanofibers-Production, Properties and Functional Applications*. doi: 10.5772/23445
- Jog, C. S., & Mokashi, I. S.** (2014). A finite element method for the Saint-Venant torsion and bending problems for prismatic beams. *Computers & Structures*, 135, 62-72.
- Jonšta, Z., Bolaños, A. C. E., Hrabalová, M., & Jonšta, P.** (2011). Physical and metallurgical characteristics of fiber reinforced ceramic matrix composites. *Advances in Ceramics - Characterization, Raw Materials, Processing, Properties, Degradation and Healing*. <https://doi.org/10.5772/21600>
- Karaman, C., Bayram, E., Karaman, O., & Aktaş, Z.** (2020). Preparation of high surface area nitrogen doped graphene for the assessment of morphologic properties and nitrogen content impacts on supercapacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 868, 114197.
- Karamanli, A., & Vo, T. P.** (2021). Finite element model for carbon nanotube-reinforced and graphene nanoplatelet-reinforced composite beams. *Composite Structures*, 264, 113739.
- Kaw, A.K.** (2005). *Mechanics of Composite Materials* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420058291>
- Kaya, A. İ.** (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.
- Kaya, B.** (2014) AL7Si-xB4C ve AL7Si-xZrB2 (x=%5, %10 ve %15) Kompozitlerinin mekanik alaşımlama ve sinterleme süreçlerinin incelenmesi ve karakterizasyon çalışmaları [Yüksek Lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kayan, A.** (2021). Suda dağılılabilen metal nanopartiküllerin antibakteriyel ve antibiyofilm aktivitelerinin incelenmesi.

- Kumar, N., Salehiyan, R., Chauke, V., Botlhoko, O. J., Setshedi, K., Scriba, M., ... & Ray, S. S.** (2021). Top-down synthesis of graphene: A comprehensive review. *FlatChem*, 27, 100224.
- Kumruoğlu, L. C.** (2019). Alüminyum-Magnezyum-Zirkonyum Alaşımına Grafen-Nano Karbon Esaslı Takviyelerin, Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 7(2), 180-188.
- Lan, Y., Zondode, M., Deng, H., Yan, J. A., Ndaw, M., Lisfi, A., ... & Pan, Y. L.** (2018). Basic concepts and recent advances of crystallographic orientation determination of graphene by Raman spectroscopy. *Crystals*, 8(10), 375.
- Li, X.** (2018). *Mechanochemical Synthesis of Carbon and Carbon Nitride Nanowire Single Crystals*. The Pennsylvania State University.
- Li, Z., Song, B., Wu, Z., Lin, Z., Yao, Y., Moon, K. S., & Wong, C. P.** (2015). 3D porous graphene with ultrahigh surface area for microscale capacitive deionization. *Nano Energy*, 11, 711-718.
- Liu, D., Chen, D., Yang, J., & Kitipornchai, S.** (2021). Buckling and free vibration of axially functionally graded graphene reinforced nanocomposite beams. *Engineering Structures*, 249, 113327.
- Liu, Z., Panja, D., & Barkema, G. T.** (2023). Domain growth in polycrystalline graphene. *Nanomaterials*, 13(24), 3127. doi:<https://doi.org/10.3390/nano13243127>
- Luong, D. X., Bets, K. V., Algozeeb, W. A., Stanford, M. G., Kittrell, C., Chen, W., Salvatierra, R. V., Ren, M., McHugh, E. A., Advincula, P. A., Wang, Z., Bhatt, M., Guo, H., Mancevski, V., Shahsavari, R., Yakobson, B. I., & Tour, J. M.** (2020). Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*, 577(7792), 647–651. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1938-0>
- Ma, R., Wang, Q., Zhang, M., Zhang, Y., Zhao, T., & Jin, Q.** (2025). Vibration analysis of composite beams integrated with graphene nanoplatelets reinforced piezoelectric layer. *Acta Mechanica*, 1-19.
- Madenci, E.** (2021). Free vibration and static analyses of metal-ceramic FG beams via high-order variational MFEM. *Steel Compos. Struct. Int. J.* 39, 493-509.
- Malik, S., Muhammad, K., & Waheed, Y.** (2023). Nanotechnology: A revolution in modern industry. *Molecules*, 28(2), 661.
- McLaren, R. L.** (2021). Exploration and functionalisation of plasma-exfoliated graphene-based materials for advanced applications (Order No. 28985189). Available from ProQuest Central; ProQuest Dissertations & Theses Global. (2637956152). Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/exploration-functionalisation-plasma-exfoliated/docview/2637956152/se-2>
- Menceloğlu, Y. Z., & Kırca, M. B.** (2008). *Uluslararası rekabet stratejileri: Nanoteknoloji ve Türkiye*. TÜSİAD.
- Mensah, B., Onwona-Agyeman, B., Efavi, J. K., Ofor, R. A., Zigah, M., Koranteng, J., Karikari, M., Nsful, F., & Addo, D. A.** (2023). Investigating the

