

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ KOMPOZİT MİKRO KİRİŞLERİN
BURKULMA ANALİZİ**

Hoshang FİKRET

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2021

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ KOMPOZİT MİKRO KİRİŞLERİN
BURKULMA ANALİZİ**

Hoshang FİKRET

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2021

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ KOMPOZİT MİKRO KİRİŞLERİN
BURKULMA ANALİZİ

Hoshang FİKRET
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 09/07/2021 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ
Prof. Dr. Ömer CİVALEK
Doç. Dr. Mehmet AVCAR

ÖZET

KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ KOMPOZİT MİKRO KİRİŞLERİN BURKULMA ANALİZİ

Hoshang FİKRET

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ

Temmuz 2021; 55 sayfa

Bu tezde, karbon nanotüp takviyeli kompozit (KNTTK) mikro kirişlerin boyut etkili burkulma davranışları incelenmiştir. KNTTK kirişlerinin malzeme özellikleri karışım kuralı kullanılarak formüle edilmiştir. Yönetici diferansiyel denklemler değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi teorisi ve çeşitli kayma deformasyonlu kiriş teorilerine dayalı olarak minimum toplam potansiyel enerji ilkesi yardımıyla elde edilmiştir. Basit mesnetli KNTTK mikro kirişlerin çözümü için Navier çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada sağlanan matematiksel modeller, literatürdeki bazı mevcut sonuçlarla karşılaştırılarak sayısal olarak doğrulanmıştır. Boyut ölçek parametresinin, açıklık/derinlik oranı, KNT hacim oranının, kayma deformasyonunun ve takviye modelinin kritik burkulma yükü değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELE: Boyut etkisi, Burkulma, Değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi teorisi, Karbon nanotüp takviyeli kompozit mikro kiriş

JÜRİ: Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Doç. Dr. Mehmet AVCAR

ABSTRACT

BUCKLING ANALYSIS OF CARBON NANOTUBE-REINFORCED COMPOSITE MICROBEAMS

Hoshang FIKRET

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

July 2021; 55 pages

In this thesis, buckling behavior of carbon nanotube-reinforced composite (CNTRC) microbeams with size effect is investigated. The material properties of CNTRC beams are formulated using the rule of mixture. The governing differential equations are derived based on modified strain gradient theory and various shear deformable beam theories with the help of minimum total potential energy principle. Navier solution method is used for the solution of simply supported CNTRC microbeams. The mathematical models provided in this study have been numerically verified by comparing them with some available results in the literature. The effects of length scale parameter, span/depth ratio, volume fraction of CNT, shear deformation, and patterns of reinforcement on the critical buckling loads are investigated.

KEYWORDS: Buckling, Carbon nanotube-reinforced composite microbeams, Modified strain gradient theory, Size effect

COMMITTEE: Asst. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Assoc. Prof. Dr. Mehmet AVCAR

ÖNSÖZ

Kompozit malzemeler, fiziksel ve mekanik özellikleri farklı en az iki malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Geleneksel kompozitlerde, mekanik, termal veya fiziksel özellikler makroskopik seviyede eksenlere bağlı olarak değişiklik göstermez çünkü bu yapılarda takviyeler ya homojen ya da rastgele dağılmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), malzeme özelliklerinin herhangi bir ya da daha çok eksen boyunca devamlı olarak değişen özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemedan oluşan nispeten yeni bir kompozit malzeme türüdür. Tercih edilen yönde tasarlanmış bileşim gradyanlarına, yapıya ve spesifik özelliklere sahip bu gelişmiş malzemeler, benzer bileşenlerden yapılan homojen malzemelerden üstündür. FDM'ler için elastisite modülü, Poisson oranı, kayma modülü ve malzeme yoğunluğu gibi ortaya çıkan mekanik özellikler tercih edilen yönlerde sürekli olarak değişir.

Olağanüstü özelliklerinden dolayı, karbon nanotüpler (KNT) halihazırda çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır ve piyasada yerini almaktadır. Mikro ve nano ölçekli sistemler, nanoteknolojinin sağlık, savunma, elektronik, otomotiv, uçak-uzay araştırmaları ve tekstil gibi önemli alanlarında yaklaşık son on yıldır yoğun bir biçimde kullanılmakta olup gelecekteki uygulamalarının giderek artacağı tahmin edilmektedir. Bu sebeple bu tür yapıların özelliklerinin bilinmesi ve tasarımlarının yapılması önem kazanmıştır ve tasarımları için şekil değişimi esaslı davranışlarının bilinmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında karbon nanotüp takviyeli kompozit mikro kırılgarın değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi teorisine dayanan boyut etkili burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların karbon nanotüp takviyeli kompozit mikro kırılgarın mekanik davranışlarının anlaşılması için yol göstereceği düşünülmektedir.

Son olarak, bu tez çalışmasının hazırlanmasında büyük yardımlarından dolayı değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ'e teşekkür ediyorum. Tez yazımı esnasında fikir ve yardımlarından faydalandığım değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Hayri Metin NUMANOĞLU'na ve Sanjar SAEEDI'ya teşekkür ederim. Hayatımın her aşamasında bana destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Karbon Nanotüpler	5
1.1.1. Karbon nanotüp çeşitleri	6
1.1.2. Tek duvarlı karbon nanotüpler.....	7
1.1.3. Çok duvarlı karbon nanotüpler	7
1.1.4. Karbon nanotüplerin özellikleri	9
1.1.5. Yapısal özellikleri.....	9
1.1.6. Karbon nanotüplerin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	11
1.1.7. Mekanik özellikleri	11
1.1.8. Elektriksel özellikleri	13
1.1.9. Termal özellikleri.....	13
1.1.10. Karbon nanotüplerin dayanıklılık özellikleri.....	13
1.1.11. Karbon nanotüplerin elde edilme yöntemleri	14
1.1.11.1. Ark deşarjı (AD).....	14
1.1.11.2. Lazer ablasyon (LA)	15
1.1.11.3. Kimyasal buhar biriktirme (KBB).....	15
1.1.11.4. Mekanik öğütme	16
1.1.11.5. Hidrotermal metotlar	16
1.1.12. Karbon nanotüpler: mevcut ve gelecekteki uygulamalar	17
1.1.12.1. Elektrokimyasal sistem uygulamaları.....	17
1.1.12.2. Nanotüplerin kimya alanındaki uygulamaları	17
1.1.12.3. Tıbbi uygulamalar.....	17
1.1.12.4. Nano-gözenekli membran sistemi	18
1.1.12.5. Nanoprobalar ve sensörler	18

2. KAYNAK TARAMASI	23
2.1. Teorik Çalışmalar	23
2.2. Deneysel Çalışmalar	29
3. MATERYAL VE METOT	33
3.1. KNTTK Kirişler	33
3.2 Kayma Deformasyonlu Kiriş Teorileri.....	34
3.3 Değiştirilmiş Şekil Değiştirme Değişimi Teorisi	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	41
5. SONUÇLAR	48
6.KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Karbon Nanotüp Takviyeli Kompozit Mikro Kirişlerin Burkulma Analizi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

09/07/2021

Hoshang FİKRET

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Kesit alanı
e_{ijk}	: Permütasyon sembolü
ε_{ij}	: Şekil değiştirme tansörü
G	: Kayma modülü
h	: Kirişin kalınlığı
I	: Atalet momenti
k	: Malzeme özelliği değişim indeksi
K	: Hacim modülü
l	: Malzeme boyut ölçek parametresi
L	: Kirişin uzunluğu
m_{ij}	: Gerilme çifti tansörü
θ	: Dönme vektörü
u, w	: x ve z nin yer değiştirme vektörleri
E	: Kayma modülü
U	: Şekil değiştirme enerjisi
ν	: Poisson oranı
V	: Hacim oranı
ρ	: Kütle yoğunluğu
W	: Dış kuvvetlerin yaptığı işin potansiyeli
χ_{ij}	: Eğrilik tansörü
λ, μ	: Lamé sabitleri
σ_{ij}	: Gerilme tansörü
U_n, W_n	: Fourier katsayıları

Bu tezde ondalık ayıraç olarak nokta işareti (.) kullanılmıştır.

Kısaltmalar

AKM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
BEKT	: Bernoulli-Euler Kiriş Teorisi
ÇDKNT	: Çift Duvarlı Karbon Nanotüp
DDY	: Diferansiyel Dönüşüm Yöntemi
DGÇT	: Değiştirilmiş Gerilme Çifti Teorisi
DŞDDT	: Değiştirilmiş Şekil Değiştirme Değişimi Teorisi
FDM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
GGT	: Gerinim Gradyanı Teorisi
KNTKK	: Karbon Nanotüp Takviyeli Kompozit Kirişler
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
NEMS	: Nano Elektro Mekanik Sistemler
PKT	: Parabolik Kayma Deformasyonlu Kiriş Teorisi
SKT	: Sinüzoidal Kayma Deformasyonlu Kiriş Teorisi
TDKNT	: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
TKT	: Timoshenko Kiriş Teorisi
TKT*	: Geliştirilmiş Timoshenko Kiriş Teorisi
YDKT	: Yüksek Dereceden Kiriş Teorisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Boeing 787 Dreamliner'da çeşitli malzemelerin kullanımı (Katunin vd. 2017; Rosato 2013)	4
Şekil 1.2. Grafen örtü (Numanoğlu 2019)	6
Şekil 1.3. Duvar sayısına göre karbon nanotüp yapıları a) Tek duvarlı karbon nanotüpler b) Çok duvarlı karbon nanotüpler (Numanoğlu 2019)	6
Şekil 1.4. Farklı KNT biçimleri (Zhang vd. 2009)	9
Şekil 1.5a. Grafen örtünün sarılması (Numanoğlu 2019).....	10
Şekil 1.5b. Karbon nanotüplerin değişik sarılma açısına göre konfigürasyonları a) Bükük b) Zikzak c) Koltuk (Numanoğlu 2019).....	10
Şekil 1.6. Karbon nanotüpün kuvvet altındaki davranışı	12
Şekil 1.7. KNT özellikleri	14
Şekil 1.8. KNT'nin KBB sentezinde kullanılan işlem parametreleri.	16
Şekil 1.9. Karbon nanotüplerden yapılmış tenis raketi	19
Şekil 1.10. Çok duvarlı karbon nanotüplerle üretilen hokey sopaları.....	19
Şekil 1.11. Karbon nanotüplerle üretilmiş beysbol sopası	19
Şekil 1.12. Direği güçlendirmek için karbon fiberler ve nanotüplerle yapılmış yelkenli tekne	20
Şekil 1.13. Karbon nanotüplerden yapılmış bisiklet.....	20
Şekil 1.14. Karbon nanotüplerden yapılmış rüzgar türbini kanatları.....	21
Şekil 1.15. Karbon nanotüp tabanlı bir yapay kas oluşturma çabalarının sanatsal görünümü	21
Şekil 1.16. Samsung ekranı.....	22
Şekil 3.1. (a) Bir KNTTK kirişinin geometrisi	34
Şekil 3.1. (b) Farklı takviye modellerinin enine kesitleri	34

Şekil 4.1. Şekil. DD kirişe ait klasik boyutsuz kritik burkulma yükü $(P_{kr}L^2/(E_mI))$ değerlerinin boy/yükseklik (L/h) oranına bağlı olarak değişimi $(l = 0)$	44
Şekil 4.2. DD kirişe ait boyut etkisinin dikkate alındığı boyutsuz kritik burkulma yükü $(P_{kr}L^2/(E_mI))$ değerlerinin boy/yükseklik (L/h) oranına bağlı olarak değişimi $(l = h)$	45
Şekil 4.3. DD kirişin PKT'ye dayalı boyutsuz kritik burkulma yükü $(P_{kr}L^2/(E_mI))$ değerlerinin malzeme boyut ölçek parametresi/yükseklik (l/h) oranına bağlı olarak değişimi $(L = 10h)$	46
Şekil 4.4. FD-O kirişin PKT'ye dayalı boyutsuz kritik burkulma yükü $(P_{kr}L^2/(E_mI))$ değerlerinin malzeme boyut ölçek parametresi/yükseklik (l/h) oranına bağlı olarak değişimi $(L = 10h)$	46
Şekil 4.5. FD-X kirişin PKT'ye dayalı boyutsuz kritik burkulma yükü $(P_{kr}L^2/(E_mI))$ değerlerinin malzeme boyut ölçek parametresi/yükseklik (l/h) oranına bağlı olarak değişimi $(L = 10h)$	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Tek duvarlı Karbon Nanotüplerin Özellikleri.....	7
Çizelge 1.2. Çok duvarlı Nanotüplerin Özellikleri	8
Çizelge 1.3. Tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT'ler) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT'ler) arasında karşılaştırmalı çalışma (He vd. 2013)	8
Çizelge 1.4. Bazı malzemelerin mekanik özellikleri	12
Çizelge 4.1. Karbon nanotüp takviyeli kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması ($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.12$)	41
Çizelge 4.2. Karbon nanotüp takviyeli kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.17$)	42
Çizelge 4.3. Karbon nanotüp takviyeli kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.28$)	42
Çizelge 4.4. Karbon nanotüp takviyeli mikro kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.12$, $l = h$)	43
Çizelge 4.5. Karbon nanotüp takviyeli mikro kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.17$, $l = h$)	43
Çizelge 4.6. Karbon nanotüp takviyeli mikro kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.28$, $l = h$)	43

1. GİRİŞ

İnsanoğlu ilk çağlardan beri hayatta kalmanın ve daha iyi yaşam sürmenin yollarını aramıştır. Bu esnada çeşitli keşifler yapmıştır. Günlük hayattaki mücadeleleri sonucu bilgi birikimine sahip olmuştur. Bu birikimler sonucunda bilim ve teknoloji ortaya çıkmıştır. Bilim ve teknoloji geliştikçe insan hayatını kolaylaştıran ürünler üreilmeye başlanmıştır. İnsanoğlu günümüze kadar modernleşme çabası içinde olmuştur. Toplayıcılıkla başlayan insanoğlunun yaşamı teknoloji ve bilimin gelişmesi ile daha modern bir hal almıştır. İnsanların bilgiye yönelmesiyle sağlanan ilerlemenin toplumlar üzerindeki etkisinden sonra yeni ortaya çıkacak farklı teknolojik gelişmeler olmuştur. Bu gelişmeler ışığında nanobilim ve nanoteknoloji günümüzde yavaş yavaş etkin bir rol almaya başlamıştır.