Effect of Curing Activators on the Cure Kinetics of Acrylonitrile–Butadiene Rubber Filled with Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxides Nanocomposites. *International Journal of Polymer Science*, 2023, 1–21. <https://doi.org/10.1155/2023/6387898>

- Mittal, V.** (2014). Functional polymer nanocomposites with graphene: a review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(8), 906-931.
- Mojiri, H. R., & Salami, S. J.** (2022). Free vibration and dynamic transient response of functionally graded composite beams reinforced with graphene nanoplatelets (GPLs) resting on elastic foundation in thermal environment. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 50(6), 1872-1892.
- Nimibofa, A., Newton, E. A., Cyprain, A. Y., & Donbebe, W.** (2018). Fullerenes: synthesis and applications. *J Mater Sci*, 7, 22-33.
- Ning, G., Fan, Z., Wang, G., Gao, J., Qian, W., & Wei, F.** (2011). Gram-scale synthesis of nanomesh graphene with high surface area and its application in supercapacitor electrodes. *Chemical Communications*, 47(21), 5976-5978.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I. V., Dubonos, S. V., & Firsov, A. A.** (2005). Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 438(7065), 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature04233>
- Oden, J. T., & Reddy, J. N.** (2012). *Variational methods in theoretical mechanics*. Springer Science & Business Media.
- Omurtag, M. H., & Aköz, A. Y.** (1993). A compatible cylindrical shell element for stiffened cylindrical shells in a mixed finite element formulation. *Computers & structures*, 49(2), 363-370.
- Orellana, J., Araya-Hermosilla, E., Pucci, A., & Araya-Hermosilla, R.** (2024). Polymer-Assisted Graphite Exfoliation: Advancing Nanostructure Preparation and Multifunctional Composites. *Polymers*, 16(16), 2273.
- Öztop, B.** (2017). Atık alüminyum kullanarak grafen ve silisyum nitrür takviyeli kompozit üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun, 2017
- Öztop, B., & Gürbüz, M.** (2017). Atık alüminyumdan elde edilen matrisle grafen takviyesiyle üretilen kompozitlerin özelliklerinin incelenmesi. *Bildiri Özetleri Kitabı*, 310.
- Öztürk, M., Özkan, A., Günkaya, Z., & Banar, M.** (2024). Atıklardan Grafen Ve Türevlerinin Sentezlenmesi Üzerine Bir Değerlendirme. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 36(1), 103-115.
- Paksoy, Ö.** (2008). *Plastik Enjeksiyon Prosesinde Elyaf Yönlenmesinin İncelenmesi* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul).
- Park, S., & Ruoff, R. S.** (2009). Chemical methods for the production of graphenes. *Nature nanotechnology*, 4(4), 217-224.