Mikro ve nano ölçekli sistemler, nanoteknolojinin sağlık, savunma, elektronik, otomotiv, uçak-uzay araştırmaları ve tekstil gibi önemli alanlarında yaklaşık son on yıldır yoğun bir biçimde kullanılmakta olup gelecekteki uygulamalarının giderek artacağı tahmin edilmektedir. Bu sistemlerin verimli olarak kullanılması için karakteristik özelliklerinin ve mekanik davranışlarının tasarım aşamasında biliniyor olması gerekir. Sürekli ortam mekaniği dışında yapılan yaklaşımların, pahalı olmaları, karmaşık ve uzun işlemlerden dolayı daha fazla zamana gereksinim duymaları gibi nedenlerden dolayı kullanımları sınırlı olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı sürekli ortam mekaniğine dayalı modellerin kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır. Fakat herhangi bir malzeme boyut ölçek parametresi olmadan geleneksel elastisite teorileri ile oluşturulan modeller ile boyut etkisi dikkate alınamamıştır.

Mikro Nano-elektro mekanik sistemlerde (NEMS) ve Mikro elektro mekanik sistemlerde (MEMS) en geniş yapılarıdır. Dresselhaus vd. (2004) tarafından, mikro ve nano ölçekli alaşımlar, element yapılarını ince film şekil hafızası olarak üretilmiştir. Atomik kuvvet mikroskopları ise Mindlin ve Tiersten (1962) tarafından ve Elektriksel mikro elektro mekanik yapı cihazları Hong ve Myung (2007) tarafından geliştirilmiştir. Bu uygulamalarda boyut etkisi oldukça önemlidir ve bu sebepten dolayı bu küçük ölçekli yapılandırmaların özelliklerini bilmek için uygulamalar yapılmalıdır. Sürekli ortam teorisi, mikro yapılarda görülen boyut etkilerini hesaba katmaz zira bu ölçeğin yapılarını tanımlamak için herhangi bir ek mikro ölçek değerlendirmesi bulunmazdır. Bu nedenle boyut etkili davranışları hesaba katmak için geleneksel elastisite teorisini gözden geçirmek gerekmektedir. Son birkaç yılda boyut etkili elastisite modelleri geliştirmek için bazı yüksek mertebeden sürekli ortam teorileri üzerinde çalışılmıştır. Eringen (1972)'de boyut etkisini dikkate alarak boyut etkili teoriler arasında yer alan yerel olmayan elastisite teorisini geliştirmiştir. Son yirmi senede Eringen'in yerel olmayan elastisite teorisi mikro yapıların eğilme, burkulma ve titreşim davranışlarını araştırmak için sıklıkla kullanılmıştır.

MEMS teknolojisinin hızlı gelişmeleri ile karakteristik boyutları mikron ve daha küçük olan sensörler, aktüatörler ve rezonatörler gibi çeşitli mikro ölçekli cihazlar üretilmiş ve yaygın uygulamalara kavuşmuştur. MEMS cihazlarının performans ve güvenilirliği bakımından bu yapıların mekanik davranış özellikleri önemli role sahiptir. Bu nedenle ilgili yapıların mekanik karakteristiklerini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar, model oluşturma ve sayısal simülasyon ile kapsamlı araştırmalar yapılmıştır.

Geçtiğimiz yıllarda, mikro boyutta yapılan deneyler, bazı metallerin ve polimerlerin deformasyon davranışlarının boyuta bağlı olduğunu açıkça göstermiştir. İlk olarak, boyut etkisi fenomeni metallerde gözlenmiştir. Araştırmacılar, boyuta bağlılığı belirlemek için mikro rezonans, mikro eğilme ve mikro burulma gibi deneyler gerçekleştirdiler ve bu fenomeni yüksek mertebeden sürekli ortam teorisine dayalı olarak tanımlamak ve yorumlamak için ilgili modellemeyi kurdular. Daha sonra, bazı polimerlerin ve metallerin mekanik özellikleri üzerindeki boyut etkileri de gözlenmiştir. Örneğin, Lam vd. (2003) tarafından mikro eğilme deneylerinde epoksi kirişlerin normalleştirilmiş eğilme rijitliğinin, konsol kirişin kalınlığı 115 μm 'den 20 μm 'ye düştüğünde yaklaşık 2.4 kat arttığı bulunmuştur. McFarland ve Colton (2005) polipropilen mikro santrifüjlerin mikro eğilme testlerinde eğilme rijitliği değerlerinin klasik teoriye göre en az dört kat daha büyük olduğunu göstermişlerdir. Lei vd. (2016) nikelden imal edilmiş konsol mikro kirişler üzerinde rezonans deneyi yaptılar ve kalınlık 15 μm 'den 2.1 μm 'ye düştüğünde boyutsuz doğal frekans yaklaşık 2.1 kat arttığını keşfettiler. Yukarıdaki deneysel sonuçlar yapısal elemanın mekanik davranışı üzerine boyut etkisinin belirli malzemelere özgü olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, mikro ölçekte MEMS mekanik özelliklerinin derinlemesine anlaşılması ve karakterize edilmesi, MEMS cihazlarının tasarımı ve kontrolü için çok önemlidir.

Teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler, nanoteknolojinin doğmasına yol açtı ve nanoteknolojiyi çağımızın en öncelikli konularından biri haline getirdi. Nano parçacıklar, ince filmler ve nanotüpler olarak elde edilen malzemeler, gösterdikleri çok ilginç fiziksel özellikler ve boyutların çok küçülmesi nedeniyle teknolojide büyük bir kullanım alanı sunmaktadırlar. Bu kullanım alanının çoğunu barındıran yapı ise karbon nanotüplerdir. Dolayısıyla nanoteknolojinin en önemli konularından biri karbon nanotüp (KNT)'lerdir. 1991 yılında KNT'in keşfi nanoteknolojideki gelişmeleri hızlandırdı. KNT, olağanüstü mekanik, kimyasal, termal, fiziksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Çeşitli potansiyel uygulamalar için yüksek performanslı yapısal ve çok fonksiyonlu kompozitler üretmek amacıyla, yüksek elastisite modülü ve gerilme mukavemeti ile düşük yoğunluğa, korozyon direncine sahip KNT, geleneksel elyaflar yerine takviye elemanı olarak kullanılabilecek mükemmel adaydır.

Diğer karbon nano malzemeler arasında, KNT olağanüstü geometrik yapıları ve şaşırtıcı özellikleri nedeniyle araştırmacıları büyülemiştir. Hem deneysel hem de teorik çalışmalar, KNT'nin olağanüstü mekanik özelliklere, yüksek en-boy oranına ($\sim 10^4$), mükemmel dalgalanma özelliklerine, yüksek termal özelliklere, iyi elektrik iletkenliğine, yüksek erime noktasına, daha geniş yüzey alanına ($\sim 1000 \text{ m}^2/\text{g}$), mükemmel hidrojen depolaması ile dikkat çekici biyolojik özelliklere, daha yüksek korozyon direncine, benzersiz optik özelliklere ve hafifliğe ($\sim 2 \text{ g/cm}^3$) sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yukarıda belirtilen istisnai özellikleri sayesinde KNT, nano-elektronik, enerji depolama cihazları, kompozit malzemeler, ilaç endüstrisi, nano sensör uygulamaları, biyolojik uygulamalar, akıllı malzemeler, su ve hava arıtma sistemleri gibi alanlarda çalışan birçok bilim insanı ve araştırmacıda inanılmaz ilgi uyandırdı. KNT'nin başlıca uygulamalarından biri, havacılık, otomobil, spor ve tıp endüstrilerinde kullanılmak üzere hafif, yüksek mukavemetli nano kompozit yapının hazırlanması için takviye edici bileşen rolüdür. KNT'lerin ve kompozitlerinin kullanımı halihazırda birçok gerçek yaşam uygulamasına fayda sağlamakta olup yakın gelecekte ortaya çıkabilecek daha birçok uygulama da olabilir.

Herhangi bir bileşenin veya yapının tasarımında veya imalatında, malzemelerin özelliklerinin çok önemli bir rol oynadığı iyi bilinen bir gerçektir. Son zamanlarda, KNT'ler, özellikle mekanik, termal ve elektriksel özelliklerin iyileştirilmesi için birçok kompozitin önemli bir parçası haline gelmiştir. KNT ile güçlendirilmiş nano kompozitler, çeşitli mühendislik alanlarında mevcut birkaç malzemeyi değiştirmek için yeni bir gelişmiş malzeme sınıfını temsil eder. Son yıllarda çok fazla ilerleme gözlemlenmiş ve polimer, metal, seramik, elyaf gibi matrislere sahip KNT bazlı nano kompozitlerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu, üretimi ve değerlendirilmesi hakkında çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir. Diğerleri arasında, polimer nano kompozitler (PNK'ler) ve metal matris nano kompozitler (MMNK'ler) kapsamlı endüstriyel ve yapısal uygulamaları nedeniyle önemli araştırma ilgisi çekmektedir. Literatüre göre, KNT'lerin mükemmel mekanik (yüksek Young modülü ve gerilme mukavemeti) ve termal özelliklerini polimer ve metal matris malzemelerine takviye ederek kullanmak için kayda değer bir heyecan gözlemlenmiştir.

Bilindiği gibi, kompozit malzemeler, her bir bileşenin tamamlayıcılığı ve korelasyonu nedeniyle olağanüstü malzeme özelliklerine sahiptir. Bununla birlikte, geleneksel (tabakalı) kompozit yapılar aşırı çalışma koşullarıyla karşılaştığında ara yüzdeki özelliklerin keskin değişimine bağlı olarak delaminasyon hatası ve/veya gerilme yığılmasına bağlı çatlak ortaya çıkabilmektedir.

Bu sorunun üstesinden gelmek için, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM) kavramı ilk olarak Niino (1990) tarafından önerilmiştir. Bu malzemeler, özelliklerin bir malzemedan diğerine yumuşak geçişiyle sonuçlanan keskin ara yüzü kademeli geçişli ara yüzle değiştirir ve buna bağlı olarak stres konsantrasyonları ve zayıf yapışma gibi ara yüz sorunlarını ortadan kaldırılabirler. Bu nedenle, bu kompozit yapı özel ortama uyum sağlayabilir ve havacılık, savunma ve benzeri alanlarda yaygın olarak kullanılabilir. FD yapısını daha iyi tasarlamak ve değerlendirmek için çeşitli analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Örneğin, Li ve Pang (2018) karmaşık sınır koşulları altında FD dairesel silindirik kabukların serbest titreşimini analiz etmek için yeni bir yarı analitik yöntem kullanmışlardır. Karami vd. (2019) anizotropik malzemedan yapılmış FD nano plakları araştırdı ve farklı sınır koşulları için burkulma problemini çözmek için Galerkin'in yaklaşımını kullandı.

Şekil 1.1, Boeing 787 gövdesinin yapısında kullanılan malzemeleri göstermektedir. Boeing 787 Dreamliner gibi modern uçaklar, %50'den fazla karbon fiber kompozitin oluşmaktadır. 787 Dreamliner örneğinde olduğu gibi, kompozit malzemelerden yapılan uçak bileşenlerinin ağırlığı yaklaşık %20 oranında azaltılır (Lubin 2013; Dutton vd. 2004; Gay ve Hoa 2007; Zhao 2003). Airbus Company, 1980'lerin başında temel uçak yapılarında da kompozitler kullandı. 1990'ların sonunda şirket, büyük bir ticari uçak olan A340 için ilk karbon fiber omurga kirişini inşa etti; Yeni A380'de (Brick 1988) kompozitler kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Boeing 787 Dreamliner'da çeşitli malzemelerin kullanımı (Katunin vd. 2017; Rosato 2013)

Geleneksel kompozitlerde, mekanik, termal veya fiziksel özellikler makroskopik seviyede eksene bağlı olarak değişiklik göstermez çünkü kompozitlerde takviyeler ya homojen ya da rastgele dağılmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler), malzeme özelliklerinin herhangi bir ya da daha çok eksen boyunca devamlı olarak değişen özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemeden oluşan nispeten yeni bir kompozit malzeme türüdür. Tercih edilen yönde tasarlanmış bileşim değişimine, yapıya ve spesifik özelliklere sahip bu gelişmiş malzemeler, benzer bileşenlerden yapılan homojen malzemelerden üstündür. FDM'ler için Young modülü, Poisson oranı, kayma modülü, ısı genleşme katsayısı ve malzeme yoğunluğu gibi ortaya çıkan mekanik özellikler tercih edilen yönlerde yumuşak ve sürekli olarak değişir. Günümüze değin çok çeşitli alanlarda FDM'ler hakkında birçok çalışma yapılmıştır.

Geleneksel nano kompozitler söz konusu olduğunda, mekanik, termal veya fiziksel özellikler ister nanotüpler ister kompozitlerde eşit olarak ister rastgele dağılmış olsun, makroskopik seviyede konuma bağlı olarak değişmez. FDM'ler, takviye fazının belirli bir tekdüze olmayan dağılımına göre konuma bağlı olarak değişen özelliklere sahip yeni bir kompozit malzeme türüdür. FD takviye dağılımı modeli, KNT ile güçlendirilmiş kompozit malzemeler için başarıyla uygulanmıştır. KNT tabanlı FDM'ler ilk olarak Shen vd. (2009) tarafından, yapıların mekanik özelliklerini iyileştirmek için istenen yönler boyunca belirli kurallarla onları derecelendirmek için özel olarak tasarlanmış izotropik bir matris içindeki KNT dağılımları ile önerilmiştir. Nano kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemek için FD-KNTTK kiriş, plak ve kabuk hakkında bir dizi araştırma yapılmıştır.

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte kullanım amacına uygun özelliklere sahip malzeme ihtiyacı da artmaktadır. Özellikle sanayide yüksek dayanımla beraber hafifliğin de istendiği malzemeler çok fazla kullanılmaktadır. Bu ileri düzey malzemeler kompozit malzeme olarak üretilmektedir. Kompozitler birbirlerinin zayıf yönlerini kapatacak şekilde makro ve mikro düzeyde birleştirmesi ile oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Son yıllarda, en umut verici zorluklardan biri, hafif malzemelerin

yeni işlevlerinin avantajlarından yararlanmaktadır (Gibson 2010). Matris içinde belirli bir lif derecelendirmesine sahip yeni ortaya çıkan bir polimer kompozit malzeme türü muazzam bir ilgi çekmiştir ve FDM olarak kabul edilmiştir (Kieback vd. 2003; Udupa vd. 2014). Karbon nano fiber, grafen ve karbon nanotüp (KNT) gibi yeni nesil nano malzemelerin keşfedilmesinden sonra termoplastik polimerlerin uygulamaları genişledi. Bilim adamları ve araştırmacılar arasında nano yapılara aşırı ilgi, nano kompozit malzemenin hızlı bir şekilde geliştirilmesine ve karakterizasyonuna yol açmıştır. KNT'lerin olağanüstü elastik, termal, fiziksel ve elektriksel özellikleri nedeniyle, KNT bazlı kompozit malzemeler, çeşitli mühendislik kompozit yapılarında uygulama için ilgi odağı haline gelmiştir.

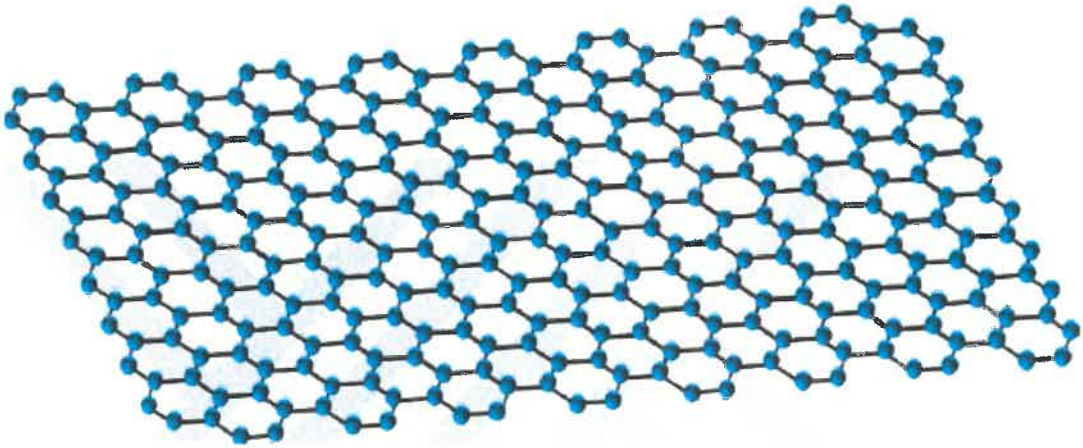
Geleneksel olarak, karbon, cam, aramid veya bazalt elyaflar ile güçlendirilmiş kompozitler, inşaat, mekanik, denizcilik, havacılık ve diğer birçok modern endüstride yapısal sistemlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Son zamanlarda, iyi ara yüzey bağları sağlayabilen KNT'ler, kompozitlerdeki matris fazlarının güçlendirilmesi için geleneksel lifler yerine kullanılmaktadır. KNT'lerin en önemli uygulamalarından biri, THz seviyesine kadar ulaşılabilen ultra yüksek bir frekans aralığına ve olası bir ultra yüksek hassasiyete yol açan istisnai mekanik özellikleri nedeniyle nano sensörleri tasarlamaktır. KNT ile güçlendirilmiş kompozitlerin mekanik davranışını analiz etmek ve etkili malzeme özelliklerini simüle etmek için, çeşitli deneyler, teorik modeller ve moleküler dinamik (MD) simülasyonu gibi atomik seviyede oluşturulan modeller sunulmuştur. Son on yılda, termal ortamda kullanılan değişken özelliklere sahip çok katmanlı MEMS ve NEMS üretimi için birçok talep ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, üretim teknolojileri, alt ve üst kısımlarında istenilen elektriksel ve mekanik özelliklere sahip, mikron ve daha küçük boyutlarda FD tabakalar yapmak üzere genişletildi. Bu nedenle, birçok araştırmacı FD mikro ve nano yapıların termal ve mekanik davranışına odaklanmıştır. Üretim teknolojisinin hızla gelişmesiyle, KNT'ler, farklı mühendislik uygulamalarında kullanılan polimer nano tabakalar için favori takviyeler olarak kullanılmaktadır.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, karbon nanotüp takviyeli kompozit (KNTTK) malzemeden oluşan kirişlerin boyut etkili burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Modelleme aşamasında, Değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi (DŞDDT) teorisi, Yüksek mertebeden kayma deformasyonu kiriş teorileri ve Bernoulli-Euler kiriş teorisi kullanılarak türetilen yönetici denklemler basit mesnetli KNTTK mikro kiriş için Navier çözüm yöntemi ile analitik olarak çözülmüştür.

1.1. Karbon Nanotüpler

Karbon nanotüpler (KNT): Karbon (C) elementi, periyodik tablonun 4A grubu ve 2. Periyodunda yer alan bir ametaldir. Tipik bir KNT, tüp şeklinde altıgen bir karbon atomu sistemine sahiptir ve bu altıgenlerin oluşturacağı grafen adlı yapının uzayda rulo gibi sarılmasından meydana gelen yapı basitçe karbon nanotüp yapısını tanımlar. Grafenin genel konfigürasyonu Şekil 1.2'de verilmiştir. KNT'ler, fulleren yapısal ailesinin bir parçası olan ve çok daha az çap (nanometre boyutunda) ve uzunlukta (mikrometre boyutunda) bulunan karbon allotropudur ve yapısında sadece karbon atomu bulunur. Davranışları tamamen sarmal doğalarına bağlıdır ve bu nedenle yarı iletken veya metal olarak davranırlar. 1985 yılında 60 veya daha çok karbon atomunun birleştirilmesiyle oluşan futbol topu şeklindeki moleküllerin bulunması, karbon

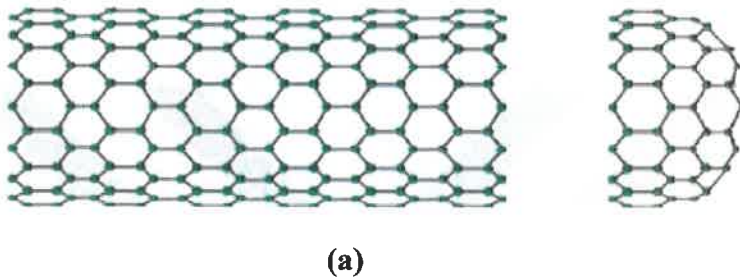
nanotüplerin ortaya çıkmasının ilk adımı olmuştur. İlk olarak 1991 yılında Japon Sumia Iijima tarafından fullerenlerin ark-buharlaşması sentezi sırasında katotta toplanan malzemeyi araştırırken tüp şeklindeki moleküller ile karşılaşmıştır. Kısa bir süre sonra Thomas Ebbeson ve Pulickel Ajayan, çeşitli ark-buharlaşması koşulları altında çok miktarda nanotüp üretilebileceğini göstermişlerdir. Ancak ark-buharlaşması metoduyla yalnızca çok katmanlı tüpler üretilebilmiştir. Daha sonra yapılan araştırmalarla, grafit elektrotuna kobalt gibi bazı metallerin eklenmesiyle tek katmanlı nanotüpler elde edilmiştir. Karbon nanotüpler, çok karmaşık bir yapıya sahiptirler. Uzunluk/çap oranı 1.000.000'dur. Uzunluk ve çap değerine göre, fiziksel ve kimyasal özellikleri kolayca değişebilir. Kendilerine has elektriksel özellikleri vardır ve ısıyı iyi iletir. 600 °C sıcaklığa kadar dayanmaktadırlar. KNT'lerin çekme mukavemeti çelikten 100 kat daha yüksektir ve elastik gerinimleri çeliğin yalnızca altıda biri olan özgül ağırlık ile 0.12'ye ulaşabilmiştir.



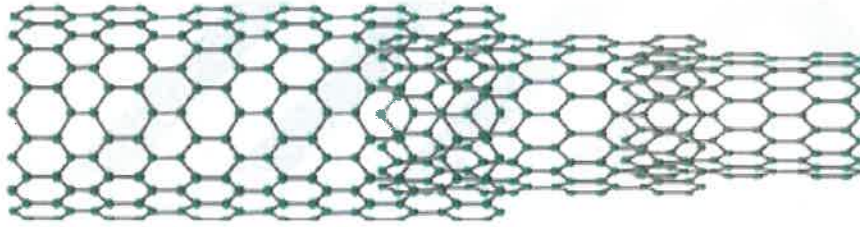
Şekil 1.2. Grafen örtü (Numanoğlu 2019)

1.1.1. Karbon nanotüp çeşitleri

KNT'ler, gruplandırılması, tüpte bulunan duvar sayılarına göre yapılır. Karbon nanotüpler iki tiptedir: tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT) (bkz. Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Duvar sayısına göre karbon nanotüp yapıları a) Tek duvarlı karbon nanotüpler b) Çok duvarlı karbon nanotüpler (Numanoğlu 2019)



(b)

Şekil 1.3. ün devamı

1.1.2. Tek duvarlı karbon nanotüpler

Tek duvarlı karbon nanotüpler, silindirik bir yapı oluşturan tek atomik grafit katmanından oluşur. TDKNT'lerin sabit çap aralıkları 0.4 ila 3 nm'dir (Balasubramanian ve Burghard 2005). Tek katmanlı nanotüpler katlanış şekillerine göre; koltuk, zikzak ve bükük şeklinde olabilir.

Çizelge1.1. Tek duvarlı Karbon Nanotüplerin Özellikleri

Özellik	Değer
TDKNT dış çapı	1-2nm
TDKNT İç çapı	0.8-1.6nm
TDKNT saflığı	>90 wt%
ÇDKNT içeriği	>5wt%
Amorf Karbon içeriği	<3wt%
TDKNT uzunluğu	5-30µm
TDKNT Spesifik yüzey alanı	407 m ² /g
TDKNT Elektriksel İletkenliği	>10 S/cm

1.1.3. Çok duvarlı karbon nanotüpler

ÇDKNT'ler, değişik çaplara sahip farklı TDKNT'ler bir araya getirildiğinde ve ağ benzeri bir yapı oluşturduğunda meydana gelir (Sun vd. 1998). ÇDKNT'lerin çapı 100 nm'ye kadar ulaşır. İç içe yerleştirilmiş birkaç grafit tüpten oluşur; çapı TDKNT'lerin on katına kadar çıkabilir. Mekanik ve fiziksel özellikleri duvar sayısına göre değişmektedir.

Çizelge 1.2. Çok duvarlı Karbon Nanotüplerin Özellikleri

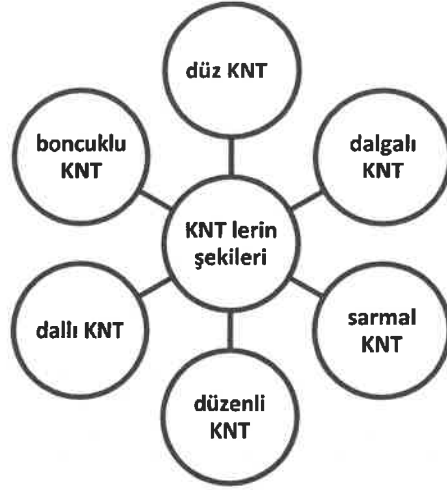
Özellik	Değer
Dış Çap	<8nm
İç Çap	2-5nm
Safılık	>95 wt%
Uzunluk	10-30µm
Spesifik Yüzey Alanı	500 m ² /g
Elektriksel İletkenlik	>10 ⁻² S/cm

Çizelge 1.3. Tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT'ler) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT'ler) arasında karşılaştırmalı çalışma (He vd. 2013)

TDKNT	ÇDKNT
Tek katmanlı grafen	Çok katmanlı grafen
Pahalı	Ucuz
6000 W/m · K aralığında termal iletkenlik	3000 W / m · K aralığında termal iletkenlik
Yarı iletken ve metalik özellikler (mükemmel alan emisyon kapasitesi)	Düşük fiziksel özellikler
Toplu sentez yapmak zordur	Toplu halde sentezlenmesi kolay
Kolayca bükülür	Zor bükülür
Sentez için katalizör gerekli	Katalizörsüz üretilir
Düşük safılık	Yüksek safılık
Daha az biriken gövde	Vücutta daha fazla birikim
İşlevselleştirme sırasında daha fazla kusur	Daha az kusur, ancak iyileştirilmesi zor

1.1.4. Karbon nanotüplerin özellikleri

Zhang vd. (2009) KNT'lerin çok sayıda şekle ve morfolojiye sahip olduğunu bildirdi (bkz. Şekil 1.4). Dahası, KNT'lerin şekillerine ve morfolojilerine bağlı olarak belirli farklı özelliklere ve potansiyel uygulamalara sahip olduğunu da vurguladılar.