- Pennachio, M.** (2023). *Planar, Twisted, and Macrocyclic Polyarenes: Structures, Reduction Limits, and Reactivity*. State University of New York at Albany.
- R. W. Clough, J. Penzien** (1993), *Dynamics of structures* 2nd edition McGrawHill, New York, NY.
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z. Z., & Koratkar, N.** (2009). Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content. *ACS nano*, 3(12), 3884-3890.
- Ray, S. S., & Bousmina, M.** (2005). Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: in greening the 21st century materials world. *Progress in materials science*, 50(8), 962-1079.
- Rodrigo, R., Molina, J., Bonastre, J., Maiorano, L. P., Molina, J. M., & Cases, F.** (2024). Aluminum Guefoams Coated with Reduced Graphene Oxide: A Corrosion Protection Study. *Coatings*, 14(2), 201.
- Roy, M., Roy, A., Rustagi, S., & Pandey, N.** (2023). An overview of nanomaterial applications in pharmacology. *BioMed Research International*, 2023(1), 4838043.
- Zhang, S., Wang, H., Liu, J., & Bao, C.** (2019). Measuring the specific surface area of monolayer graphene oxide in water. *Materials Letters*, 261, 127098. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127098>
- Santos, T. F., Souza, D. F., Santos, E. V., Carvalho, B. R., & Nascimento, J. H. O.** (2025). Graphene and graphene quantum dots applied to batteries and supercapacitors. *Nano Trends*, 100077.
- Selvam, M., Sakthipandi, K., Suriyaprabha, R., Saminathan, K., & Rajendran, V.** (2013). Synthesis and characterization of electrochemically-reduced graphene. *Bulletin of Materials Science*, 36, 1315-1321.
- Song, M., Gong, Y., Yang, J., Zhu, W., & Kitipornchai, S.** (2020). Nonlinear free vibration of cracked functionally graded graphene platelet-reinforced nanocomposite beams in thermal environments. *Journal of Sound and Vibration*, 468, 115115.
- Stoller, M. D., Park, S., Zhu, Y., An, J., & Ruoff, R. S.** (2008). Graphene-based ultracapacitors. *Nano letters*, 8(10), 3498-3502.
- Suryanarayana C., Koch C.C.**, (1999). "Non-Equilibrium Processing of Materials", January 20, 2006, Elsevier Science, New York, USA, <http://site.ebrary.com/lib/deulibrary/Doc?id=10041463&page=313-343>
- Şaşmaz, M.** (2015). Grafen katkılı nanokompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu
- Şenel, M. C., Gürbüz, M., & Koç, E.** (2015). Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. *Mühendis Ve Makina*, 56(669), 36-47. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1099862>
- Tan, X., Wu, J., Zhang, K., Peng, X., Sun, L., & Zhong, J.** (2013). Nanoindentation models and Young's modulus of monolayer graphene: A molecular dynamics study. *Applied Physics Letters*, 102(7).

- Tiwari, J.N., Tiwari, R.N., Kim, K.S.,** 2012. Zero-dimensional, onedimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices. *Prog. Mater. Sci.* 57, 724–803. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.08.003>.
- Tobin, Z.** (2021). *Fabrication, Characterization and Optimization of Ceramic Matrix Composites* (Doctoral dissertation, University of Connecticut).
- Toros, M.** (2011). Fren Balataalarında Nano Malzemelerin Kullanımının Frenleme Performansına Etkilerinin Deneysel Araştırılması. Selcuk University Institute of Natural and Applied Science, Master Thesis
- Tüzemen, M. Ç.** (2023). Cam ve Karbon Elyafı ile Oluşturulan Karma Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Analitik ve Nümerik Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(2), 503-511. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1202306>
- Unalan, I. U., Cerri, G., Marcuzzo, E., Cozzolino, C. A., & Farris, S.** (2014). Nanocomposite films and coatings using inorganic nanobuilding blocks (NBB): current applications and future opportunities in the food packaging sector. *RSC advances*, 4(56), 29393-29428.
- Verma, N., Jujjavarapu, S. E., Mahapatra, C., & Mutra, J. K. R.** (2023). Contemporary updates on bioremediation applications of graphene and its composites. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 48854-48867.
- Vollath, D.** (2013). *Nanomaterials: An Introduction to Synthesis, Properties and Applications*. Wiley-VCH; Weinheim, Germany: 2008.
- Wang, Y., Zhang, X., Liu, L., Yi, M., Shen, Z., Li, K., & Zhu, Y.** (2023). A high-yield and size-controlled production of graphene by optimizing fluid forces. *Journal of Materials Science*, 58(35), 13946-13956.
- Wu, H., Li, Y., Li, L., Kitipornchai, S., Wang, L., & Yang, J.** (2022). Free vibration analysis of functionally graded graphene nanocomposite beams partially in contact with fluid. *Composite Structures*, 291, 115609.
- Wu, H., Yang, J., & Kitipornchai, S.** (2017). Dynamic instability of functionally graded multilayer graphene nanocomposite beams in thermal environment. *Composite Structures*, 162, 244-254.
- Yang, S., Feng, X., & Müllen, K.** (2011). Sandwich-like, graphene-based titania nanosheets with high surface area for fast lithium storage. *Advanced Materials*, 23(31), 3575-3579.
- Yang, Z., Hurdoganoglu, D., Sahmani, S., Safaei, B., & Liu, A.** (2023). Surface stress size dependency in nonlinear thermomechanical in-plane stability characteristics of FG laminated curved nanobeams. *Engineering Structures*, 284, 115957.
- Yasmin, A., & Daniel, I. M.** (2004). Mechanical and thermal properties of graphite platelet/epoxy composites. *Polymer*, 45(24), 8211-8219.