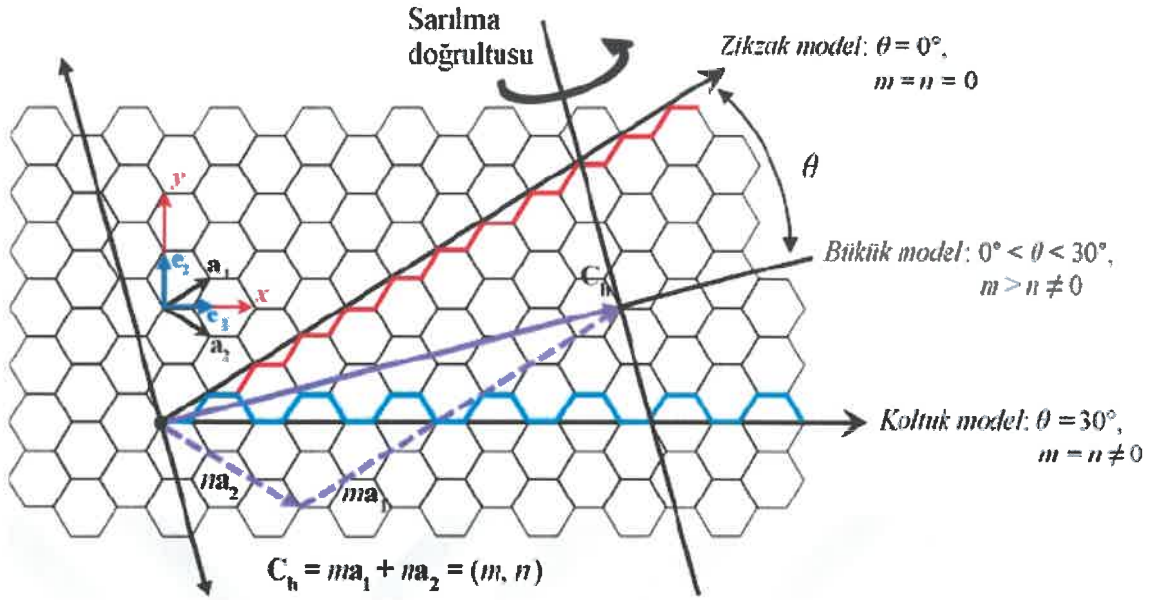
Şekil 1.4. Farklı KNT biçimleri (Zhang vd. 2009)

1.1.5. Yapısal özellikleri

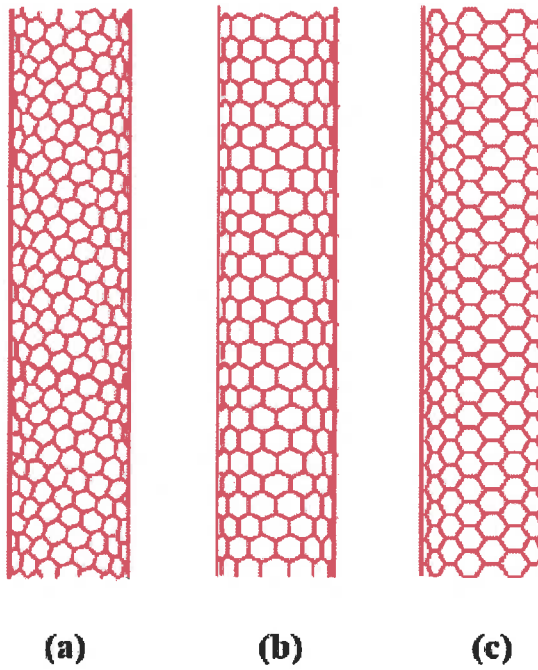
Karbon nanotüplerin yapısını incelemek amacıyla yapılan deneyler sonucunda nanotüplerin, kristal grafitlerden oluşan hekzagonal örgüdeki karbon atomlarının oluşturduğu silindirik yapılar olduğu anlaşılmıştır. Karbon nanotüpler iki temel formda yapılandırılır; tek katmanlı nanotüpler ve çok katmanlı nanotüpler olmak üzere ikiye ayrılır.

Tek katmanlı nanotüpler tek bir grafen tüptür; çapı birkaç nm, uzunlukları genellikle mikrometre seviyelerdedir.

KNT konfigürasyonları sarılma şekline göre koltuk, bükük veya zikzak model olarak üçe ayrılmaktadır. Değişik tip nanotüpler birim hücrelerine göre kolayca belirlenir, yani yapıyı belirleyen en küçük atom grubudur. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi nanotüpün kiriş vektörü C_h , a_1 ve a_2 hekzagonal örgüde birim vektörler olmak üzere (n ve m tamsayı). Diğer önemli bir parametre ise kiriş açısı; yani C_h ve a_1 arasında kalan açıdır. Grafit levha nanotüpün silindirik kısmını oluşturmak üzere rulo yapıldığında, kiriş vektörlerinin sonları çakışır. Böylelikle kiriş vektörü, nanotüpün dairesel kesitinin çevresini oluşturur. m ve n 'in değişik değerleri farklı nanotüp yapılarına sebep olur. Koltuk nanotüpü $n=m$ ve kiriş açısı 30° olduğunda, zikzak ise $n=0$ ya da $m=0$ ve kiriş açısı 0° olduğunda oluşur. Kiriş açıları 0° ile 30° arasında değişen nanotüpler ise bükük nanotüp olarak adlandırılır. Sarılma biçimi mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri etkiler. Farklı sarılma konfigürasyonları Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 1.5a Grafen örtünün sarılması (Numanoğlu 2019)



Şekil 1.5b Karbon nanotüplerin değişik sarılma açısına göre konfigürasyonları
a) Bükük b) Zikzak c) Koltuk (Numanoğlu 2019)

Birden fazla grafen yüzeyini üst üste koyarak katlanmasıyla da “çok katmanlı nanotüpler” elde edilir. Çok katmanlı nanotüpler, 4-30 nm çapında ve en fazla 1 mikrometre uzunluğundadır. Çok katmanlı karbon nanotüpler iki şekilde olabilir bunlar; matruşka ve parşömendir. Matruşka tipi nanotüp iç içe geçmiş tek katmanlı nanotüplerden oluşur. En içteki nanotüp en küçük, en dıştaki nanotüp ise en büyük çapa sahiptir.

1.1.6. Karbon nanotüplerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

-Bağ tipi polar olmadığı için suda çözünmezler.

-Tek katmanlı karbon nanotüpler toluen, dimetil fotmamit ve tetrahidrofuran gibi organik çözücüler ile kararlı çözeltiler oluşturabilirler.

-Vakumda 1500 ° C' ye kadar kararlı halde durabilirler, açık havada ise 750 °C'e kadar kararlıdır. Yüzey alanı-hacim oranı yüksektir.

-Çok katmanlı nanotüplerin kimyasallara karşı direnci, tek katmanlı nanotüplere göre daha yüksektir.

-Tek katmanlı nanotüplerde, kopan atomun altında başka bir atom bulunmadığı için, nanotüpteki karbon atomu kimyasal reaksiyon sonucu koparsa, boşluk oluşur.

-Çok katmanlı nanotüplerde ise alt katmandaki karbon boşluğu kapatacağı için yüzeyden karbon atomunun kopması boşluk oluşturmaz.

(<http://www.slideshare.net/kalyoncu89/karbonnanotpler-ve-teknolojide-kullanım>)

1.1.7. Mekanik özellikleri

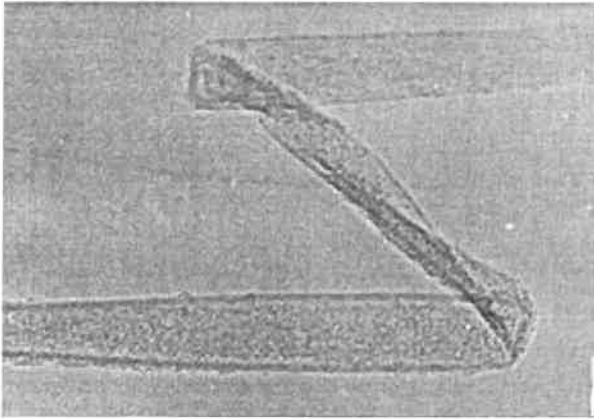
Güçlü kovalent bağ (sp²), KNT'lerin yüksek mekanik mukavemetini sağlar. Kuvvetli kuvvet uygulandıktan sonra orijinal yapısına zarar vermeden eğilme durumuna geçer ve yüzeyden kuvvet kalktıkça eski haline döner. C–C bağları nedeniyle KNT'ler eksenleri boyunca fevkalade kuvvetlidir ve eksenel yöndeki Young modülü değeri çok büyüktür. KNT'lerin mekanik mukavemeti nanopartiküllerin boyutuna göre değişir ve kompozitlerin mekanik mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Mükemmel karakteristikleri sayesinde, KNT'ler yalnızca bir takviye malzemesi olarak değil, aynı zamanda bir katkı malzemesi olarak da kullanılabilir.

Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri üzerine yapılan araştırmalar neticesinde çok değişik değerlerle karşılaşılmıştır (Bkz. Çizelge 1.4). Grafit ve karbon fiberleri gibi, nanotüplerin çok sağlam ve elastisite modülünün yüksek olması beklenmektedir. North Caroline Üniversitesi'nden Jerzy Bernhole ve arkadaşlarının hesaplarına göre bir nanotüp kırılmadan yüksek oranda uzayabilmektedir.

Çizelge 1.4. Bazı malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Gerilme Mukavemeti (GPa)	Yoğunluk (gr/cm ³)
TDKNT	1054	150	1.4
ÇDKNT	1200	150	2.6
Elmas	600	130	3.5
Çelik	208	1.0	7.3
Ahşap	16	0.008	0.4

Ayrıca bu esnek olma özelliklerinden dolayı karbon nanotüpler; bükülebilir, düzleştirilebilir, küçük daireler şeklinde kıvrılabilir. Ya da dışarıdan gelen çeşitli zorlamalar sonucunda kırılmadan kalabilir. Bernhole ve arkadaşları, nanotüp üzerindeki etki şekildiği zaman eski orijinal şeklini aldığını gözlemlemişlerdir (Bkz. Şekil 1.6).

**Şekil 1.6.** Karbon nanotüpün kuvvet altındaki davranışı

Ancak, aşırı zorlamalar sonucunda şekil değiştirmeler kalıcı olabilir. Baskı altında kolayca kırılan karbon fiberlerinin aksine, karbon nanotüpler etki uygulandığında yüksek elastikiyeti sağlayan tek benzer yapıyı oluştururlar. Sonuç olarak nanotüpler sadece karbon fiberlerden daha üstün niteliklere sahiptir. Bu özellikler tek başlarına ya da diğer özelliklerle birlikte kullanılabilir. Örneğin; bu moleküllerden az miktarda plastiğe katılarak, plastik elektriksel olarak iletken hale getirilmiştir. İletken plastikler, otomotiv sektöründe elektriksel olarak yüklü boya üretmek için

kullanılmaktadır. Bu elektrostatik boya, sprey boya yöntemine göre daha fazla boya tasarrufu sağlamaktadır.

1.1.8. Elektriksel özellikleri

KNT'lerin elektriksel iletkenliği metalik veya yarı iletken olabilir (Kang vd. 2006). KNT'lerin ısı yaymadan çok hızlı elektrik iletebileceği tahmin ediliyor. Sıcaklığın nanotüplerin direnci üzerinde büyük bir doğrudan etkisi vardır.

Karbon nanotüpler, mikro elektronikte faydalı olmalarını sağlayan yüksek akım taşıma kapasitesine sahiptir (Robertson 2007). KNT'lerin en yüksek akım yoğunluğu 109 A/cm^2 'dir (Kang vd. 2006). Örneğin, bakırın taşıdığı miktardan 1000 kat daha yüksektir.

1.1.9. Termal özellikleri

Termal genleşmeleri önemli derecede izotropiktir; oysa konvansiyonel grafit fiberler kuvvetli anizotropik malzemelerdir. Bu özelliğiyle KNT'ler kompozitler için önemli bir takviye malzemesidir. Nanotüplerin ısı iletkenliği de oldukça benzersizdir ve nispeten yüksektir. Nanotüp eksenini yönünde KNT'lerin ısı iletkenliğinin yaklaşık $1750\text{--}5800 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ olduğu görülmüştür.

KNT'ler, sp^2 kovalent bağların varlığı nedeniyle elmasan (sp^3) daha iyi termal iletkenliğe sahiptir. TDKNT'lerin ısı iletkenlik değeri, oda sıcaklığında $1800\text{--}6000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ aralığında belirtilmiştir. Bu değer, en yüksek termal iletken malzeme olarak bilinen elmasan $3320 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ daha yüksektir. Bununla birlikte, ÇDKNT'lerin ısı iletkenliğinin $3000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ olduğu belirtilmektedir. Polimerin ısı iletkenliği, matrislerine KNT'leri dahil ederek kolaylıkla değiştirilebilir ve bu potansiyel, KNT'lerin doğasından büyük ölçüde etkilenir.

1.1.10. Karbon nanotüplerin dayanıklılık özellikleri

Karbon nanotüpler sert malzemelerdir ve Young modülleri $1\text{--}1.4 \text{ TPa}$ aralığındadır (Kang vd. 2006). Young modülü, uygulamaları için belirli yapısal öğelerin kullanımı için ilk kontrol noktasıdır (Salvetat vd. 1999). Young modülü, karbon atomları arasında bulunan kovalent bağ modeline bağlıdır. Esnek sınırların altındaki gerilmeyle ilgili tasarımlar için yapısal mühendislikte Young modülünün kritik olduğu düşünülmektedir. KNT'lerin gerilme mukavemetini görürsek, 50 GPa 'lık bir mukavemet gösterirler (Kang vd. 2006). KNT'lerin aşırı esnekliği ile ilgili bu gerilme mukavemeti, kovalent bağlanma modellerinden kaynaklanmaktadır.

Karbon nanotüpler çekme dayanımı ve elastik modülü açısından keşfedilen güçlü malzemelerdir. Bu mukavemet bireysel karbon atomları arasında bir kovalent bağdan kaynaklanır. 2000 yılında, çok duvarlı karbon nanotüpte 63 GPa bir gerilme gücü tespit edilmiştir. 2008 yılında yapılan ilave çalışmalar, bireysel KNT kabukları kuantum/atomistik modelleri ile iyi bir uyum içinde yaklaşık 100 GPa , kadar güçlü olduğunu göstermiştir (Peng vd. 2008).

Basınçtaki davranışına gelince karbon nanotüpler güçlü değildirler. Çünkü KNT'lerin içi boş bir yapı ve yüksek en boy oranı, basınç altında burulma, bükülme eğilimindedir (Jensen vd. 2007).

$$\text{Elastisite modülü, } E = \frac{\text{çekme dayanımı}}{\text{kopma dayanımı}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$

F : Malzemeye uygulanan kuvvet A0: Kuvvetin uygulandığı dik kesit

L0: Malzemenin kuvvet uygulanmadan önceki uzunluğu

ΔL : Malzemedeki uzunluk değişimi

1.1.11. Karbon nanotüplerin elde edilme yöntemleri

KNT'ler doğal olarak oluşmaz ve bu nedenle laboratuvarlarda çeşitli deney düzenekleri ve teknikleri kullanılarak hazırlanabilir. Ijima tarafından 1991 ve 1993'te ark sentez teknikleri kullanılarak ÇDKNT'lerin ve TDKNT'lerin ilk kez hazırlanmasından bu yana, yüksek kaliteli KNT'lerin sentezindeki yoğun araştırma çalışmaları aceleyle artmıştır. Dahası, KNT'nin diğer karbon nano malzemelere kıyasla olağanüstü özellikleri sayesinde, KNT çok kısa bir süre içinde çok büyük bir alanda uygulanabilirliğini buluyor ve şimdi endüstriyel ölçekte üretiliyorlar. Kesin yapı ve özelliklere sahip yüksek oranda saflaştırılmış KNT'lerin geliştirme mekanizması ve büyük miktarda üretimindeki iyileştirme (Şekil 1.7), gerçek zamanlı uygulamaları ve KNT'lerin ilk oluşumundan bu yana ilgili temel araştırmalar için kritik öneme sahiptir.



Şekil 1.7. KNT özellikleri

Büyük boyutlarda nanotüp üretmek için birkaç teknik geliştirilmiştir. Tek katmanlı nanotüp üretmek için kısmen verimli olan şu yöntemler belirlenmiştir, bunlar lazer buharlaştırma, ark buharlaştırma, kimyasal buhar biriktirme ve mekanik öğütme yöntemidir.

1.1.11.1. Ark deşarjı (AD)

Ark deşarjı, nanotüplerin sentezinde kullanılan en eski yöntemdir. Ark buharlaşmasının ÇDKNT'lerin sentezi için en mükemmel yöntem olduğu düşünüüyordu (Harris 2007). Ark deşarj yönteminde, DC akımı içinden geçtiğinde bir ark oluşturmak için iki elektrot kullanılır (Sinha vd. 2006). Öncelikle elektrotlar bir vakum haznesine yerleştirilir ve daha sonra hazneye gaz verilir. Bu gaz, odacık içindeki plazma birikmeye yardımcı olduğundan, karbonun elektrotlar üzerinde hızlı bir şekilde

birikmesi için sabit bir hızda sağlanır. Bu teknikte iki önemli parametre vardır (1) kontrollü ark akımı ve (2) kontrollü gaz basıncı. Gazın basıncı reaksiyon odasında tutulur ve elektrik beslemesi açılır. Bundan sonra pozitif elektrot, negatif elektroda yaklaşır ve bunun sonucunda bir ark üretilir. Ark sırasında elektrotlar kırmızı sıcak hale gelir ve plazma oluşur. Daha sonra KNT'ler negatif elektrotlar üzerinde birikmeye başlar. Bu işlemle hem TDKNT'ler hem de ÇDKNT'ler sentezlenir. TDKNT'ler, uygun katalizör kullanılarak bu işlemle sentezlenirken, ÇDKNT'ler sadece gazın basıncı korunarak sentezlenir ve sentez için katalizör gerekli değildir. Bu tekniği kullanarak 2–20 nm çapa ve birkaç mikron uzunluğa sahip nanotüpleri büyütebiliriz.

1.1.11.2. Lazer ablasyon (LA)

Lazer ablasyon tekniği çoğunlukla TDKNT'leri geliştirmek için kullanılır. Adından da anlaşılacağı gibi lazer tedavisi nanotüplerin sentezi için kullanılmaktadır. Lazer ablasyon yöntemi, elektrik ark yönteminin kusurlarının üstesinden gelmek için daha gelişmiş bir formdur (Vajtai vd. 2004). Bu hem TDKNT'lerin hem de ÇDKNT'lerin üretimi için geçerlidir. Bu teknik, nanotüplerin daha büyük miktarlarda üretimi için rutin olarak kullanılmaktadır. Sentez prosedürü için, karbon hedefini çıkarmak için darbeli lazer kullanılır (Sinha vd. 2006). Bu şekilde, grafit hedefin darbeli lazer ablasyonu, katalizör ve gaz varlığında yapılır. Ortaya çıkan ürünler karbon nanotüplerdir. Ark deşarj ve lazer ablasyon, prensipte benzer metotlardır.

Daha önceki araştırmacılar tarafından yürütülen derinlemesine araştırmalardan bazıları, diğer KNT sentez teknikleriyle karşılaştırıldığında, LA tekniğinin en yüksek saflık, daha yüksek verim ve basit post-proses ile en güvenilir, çevre açısından zararsız ve umut verici TDKNT sentez yaklaşımı olduğunu göstermektedir. Bu deneylerle oluşturulan nanotüpler 5–20 nm çapında ve yüz ila birkaç mikron uzunluğundadır. Lazer ablasyon yöntemi ile KNT sentezinde bazı kusurlar gözlemlendi. Bu kusurlardan biri sentezden sonra elde edilen ürünlerin yüksek ısısıdır.

1.1.11.3. Kimyasal buhar biriktirme (KBB)

Kimyasal buhar biriktirme (KBB) tekniği, ölçeklenebilirlik, yüksek kaliteli ürün, kullanımda basitlik, süreçte daha yüksek kontrol, uygun maliyetli, düşük sıcaklıkta sentez ve enerji verimliliği gibi önemli avantajları nedeniyle araştırmacılar arasında daha fazla araştırma ilgisi kazanmıştır. KBB de KNT'lerin büyümesi, bir alt tabaka üzerinde desteklenen bir katalizör aracılığıyla gaz fazında karbon öncülerinin sirkülasyonu ile sağlanır ve gaz molekülünü reaktif atomik karbon yüksek sıcaklık enerji kaynağına ayrıştırmak için kullanılır. Şekil 1.8'de KNT'nin KBB sentezinde kullanılan işlem parametreleri görülmektedir.



Şekil 1.8. KNT'nin KBB sentezinde kullanılan işlem parametreleri

1.1.11.4. Mekanik öğütme

Mekanik öğütme ve ardışık tavlama nanotüp üretimi için basit yöntemlerdir. Mekanik öğütme işlemi oda sıcaklığında 150 saate kadar sürmektedir. Öğütmeyi takiben elde edilen toz, 1400°C'de 6 saatlik nitrojen ya da argon gazı akışı altında tavllanır. Bu oluşumun mekanizması tam olarak bilinmemekle birlikte mekanik öğütmenin nanotüp çekirdeğini oluşturduğu, tavlama işleminin nanotüp büyümesini hızlandırdığı düşünülmektedir.

1.1.11.5. Hidrotermal metotlar

Hidrotermal teknik, değişik karbon yapıların (nanoçubuk, nanotel ve ÇDKNT'ler gibi) başarıyla hazırlanabildiği diğer bir sentez metodudur. Bu prosesin, diğer metotlarla kıyaslandığında bazı avantajları vardır: Başlangıç maddesinin elde edilmesi kolaydır ve ortam sıcaklığında kararlıdır. Proses düşük sıcaklıkta (150–180 °C) yapılır. İşlemden taşıyıcı gaz veya hidrokarbona ihtiyaç olmaz.

Örneğin, ÇDKNT'lerin üretiminde polietilen ve su karışımı (Ni katalizli) 60-100 MPa basınç altında 700-800 °C'ye ısıtılır; duvar kalınlığı birkaç taneden >100 karbon

tabakaya kadar kapalı ve açık uçlu ÇDKNT'ler elde edilir. Hidrotermal nanotüplerin önemli özelliği duvar kalınlığının küçük, iç göbek çapının büyük (10-800 nm) olmasıdır.

1.1.12. Karbon nanotüpler: mevcut ve gelecekteki uygulamalar

Olağanüstü özelliklerinden dolayı, karbon nanotüpler (KNT'ler) halihazırda çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır ve piyasada yerini almaktadır. KNT'lerin fiyatı son birkaç yılda düşmesine rağmen, KNT içeren ürünlerin ekonomik olarak daha uygun hale gelmesi biraz zaman alabilir. Ancak bu, mühendislerin ve bilim adamlarının en çeşitli uygulamaları yaratmalarına engel değildir. KNT'lerin uygulama perspektifinden nanoteknoloji alanında, nanotıp, transistör, vakumlu elektronik cihazlar, biyosensörler, membranlar ve kapasitörlerde kullanılabilir.

1.1.12.1. Elektrokimyasal sistem uygulamaları

(Endo vd. 2008) KNT'lerin elektrokimyasal sistemlerde faydalı olduğu bulunmuştur. Elektrokimyasal sistem uygulamalarından biri de lityum iyon pildir. Lityum-iyon pilde karbon nanotüplerin kullanılması, onları potansiyel olarak faydalı anot haline getirmektir. Bu bağlamda, nanolifler elektrot yüzeyinde ince bir homojen karışım filmi oluşturarak kendilerini ayarlarlar. Bu liflerin yayılması, bir anodun yüzey alanını artırır ve elektrolit, elektrotla daha iyi temas eder. Bu, elektrotların elektriksel arayüz iletkenliğini artırır. Anot ve nanotüpler/nanolifler üzerinde bir grafit parçacığı ağı oluşumu vardır. Bunlar bir tüp paspası oluşturur. Bu tüp mat oluşumu ile elektrotlarda yüksek esneklik elde edilir ve döngüde anot malzemesinin kapasitesini düşürmez. Nanofiberlerin eşit dağılımı, anodu çevreleyen elektrolitin penetrasyon kabiliyetini artırır ve Lityum-iyon pilin döngüsel aktivitesi, karbon siyahına kıyasla iyileştirilir. Ayrıca KNT'ler, kurşun asit pillerin elektrotlarına katkı maddesi olarak da kullanılır. KNT'lerin döngüsel davranışının, özdeş elektrotun aktif anot malzemesine nanofiber / nanotüplerin eklenmesiyle büyük ölçüde geliştirildiği görülmüştür. Direnç ayrıca KNT'ler anoda eklendiğinde azalır. Negatif elektroda bu nanotüplerin küçük bir miktarı eklendiğinde, katkısız elektroda göre döngüsel özelliklerini artırdığı görülmüştür. Bu, bağlama kabiliyetinden kaynaklanmaktadır ve malzemenin elektrotlardan dökülmesini veya elektrotların tahrip olmasını önler. Bu, elektrottaki aktif materyalin kullanımını artırır.

1.1.12.2. Nanotüplerin kimya alanındaki uygulamaları

Karbon nanotüpler, kimyasal ve mekanik sensörlerde kullanılmışlardır (Peng vd. 2003). Bu bağlamda, karbon nanotüpler, bir gaz sensör cihazında algılama işlevini gerçekleştirdikleri iki elektrot arasında iletken bir yol olarak kullanılır. Bu konfigürasyonda, nanotüplerin iletkenliği moleküller tespit edildiğinde değişir. Bu, kimyasal sensör cihazlarında karbon nanotüplerin kullanımına bir örnektir.

1.1.12.3. Tıbbi uygulamalar

KNT'ler en çarpıcı uygulamalarını biyomedikal alanlarda buldular. Tıp alanlarının farklı yönlerinde olumlu sonuçlar alınmaktadır. İlaç dağıtım sistemi ve çok daha fazla uygulamada çok faydalıdır.

1.1.12.4. Nano-gözenekli membran sistemi

Membranlar kimyasal ayırmada, ilaç dağıtım sisteminde ve atık su ıslahında çok önemlidir (Melechko vd. 2005). Bu bağlamda nano-gözenekli membran çok etkilidir. Nano-gözenekli membranlar, ince bir polimer filmine gömülerek membrana dahil edilen dikey olarak hizalanmış karbon nanotüpler tarafından hazırlanır. Başka türlerde nanotüpler, akışa dik yönde yerleştirilebilir. Bu tür membranlar, örneğin hücre membranı işlevselliğini taklit etmek için mikro-akışkan kanallarında kullanılır.

1.1.12.5. Nanoproblar ve sensörler

KNT'lerin, yarı iletken malzemelerin çeşitli yüzeylerini araştırmada, yüksek çözünürlüklü görüntülemeye, ilaç dağıtımında ve farklı sensör türlerinde uygulamaları vardır (Ajayan ve Zhou 2001; Shoukat ve Khan 2018b, 2019; Shoukat 2020; Beumer 2016; Khan vd. 2017, 2018b; Khan ve Lin 2014). Bu bağlamda, atomik kuvvet mikroskobu (AKM), farklı yüzeyleri araştırmak için önemli bir cihazdır (Melechko vd. 2005). Gelişmiş fabrikasyon teknikleri ile AKM'nin uçları, 10 nm'ye kadar kullanılabilir kadar küçüktür. Bu AKM ucunun kullanımındaki bir kusur, silikondan yapılmış ucun parlak yüzeyidir. Bu uç hızla yıpranır ve görüntü çözünürlüğünde bozulma meydana gelir. Bu dezavantaj, KNT'lerin kullanılmasıyla giderilir. Bu tüplerin çapı (1-10) nm mertebesinde, bu nedenle bunlar çok etkilidir ve çok yüksek çözünürlüklü görüntüye sahiptir. Bu amaçla KNT'ler silikon yüzeyinde KBB yöntemi ile büyütülür ve AKM uç oluşumunda kullanılır.