- Yıldırım, V.** (1999). Governing equations of initially twisted elastic space rods made of laminated composite materials. *International journal of engineering science*, 37(8), 1007-1035.
- Yılmaz, B.** (2020). Zirh uygulamalarına yönelik grafen katkili sic seramik kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu (Master's thesis, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi).
- Young, R. J., Liu, M., Kinloch, I. A., Li, S., Zhao, X., Vallés, C., & Papageorgiou, D. G.** (2018). The mechanics of reinforcement of polymers by graphene nanoplatelets. *Composites Science and Technology*, 154, 110-116.
- Yousefi, A., & Rastgoo, A.** (2011). Free vibration of functionally graded spatial curved beams. *Composite Structures*, 93(11), 3048-3056.
- Zhang, L., Xu, Z., Gao, M., Xu, R., & Wang, G.** (2023). Static, dynamic and buckling responses of random functionally graded beams reinforced by graphene platelets. *Engineering Structures*, 291, 116476.
- Zhang, M., Zhao, J. H., Wu, Z., Wei, B. Q., Liang, J., Wu, D. H., ... & Wang, W. K.** (1998). Large-area synthesis of carbon nanofiber films. *Journal of materials science letters*, 17, 2109-2111.
- Zhang, Y., Teng, J., Huang, J., Zhou, K., & Huang, L.** (2022). Free and forced vibration analyses of functionally graded graphene-nanoplatelet-reinforced beams based on the finite element method. *Materials*, 15(17), 6135.
- Zhao, S., Zhao, Z., Yang, Z., Ke, L., Kitipornchai, S., & Yang, J.** (2020). Functionally graded graphene reinforced composite structures: A review. *Engineering Structures*, 210, 110339.
- Zhu, J., Yang, D., Yin, Z., Yan, Q., & Zhang, H.** (2014). Graphene and graphene-based materials for energy storage applications. *Small*, 10(17), 3480-3498.
- Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S.** (2010). Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Advanced materials*, 22(35), 3906-3924.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler		
Adı Soyadı		
Doğum Yeri		
Doğum Tarihi		
Uyruğu		
Telefon		
E-Posta Adresi		
Web Adresi		

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	
Fakülte	
Bölümü	
Mezuniyet Yılı	

Yüksek Lisans	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	

Makale ve Bildiriler
Zorluer, İ., Gökçe, Ş., İçağa Y., Güner, O. (2016) İş programı ile verimlilik artışının araştırılması Afyon Çimento Fabrikası Şantiyesi örneği, 3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN): October 19-24.
Güner, O., (2014) Türkiye' de inşaat sektöründe iş güvenliği mevzuatının incelenmesi, uygulaması ve şantiyelerde iş güvenliği, Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi: Kasım 6-8.
Güner, O., (2011) Türkiye’ de inşaat mühendisliği eğitimindeki problemlere dair çözüm önerileri, İnşaat Mühendisliği Eğitimi Sempozyumu(İMES): Eylül 23-24