Spor endüstrisinde nanotüplerin birkaç uygulaması bulunmaktadır. Kanada'daki Nanoledge şirketi, tenis racketlerini daha güçlü ve daha hafif hale getirmek için karbon nanotüpler (KNT'ler) kullanmaktadır (Şekil 1.9). Finlandiya'dan Montreal şirketi, hokey sopası üretiminde ÇDKNT'ler kullanmaktadır (Şekil 1.10). Ayrıca, Zyvex şirketi beysbol sopalarının üretimi için dağıtık KNT'ler içeren reçinelere başvurmaktadır (Şekil 1.11).

Denizcilik sektöründe Synergy Yachts şirketi, Synergy 350RL yelkenli teknesinin bir kısmının imalatında karbon malzemelerden faydalanmıştır (Şekil 1.12). Gövdenin tamamı karbon fiberden yapılmıştır, oysa direk dağıtık KNT'ler içerir. Arabalarda ve uçaklarda dağılmış KNT'lerin uygulanması da şu anda incelenmektedir. Nanotüplerin ulaşımında da uygulamaları vardır. BMC, dağıtık KNT'ler içeren dünyanın ilk bisikletini üretti ve Tour de France 2006'da kullanılmıştır (Şekil 1.13). 1 kg'dan daha az kütleye sahip bu bisikletin dayanımında da herhangi bir problem yoktur.



Şekil 1.9. Karbon nanotüplerden yapılmış tenis raketi



Şekil 1.10. Çok duvarlı karbon nanotüplerle üretilen hokey sopaları



Şekil 1.11. Karbon nanotüplerle üretilmiş beysbol sopası



Şekil 1.12. Direği güçlendirmek için karbon fiberler ve nanotüplerle yapılmış yelkenli tekne



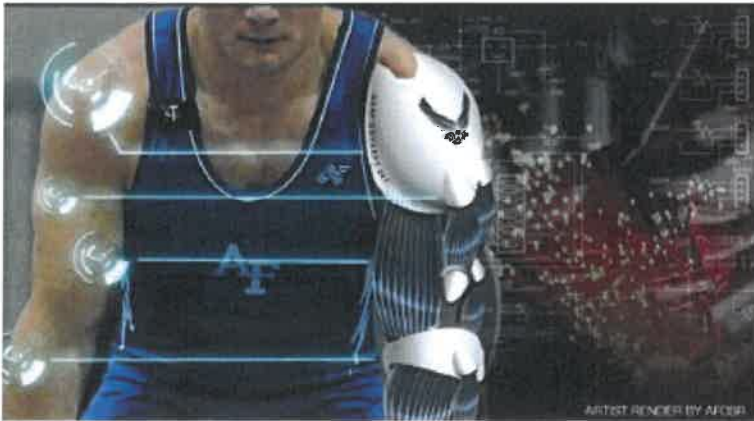
Şekil 1.13. Karbon nanotüplerden yapılmış bisiklet

Son zamanlarda, bir rüzgar türbininin kanatlarını küçük ölçekte üretmek için karbon nanotüpler kullanıldı (Şekil 1.14). İnşa edilen prototip cam elyaf ve poliüretandan oluşmaktadır. KNT'lerin eklenmesi bıçakların yorulma direncini artırılmıştır.



Şekil 1.14. Karbon nanotüplerden yapılmış rüzgar türbini kanatları

UT Dallas Alan G. MacDiarmid NanoTech Enstitüsü'ndeki araştırmacılar, elektriği kimyasal enerjiye dönüştürürken genişleyen ve büzülen bir KNT aerogeli geliştirmişlerdir. KNT'ler birçok kez sıkıştırıldıktan sonra şeklini koruyabildikleri için yapay kaslar için çok uygundur (Şekil 1.15). Aerogel formundayken, ağırlık kaldırmanın doğal kaslara yaptığı gibi, tüpler stres altında daha yoğun büyür. Doğal kaslar saniyede yaklaşık %20 oranında kasılabilirse de yeni yapay kaslar saniyede yaklaşık %30.000 kasılabilir.



Şekil 1.15. Karbon nanotüp tabanlı bir yapay kas oluşturma çabalarının sanatsal görünümü

KNT'ler mükemmel alan yayıcılarıdır ve iletken yüzeyler için mükemmeldir. 2008 yılında Samsung, dünyanın ilk karbon nanotüp renkli aktif matris elektroforetik ekranı tanıtmıştır. Elektroforetik ekran arka aydınlatma gerektirmediğinden enerji tüketimi minimumdur ve doğrudan güneş ışığı altında görülebilmektedir (Şekil 1.16). Ayrıca, ekrandaki görüntü, sürekli yenilenmeye gerek kalmadan korunur. Bu teknoloji, mobil cihazlar için düşük enerjili bir görüntüleme seçeneğidir.



Şekil 1.16. Samsung ekranı

2. KAYNAK TARAMASI

Karbon nanotüp takviyeli kompozit mikro kirişlerin statik yükler altındaki davranışları birçok araştırmacı tarafından analitik ve deneysel olarak araştırılmıştır.

2.1. Teorik Çalışmalar

Kong (2021) tarafından yapılan derleme makale çalışmasında DGÇT'ye dayalı mevcut boyuta bağlı mikro kiriş ve mikro plaka modelleri gözden geçirilmiştir. Mikro kirişler ve mikro plaklar için statik eğilme, titreşim ve burkulma için mikro yapıların ilgili mekanik modelleri DGÇT'ye dayalı ulaşılan analitik ve sayısal çözümler sunulmuştur. Sonuçlar, mikro yapıların mekanik özellikleri üzerindeki boyut etkilerinin açık ve önemli olduğunu göstermiştir.

Akgöz ve Civalek (2011) DŞDD ve DGÇ teorilerine dayanan mikro boyutlu kirişin burkulma problemini ele almışlardır. Modellemede Bernoulli–Euler kiriş teorisi kullanılmıştır. Varyasyon prensibi kullanılarak, burkulma için boyut etkili yönetici denklemler ve ilgili sınır koşulları elde edilmiştir. Basit mesnetli ve konsol kiriş durumları dikkate alınmıştır.

Ansari vd. (2011) fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) mikro kirişlerin serbest titreşim analizini DŞDD teorisine dayalı olarak gerçekleştirmişlerdir. Modellemede Timoshenko kiriş teorisi ve Mori-Tanaka homojenizasyon tekniğini kullanmışlar. Hamilton prensibi yardımıyla boyut etkili hareket denklemleri ve sınır koşulları elde edilmiştir. Basit mesnetli FD mikro kirişlerin serbest titreşim davranışları Navier yöntemini kullanarak kapsamlı biçimde araştırılmıştır.

Akgöz ve Civalek (2013) tarafından DŞDD teorisine dayalı yüksek mertebeden kayma deformasyonlu boyut etkisini dikkate alan bir kiriş modeli geliştirilmiştir. Hamilton ilkesi ile boyut etkili yönetici diferansiyel denklemler ve ilgili sınır koşulları elde edilmiştir. Basit mesnetli mikro kirişlerin eğilme ve serbest titreşim davranışları Navier yöntemini kullanarak incelenmiştir.

Akgöz ve Civalek (2014) tarafından Winkler elastik zemin üzerindeki FD mikro kirişlerin termal etkileri hesaba katan burkulma analizi, sinüzoidal kayma deformasyon kirişine ve DGÇT'ye dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca düzgün ve sürekli olarak değiştiği varsayılmaktadır. Yönetici denklemleri ve bunlara karşılık gelen sınır koşulları, minimum toplam potansiyel enerji ilkesi yardımıyla elde edilmiştir. Kalınlık-malzeme uzunluk ölçeği parametre oranı, malzeme özelliği değişim indeksi, narinlik oranı, sıcaklık değişimi ve Winkler parametresinin elastik zemin üzerindeki FD mikro kirişlerin kritik burkulma yükleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Zhang vd. (2014) Winkler-Pasternak elastik zemini üzerindeki FD mikro kirişlerin eğilme, titreşim ve burkulma davranışlarını irdelemişlerdir. Modellemede geliştirilmiş üçüncü mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi ve DŞDD teorisi kullanılmıştır. Navier çözüm yöntemi ile basit mesnetli kiriş için analitik çözüm elde edilmiştir.

Akbarzadeh-Khorshidi (2019) çift katmanlı bir viskoelastik temel içine gömülü viskoelastik bir mikro kirişin doğrusal olmayan burkulma analizini araştırmıştır. Bu viskoelastik mikro kiriş, Kelvin-Voigt modeli ve DGÇ teorisi kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışmada kullanılan visko-Pasternak temel, bir viskoelastik ortamı ve bir kesme tabakasıdır. Euler-Bernoulli kiriş teorisine ve von-Karman doğrusal olmama durumuna göre, zamana bağlı hareket denklemleri Hamilton prensibinden türetilmiştir. Doğrusal olmayan hareket denklemleri, basit mesnetli sınır koşulu altında çözülmüştür. Hem zamana bağlı sapma hem de viskoelastik burkulma yükü incelenmiştir. Son olarak, malzeme uzunluğu ölçeği parametresinin etkileri, visko-Pasternak temelinin parametreleri ve malzeme viskozite katsayısının dinamik karıştırma sonrası tepkisi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Akbarzadeh-Khorshidi ve Shariati (2019) bir mikro/nano kirişteki çatlağın DGÇ teorisine dayalı eksenel basınç yükü altında modellenmesi için çok yaylı bir model kullanmışlardır. Bu model, eğilme momentini iletmek için eşdeğer bir dönme yayı ve eksenel kuvveti çatlaktan dolayı iletmek için eşdeğer bir uzunlamasına bir yay içerir. Bu da çatlağın mevcudiyetine bağlı süreksizliklerin modellenmesinin desteklenmesine yol açmıştır. Ayrıca, bu çalışma, çatlak kesitindeki süreksizlikler üzerindeki eğilme momenti ve eksenel kuvvet arasındaki bağlantılı etkileri ele almıştır. Bu nedenle, süreklilik koşullarında dört elastik sabiti belirlenmiştir. Bu dört sabit, çatlak derinliğinin bir fonksiyonu olarak ayrı ayrı elde edilmiştir. Son olarak, elastik sabitleri, çatlak derinliği ve çatlak konumunun kritik burkulma yükü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Akbarzadeh-Khorshidi ve Shariati (2017) tarafından burkulma analizi ve bir açık kenar çatlağı içeren Euler-Bernoulli mikro-kirişlerinin doğrusal olmayan burkulma tepkisi, DGÇ teorisine dayalı olarak incelenmiştir. Çatlak kesit, kütsüz elastik bir dönel yay ile modellenmiştir. Bu model, bir malzeme uzunluğu ölçek parametresi içerir ve boyut etkisini yakalayabilmiştir. Kritik burkulma yükünün analitik çözümleri basit mesnetli mikro kirişler için sunulmuştur.

Şimşek ve Reddy (2013) DGÇ teorisine dayanarak, Pasternak zemine gömülü FD mikro kirişin çeşitli kiriş teoriler ile burkulma analizini yapmışlardır. Yönetici denklemleri ve sınır şartlarını türetmek için minimum toplam potansiyel enerji ilkesini kullanmıştır. Navier çözümü ile basit mesnetli FD mikro kirişin analitik çözümünü elde etmişlerdir.

Mohammad-Abadi (2015) tarafından tabakalı kompozit mikro kirişlerin boyuta bağlı burkulma analizi üzerindeki termal etki, DGÇ teorisine dayalı olarak incelenmiştir. Yönetici denklemleri ve sınır koşulları, minimum potansiyel enerji ilkesi kullanılarak elde edilmiştir. Kayma deformasyonunun etkisi, Timoshenko ve Reddy kiriş teorileri dikkate alınarak incelenmiştir. Ek olarak, basit mesnetli, konsol, ankastre mesnetli-mafsallı ve iki ucu ankastre mesnetli sınır koşullarını kullanarak ve dört çeşit çapraz katlı lamine uygulayarak tabakalamanın etkisi, yani $[0, 0, 0]$, $[0, 90, 0]$, $[90, 0, 90]$ ve $[90, 90, 90]$ incelenmiştir. Fourier serisi açılımlarını kullanarak, yöneten denklemler ve sınır koşulları, sadece basit mesnetli durum için analitik olarak çözülmüştür. Ayrıca, genelleştirilmiş diferansiyel kuadratur (GDK) yöntemi kullanılarak, tüm sınır koşulları için geçerli denklemler ve sınır koşulları sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal çözüm, analitik çözüm ve literatürden elde edilen sonuçların karşılaştırılması, GDK yönteminin doğruluğunu ortaya koymuştur.

Abadi ve Daneshmehr (2014) üç mikro kiriş modelinin burkulma analizini DGÇ teorisine dayalı olarak incelemiştir. Euler-Bernoulli, Timoshenko ve Reddy kiriş teorileri kullanılarak kayma deformasyonunun etkisi araştırılmıştır. Sınır koşulunun etkisini incelemek için üç farklı sınır koşulu dikkate alınmıştır. Poisson etkisiyle birleştirilen bu klasik olmayan mikro kiriş modelleri, bir malzeme uzunluğu ölçek parametresi içerir ve boyut etkisini yakalayabilmiştir. Hem malzeme uzunluğu ölçeği parametresi hem de Poisson oranı sıfır olarak alınırsa, bu modeller klasik modellere dönüşebilmektedir. GDK yöntemi kullanılarak farklı durumlar için sayısal çözüm elde edilmiştir.

Ke vd. (2011) tarafından DGÇ teorisine göre sıcaklık değişiminin etkisi ile mikro kirişlerin serbest titreşimi ve burkulması incelenmiştir. Bir malzeme uzunluğu ölçek parametresi içeren klasik olmayan Timoshenko kiriş modeli, mikro ölçekli yapılarda boyut etkisini yorumlamak için geliştirilmiştir. Yüksek mertebeden yönetici denklemleri ve sınır koşulları, Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiştir. Diferansiyel kuadratür yöntemi, farklı sınır koşullarına sahip mikro kirişlerin doğal frekansını ve kritik burkulma yükünü belirlemek için kullanılmıştır. Sıcaklık değişiminin, uzunluk ölçek parametresinin, narinlik oranının ve uç destekli koşulların mikro kirişlerin serbest titreşimi ve burkulması üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Sonuçlar, mikro kirişlerin kalınlığı, malzeme uzunluğu ölçeği parametresine benzer bir değere sahip olduğunda, temel frekans ve kritik burkulma yükü üzerindeki termal etkinin az olduğunu, ancak mikro kirişlerin kalınlığı büyüdüğünde önemli hale geldiğini göstermiştir.

Ebrahimi ve Mahmoodi (2019) gözenekli FD mikro kirişin burkulma davranışını DGÇ teorisi ile incelemiştir. Gözenekler, FD mikro kirişin içinde eşit ve eşit olmayan bir şekilde dağıtılmıştır. FD mikro kirişlerin malzeme özellikleri, gözeneklerin hacim fraksiyonunun dikkate alındığı modifiye edilmiş bir kuvvet kanunu dağılımı yoluyla kalınlık yönünde değiştiği varsayılmıştır. Yönetici denklemleri Hamilton ilkesi kullanılarak türetilmiş ve bu denklemleri çeşitli sınır koşulları için çözmek için analitik bir yöntem kullanılmıştır. Kuvvet yasası indeksi, gözenek dağılımları, gözenekli hacim oranı, narinlik oranı ve çeşitli sınır koşulları gibi birçok önemli parametrenin, gözenekli FD mikro kirişlerin burkulma yükleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Nateghi vd. (2012) tarafından FD mikro kirişlerin DGÇ teorisine dayalı burkulma analizi çalışılmıştır. Kayma deformasyonlarının etkisini incelemek için üç farklı kiriş teorisi kullanılmıştır. Sınır koşullarının etkisini irdelemek için iki ucu mafsallı, iki ucu ankastre ve ankastre-mafsallı kirişler incelenmiştir. Geçerli denklemler ve sınır koşulları, minimum potansiyel enerji ilkesi kullanılarak türetilmiştir. Daha sonra elde edilen diferansiyel denklemleri çözmek için GDK yöntemi uygulanmıştır. Malzeme uzunluğu ölçek parametresi, kiriş kalınlığı, Poisson oranı ve malzeme dağılım indeksinin boyuta bağlı burkulma yükü üzerindeki etkilerini incelemek için bazı sayısal sonuçlar sunulmuştur. DGÇ teorisi ile öngörülen burkulma yüklerinin, özellikle ince kirişler için klasik olanlardan önemli ölçüde saptığı görülmüştür. FD mikro kirişlerin boyut bağımlılığının, malzeme dağılım indeksinin bir fonksiyonu olduğu için izotropik homojen mikro kirişlerden farklı olduğu gösterilmiştir.

Kocatürk ve Akbaş (2013) DGÇ teorisine dayanan bir darbe kuvvetinin etkisi altında bir konsol mikro kirişin serbest ucunun tepkilerini sunmuştur. Kirişin malzemesi için Kelvin-Voigt modeli kullanılmıştır. Ele alınan problem Bernoulli-Euler kiriş teorisinde enerji bazlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Hareket denklemleri, Lagrange denklemleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen diferansiyel denklem sistemi, lineer cebirsel denklem sistemine indirgenmiş ve Newmark ortalama ivme yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Çalışmada, dalga yayılımı için DGÇ teorisi ile klasik kiriş teorisinin farkı araştırılmıştır. Malzeme uzunluk ölçeği parametresinin dalga yayılımına etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sonuçlardan, kiriş yüksekliğinin küçük değerleri için klasik teori yerine DGÇ teorisine dayanan kiriş modelinin kullanılması gerektiği açıkça görülmüştür.

Ma vd. (2008) mikro yapıya bağlı bir Timoshenko kiriş modeli, varyasyonel bir formülasyon kullanılarak geliştirilmiştir. DGÇ teorisine ve Hamilton ilkesine dayanmıştır. Yeni model, bir malzeme uzunluğu ölçek parametresi içerir ve klasik Timoshenko kiriş teorisinin aksine boyut etkisini yakalayabilmiştir. Ayrıca hem eğilme hem de eksenel deformasyonlar dikkate alınır ve Poisson etkisi, mevcut Timoshenko kiriş modellerinden farklı olan bu modele dahil edilmiştir. Yeni geliştirilen klasik olmayan kiriş modeli, malzeme uzunluğu ölçek parametresi ve Poisson oranı sıfır olarak ayarlandığında klasik Timoshenko kiriş modeline indirgenebilmektedir.

Dos Santos ve Reddy (2012) tarafından kirişlerin serbest titreşim ve burkulma analizleri için DGÇ teorisine dayalı bir model sunulmuştur. Model aynı zamanda Poisson etkisini de içermektedir. Doğal frekanslar ve burkulma yükleri, Ritz yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Parametrik çalışmalar, doğal frekansların ve burkulma yüklerinin malzeme boyut ölçek parametresinin artmasıyla artarken, Poisson oranının belirli değerlerinde minimum olduklarını göstermiştir.

Khajueenejad ve Ghanbari (2015) tarafından TDKNT'ler için DGÇ teorisine göre boyut ölçek parametresi belirlenmiştir. TDKNT'lerin burkulması, Timoshenko kiriş modeli ile incelenmiştir. Mafsallı-mafsallı, ankastre-ankastre ve konsol olmak üzere üç farklı durum için yönetici denklemleri, varyasyonel yöntemler kullanılarak çözülmüş ve burkulma yükü için kesin bir çözüm sağlanmıştır. Boyut ölçek parametresinin çeşitli KNT uzunluk ve çaplarının burkulma yükü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Boyut ölçek parametresinin daha yüksek burkulma modları ve daha kısa nanotüpler üzerinde daha büyük etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar daha doğru moleküler dinamik simülasyonları ile ilişkilendirilerek, boyut ölçek parametresi zikzak ve koltuk nanotüpleri için hesaplanmıştır. Boyut ölçek parametresinin KNT'lerin boyutuna biraz bağımlı olduğu ve ortalama bir değer sağlandığı görülmüştür.

Reddy (2011) FD doğrusal olmayan mikro Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş modellerini, virtüel iş ilkesi kullanılarak geliştirmiştir. Formülasyon, DGÇ teorisine, malzemenin kuvvet yasası varyasyonuna ve von Kármán geometrik doğrusal olmama yaklaşımına dayanmıştır. Model, klasik Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorilerinin aksine, FD bir malzemedeki boyut etkisini yakalayabilen bir boyut ölçek parametresi içermektedir. Parametrenin statik eğilme, titreşim ve burkulma üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Karamanlı ve Vo (2021) tarafından iki yönlü FD gözenekli mikro kirişlerin yapısal davranışları için yarı-üç boyutlu kiriş teorisine ve DŞDD teorisine dayanan sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada boyut etkilerini doğru bir şekilde yakalamak için üç malzeme boyut ölçek parametresi kullanılmıştır. Malzeme özellikleri hem eksenel hem de kalınlık yönlerinin yanı sıra gözeneklilik açısından değişmektedir. Normal ve kayma deformasyonlarını içeren yarı-3 boyutlu bir teori kullanılarak, statik eğilme, titreşim ve burkulma analizi için yönetici denklemler, çeşitli sınır koşulları için çözülmüştür. Sayısal örneklerle, değişken boyut ölçek parametresi ve gözenekli yapı ile iki yöndeki değişim indeksinin FD gözenekli mikro kirişlerin deplasmanları, doğal frekansları ve burkulma yükleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kumar ve Srinivas (2017) KNT ile karbon takviyeli polimer katmanlarını içeren fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüp (FD-KNT) ile güçlendirilmiş polimer ve hibrit lamine kompozitten oluşan kirişlerin statik ve dinamik davranışları üzerine sayısal bir analiz yapmıştır. Konvansiyonel elyaflar, KNT'ler ile karşılaştırıldığında daha yüksek yoğunluğa sahiptir, bu nedenle fiber takviyeli kompozit yapılara FD-KNT takviyeli polimer tabakasının eklenmesi, onları ağırlık açısından kritik uygulamalar için sürdürülebilir bir aday haline getirmiştir. Bu bağlamda, Timoshenko kiriş teorisi yardımıyla çok katmanlı bir kompozit sistemin formülasyonları belirlenmiş olup daha sonra hareket denklemlerini türetmek için virtüel iş prensibi kullanılmıştır. Burada, KNTTK ve fiber takviyeli kompozit tabakalarının malzeme özelliklerini değerlendirmek için genişletilmiş karışım kuralı ve geleneksel mikromekanik ilişkiler kullanılmıştır. Genelleştirilmiş bir öz değer problemi, son eleman yaklaşımı kullanılarak formüle edilmiş ve tek katmanlı FD-KNTTK kiriş ve çok katmanlı lamine hibrit kompozit kiriş için çözülmüştür. İlk olarak, FD-KNTTK doğal frekansları hesaplanmış ve önceden mevcut sonuçların yanı sıra Ritz yaklaşım sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, farklı KNT hacim fraksiyonunun, nanotüpte duvar sayısının, dağılım profillerinin, sınır koşullarının ve kiriş-narinlik oranlarının etkisini yorumlamak için FD-KNTTK kiriş için serbest titreşim, eğilme ve burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir.

Wattanasakulpong ve Ungbhakorn (2013) KNTTK kirişlerin eğilme, burkulma ve titreşim davranışlarını incelemiştir. Pasternak elastik zemini üzerine oturan kirişler dikkate alınmıştır. TDKNT farklı takviye modelleri ile polimer matris içinde hizalanmış ve dağıtılmıştır. KNTTK kirişlerinin malzeme özellikleri karışım kuralı kullanılarak tahmin edilmiştir. Çeşitli kayma deformasyon teorileri kullanılmıştır. Bu çalışmada sağlanan matematiksel modeller, bazı mevcut sonuçlarla karşılaştırılarak sayısal olarak doğrulanmıştır. KNTTK kirişlerin çeşitli yüksek mertebeden kayma deformasyon teorilerine dayanan eğilme, burkulma ve titreşim analizlerinin yeni sonuçları ayrıntılı olarak sunulmakta ve tartışılmaktadır. Kiriş tiplerinin çeşitli yönlerinin, zemin parametrelerinin ve karbon nanotüp hacim fraksiyonunun etkileri araştırılmıştır.

Yas ve Samadi (2012) elastik bir zemin üzerine oturan TDKNT'ler ile güçlendirilmiş nano kompozit Timoshenko kirişlerinin serbest titreşimleri ve burkulma analizini ele almıştır. TDKNT'lerin tek tip bir düzen ile hizalı ve düz olduğu varsayılmıştır. Kalınlık boyunca KNT'lerin düzgün dağılı (DD) ve üç tip FD dağılımları dahil olmak üzere dört farklı karbon nanotüp (KNT) dağılımı dikkate alınmıştır. Karışım kuralı, nano kompozit kirişlerin etkili malzeme özelliklerini tanımlamak için kullanılmıştır. Yönetici denklemler, Hamilton ilkesi kullanılarak türetilmiş ve daha sonra GDK yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Farklı sınır koşullarına sahip nano

kompozit kirişler için doğal frekanslar ve kritik burkulma yükü elde edilmiştir. Nanotüp hacim oranı, zemin parametreleri, narinlik oranları, KNT dağılımı ve sınır koşulları gibi birçok parametrenin hem doğal frekans hem de kritik burkulma yükü üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Tagara vd. (2015) tarafından elastik temel üzerindeki KNTTK kirişlerin eğilme, burkulma ve serbest titreşim analizi için trigonometrik bir kiriş teorisi geliştirilmiştir. Bu modelin önemli özelliği, kayma deformasyon etkisini dahil etmenin yanı sıra, kayma düzeltme faktörüne ihtiyaç duymamasıdır. TDKNT'ler, farklı takviye modelleriyle polimer matris içinde dağıtılmıştır. KNTTK kirişlerinin malzeme özellikleri karışım kuralı kullanılarak tespit edilmiştir. Kirişin farklı parametrelerinin KNTTK kirişinin eğilme, burkulma ve serbest titreşim tepkileri üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Liew vd. (2015) yazmış olduğu derleme makalesinde FD-KNTTK ile ilgili konuları belirlemeye ve vurgulamaya çalışmakta ve bu konularda yapılan son araştırma çalışmalarını gözden geçirmektedir.

Zerrouki vd. (2020) FD-KNTTK kirişlerindeki karbon nanotüp hacim fraksiyonunun doğrusal ve doğrusal olmayan dağılımının, yüksek mertebeden kayma deformasyon teorilerini kullanarak kritik burkulma yükü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Burada, KNTTK kirişlerinin malzeme özelliklerinin, karbon nanotüp hacim fraksiyonları cinsinden yeni bir üstel kuvvet yasası dağılımına göre kalınlık yönünde derecelendirildiği varsayılmaktadır. Tek duvarlı karbon nanotüp, farklı takviye modelleriyle polimer matriste hizalanıp dağıtılmıştır. KNTTK kirişlerinin malzeme özellikleri karışım kuralı kullanılarak açıklanmıştır. Yönetici denklemleri Hamilton ilkesi kullanılarak elde edilmiştir. Navier çözümü yöntemi, basit mesnetli KNTTK kirişler için belirtilen sınır koşulları altında kullanılmıştır. Bu çalışmada sağlanan matematiksel modeller, bazı mevcut sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. KNT hacim fraksiyonunun farklı modellerde doğrusal olmayan dağılımı ile kritik burkulmanın yeni sonuçları ayrıntılı olarak sunulmuş, tartışılmış ve doğrusal dağılım ile karşılaştırılmıştır. Kirişteki doğrusal olmayan dağılımın etkilerinin, özellikle burkulma davranışında mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynadığı ortaya çıkmıştır. Sonuçlar, X-kiriş konfigürasyonunun burkulma yükünü desteklemede tüm farklı KNTTK kiriş türleri arasında en güçlü olduğunu göstermektedir.

Bousahla vd. (2020) Winkler-Pasternak elastik zemin üzerindeki TDKNT ile takviye edilmiş kompozit kirişin burkulma ve titreşim davranışı incelemiştir. KNTTK kirişi, yeni bir birinci dereceden kayma deformasyon teorisi ile modellenmiştir. Mevcut teori üç değişken içerir ve kayma düzeltme faktörlerini kullanılmıştır. KNTTK kirişin eşdeğer özellikleri karışım kuralı kullanılarak hesaplanmıştır. Hareket denklemleri, Hamilton prensibinin ve Navier çözümünün mevcut modele uygulanmasıyla türetilmiş ve çözülmüştür. Mevcut modelin doğruluğu, literatürde bulunan diğer modellerle yapılan karşılaştırma çalışmaları ile doğrulanmaktadır. Ayrıca, çeşitli parametrik çalışmalar ve tartışmalar sunulmuştur.

2.2. Deneysel Çalışmalar

Mohammadimehr vd. (2018) tarafından çekme deneyi ve KNTTK üretimi sunulmuştur. Ayrıca, Euler-Bernoulli, Timoshenko ve Reddy gibi çeşitli kiriş teorilerine dayanan KNTTK kirişlerin eğilme, burkulma ve titreşim analizleri de dikkate alınmıştır. İlk olarak, mekanik özellikleri elde etmek için KNTTK ve kompozit kirişler için deneysel gerilme testleri yapılmış olup daha sonra Hamilton ilkesi kullanılarak Euler Bernoulli, Timoshenko ve Reddy kiriş teorileri için yönetici hareket denklemleri türetilmiştir. Sonuçlar daha önce yapılmış benzer araştırmalardan elde edilen sonuçlarla iyi bir biçimde uyumaktadır. KNT'nin sadece yüzde ikisinin eklenmesinin boyutsuz temel frekansı ve kritik burkulma yükünü artırdığı ve kompozit kirişlerin enine deplasmanını azalttığı gösterilmiştir. Bu kompozit kirişlerde, epoksi matrisinde ve KNTTK üretiminde kullanılan cam elyaflar, takviye partikülleri olarak KNT'ler uygulanmıştır. Teorik yöntemle elde edilen doğal frekanslar ve kritik burkulma yükü diğer yöntemlere göre daha yüksektir çünkü deney düzeneğinde bazı kaçınılmaz hatalar olmuştur. Ayrıca eğilme analizinde teorik yöntemlerde minimum deplasman meydana gelir. Bu çalışmada, Young ve kayma modülleri ile yoğunluk deneysel test ile elde edilmiştir. Daha sonra bu araştırmadan elde edilen mekanik özellikler kullanılarak eğilme, burkulma ve titreşim gibi teorik analizler ele alınmıştır.

Kamarian vd. (2020)'nin çalışmasında, basit mesnetli ince kompozit kirişlerin termal burkulma davranışındaki iki iyi bilinen gelişmiş malzeme olan şekil hafızalı alaşımların ve karbon nanotüplerin performansları arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Öncelikle, şekil hafızalı alaşımların liflerinin lamine kompozit kirişlerin termal burkulmasına etkisi incelenmiştir. Stabilité denklemleri Timoshenko kiriş teorisine göre türetilmiş ve kritik burkulma sıcaklıkları analitik olarak elde edilmiştir. Şekil hafızalı alaşımların liflerini kullanmanın avantajları ve dezavantajları ile bunların uygun fonksiyonel aralıkları incelenmiştir. Daha sonraki adımda, KNT'lerin kompozit kirişlerin termal burkulma tepkisi üzerindeki etkisi sunulmuştur. Bu amaçla, KNTTK malzemelerin ısı özelliklerini elde etmek için Dinamik Mekanik Termal Analiz ve Termo-Mekanik Analiz testleri gibi bazı deneylerin sonuçları kullanılmıştır. KNT'lerin performansı da şekil hafızalı alaşımların lifleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yapısal koşullara bağlı olarak, bir takviye malzemesinin diğerinden daha iyi performans gösterebileceği analizden bulunmuştur. Son olarak, her iki takviye malzemesinin aynı anda kullanılması fikri ortaya atılmıştır. Sonuçlar, bazı durumlarda, şekil hafızalı alaşımlarını veya KNT'lerden yalnızca birinin kullanılmasının, kompozit kirişlerin termal burkulmasında önemli bir etkiye sahip olmadığını, ancak kompozit ortamda bu gelişmiş takviye malzemelerinin her ikisinin de uygulanmasının kritik burkulmayı olağanüstü sıcaklıklara artırabileceğini göstermiştir.

Chen vd. (2011) tarafından kirişlerin doğrusal olmayan burkulma davranışının kapsamlı bir teorik ve deneysel incelemesi sunulmuştur. Kirişler için doğrusal olmayan bir denklem, kapalı form bir çözüm türetilerek çözülmüştür. Önerilen analitik yöntem, mikro kiriş yapıların burkulma sonrası davranışını analiz etmek için basit ama etkili bir yol sunmuştur. Teorik modeli doğrulamak için elektro termal mikro kirişler kullanılarak yapılan ölçümler gerçekleştirilmiş ve geleneksel ölçüm tekniklerinden üstün olduğu gösterilmiştir. Kesin çözümler ve deneysel sonuçlar arasındaki mükemmel uyum, teorik analizin geçerliliğini ve önerilen yöntemin mikro elektromekanik sistemler alanında uygulanma potansiyelini kanıtlanmıştır.

Chuang vd. (2010) Elektrostatik tahrikli mikro elektromekanik sistem cihazları çoğu durumda elektromekanik, optik elektrik, termoelektrik ve elektromanyetizma gibi enerji alanlarının oluşmuştur. Doğrusal olmayan çalışma durumları, analizlerini karmaşık ve karmaşık hale getirmiştir. tarafından çekme geriliminin fiziksel modeli, dinamik karakteristik analizi, hava sönümlleme etkisi, güvenilirliği, sayısal modelleme yöntemi ve elektrostatik tahrikli MEMS cihazlarına uygulaması tanıtılmıştır.

Shoaib vd. (2016)'nin derleme makalesinde, belirli uygulama ve çalışma koşulları için mikro elektromekanik sistemlerin (MEMS) davranışını analiz etmek için uygulanan MEMS test tekniklerindeki sorunlar ve zorluklarla ilgili bazı bilgiler sağlanmıştır. MEMS elektriksel, fiziksel, kimyasal ve optik uyaranlara yanıt verdiğinden, bu sistemlerin cihaz düzeyinde ve seri üretim düzeyinde test edilmesi çok zorlaşmaktadır. Şu anda, MEMS cihazları için geliştirilen test sistemlerinin, belirleyici olmayan davranışları ve karmaşıklıkları nedeniyle özelleştirilmesi gerekmektedir. MEMS için test sistemlerinin doğru ölçümünün üretim aşamasında ölçülmesi zor olmuştur. Test edilecek cihazın karmaşıklığı test geliştirme maliyetini artırmıştır; bu uygulama doğrudan cihaz maliyetine yüklenmiştir.

Stölken ve Evans (1998) tarafından boyut etkisini ölçmek için çok yönlü bir mikro eğilme test yöntemi açıklanmıştır. İnce tavllanmış bir folyonun küçük çaplı bir silindirik eğilmesini ve ardından yüksüz ve yüklü yarıçaplarının ölçülmesini içermektedir. Bu test, folyo malzemenin elastik modülünden bağımsız olarak moment-eğrilik ilişkisini tam olarak değerlendirmiştir. Farklı kalınlıklara sahip folyoların yanı sıra farklı çaplara sahip malafalar, aynı folyolar üzerinde yapılan çekme gerilimi-gerinim ölçümleri ile karşılaştırılarak plastisite boyut ölçeğinden oluşabilmiştir. Boyut ölçeğini ölçülen momentlerle ilişkilendiren analiz açıklanmış ve yüksek saflıkta Ni için elde edilen sonuçları yorumlamak için kullanılmıştır. Bu uzunluk aralığı 3–5 μm aralığındadır. Dönme gradyanı hakimdir ve daha önce Cu teller için burulma testinde bulunana benzerdir.

Chong ve Lam (1999)'in çalışmasında materyaldeki plastisite tipik olarak gerginliğin bir fonksiyonu olarak tanımlanmakta ancak metallerdeki burulma deneylerinden elde edilen son gözlemler, plastisitenin de gerilim gradyanına bağlı olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada termoset epoksi ve polikarbonat termoplastikte gerinim gradyanının plastik deformasyon üzerindeki etkileri deneysel olarak atomik kuvvet mikroskobu ile araştırılmıştır. Hem ısıyla sertleşen hem de termoplastik polimerlerde, uygulanan gerinim gradyanlarının bir sonucu olarak sertleşme sergilenmiştir. Moleküler eğilme mekanizması temelinde geliştirilen gerinim gradyanı plastisite teorisi, polimerlerde gerinim gradyan sertleşmesini öngörmüştür. Bu, camı polimerlerdeki gerinim gradyan plastisitesinin moleküler eğilme mekanizmaları tarafından belirlendiğini gösterilmiştir.

Li vd. (2019) dinamik yaklaşımı kullanarak mikron ölçeğinde deneysel olarak boyuta bağlı elastik davranışı incelemek için yeni bir bakış açısı sunmuşlardır. Nikelden yapılan mikro kirişlerin boyuta bağlı titreşimi ilk üç enine mod için incelenmiştir. Birinci modun normalleştirilmiş doğal frekansı, bildirildiği gibi güçlü boyut etkisi göstermiştir. Dikkat çekici bir şekilde, ikinci ve üçüncü modun normalize edilmiş doğal frekansları da mikro kirişlerin kalınlığı 15'ten 2.1 μm 'ye düştüğünde 1.9 katına çıkmıştır. Benzer şekilde normalize edilmiş eğilme rijitliği yaklaşık 3.5 katına çıkmıştır.

Daha yüksek modların titreşiminde elastik boyut etkisi ilk kez gözlenmiştir. Ayrıca, birinci modun boyuta bağlı titreşimi, DGÇ teorisi ışığında yorumlanmış ve teorik tahmin, yüksek modların deneysel sonuçlarına da çok iyi uyum göstermiştir. Bu nedenle, DGÇ teorisinin daha yüksek modların titreşimi için de geçerli olduğu doğrulanmıştır.

Lam vd. (2003) tarafından gerinim gradyan davranışlarını karakterize etmek için yeni bir yüksek mertebeden elastisite teorisi geliştirilmiştir. Bu teori, yüksek mertebeli denge koşullarının gerilme gradyan elastisite teorisine uygulanmasını sağlar ve bağımsız boyut ölçeği parametrelerinin sayısını beşten üçe düşürmüştür. Bu yeni gerinim gradyanı teorisine dayanarak, düzlem-gerinim kırıları için bir gerinim değişimli elastik eğilme analizi gerçekleştirilmiştir. Serbest uçta uygulanan bir moment ve tekil kuvveti ile konsol eğilme için çözümler, yeni yüksek mertebeden elastisite teorisine göre oluşturulmuştur. Klasik elastisite teorisinde, normalleştirilmiş eğilme rijitliği, kırıının uzunluğundan ve kalınlığından bağımsızdır. DŞDD teorisinde geliştirilen çözümlerde, normalize edilmiş eğilme rijitliği, kırıının kalınlığına bağımlıdır. Boyut bağımlılığının önemini belirlemek için, mikron boyutlu kırıılar imal edildi ve bir nano çentikleici kullanarak eğilme testleri yapıldı. Normalize edilmiş kırıı rijitliğinin, DŞDD teorisi tarafından öngörüldüğü gibi kırıı kalınlığına ters kare bağımlılık sergilediği bulundu. Mevcut sonuçlar, boyut etkisinin küçük ölçekli yapıların elastik deformasyonunda önemli olduğunu göstermiştir.

Lei vd. (2016) tarafından bir dizi konsol nikel mikro kırıının boyuta bağlı davranışı ilk kez deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, mikro kırııların boyutsuz doğal frekanslarının, kırıı kalınlığı 15'ten 2.1 μm 'ye düşerken yaklaşık 2.1 katına çıktığını ortaya koymuştur. Ayrıca, DŞDD teorisine dayalı olarak ve diferansiyel kuadratür yöntemi (DKY) ile en küçük kareler yöntemi kullanılarak, deneysel sonuçlar yorumlanmış ve mikron ölçeğindeki malzeme boyut ölçek parametreleri elde edilmiştir.

Li vd. (2018), temassız bir lazer Doppler titreşim ölçüm sistemine dayalı olarak, DGÇ teorisinin malzeme boyut ölçek parametresini belirlemek için standart bir deneysel yöntem önermişlerdir. Bakır ve titanyumdan yapılmış, kalınlığı 15 ila 2 μm arasında değişen iki farklı konsol mikro kırıının temel mod rezonans frekansları sırasıyla ölçülmüştür. Boyut etkileri deneysel sonuçlardan açıkça görülmüştür. Boyut ölçek parametreleri, deney verilerinin DGÇ teorisine uydurulmasıyla elde edilmiştir.

Kulkarni vd. (2010) Enine doğrultudaki düşük mekanik özelliklere bağlı erken hasar, fiber takviyeli polimer kompozitlerin temel zayıflığını oluşturmaktadır. Bu soruna bir çözüm, matris ağırlıklı kompozit özelliklerini iyileştirmek için karbon nanotüplerin fiber yüzeyinde yetiştirildiği nano güçlendirilmiş lamine kompozitlerin oluşturulmasıyla tarafından aranmıştır. Nano takviyeli kompozitlerin elastik özelliklerini sayısal olarak tahmin etmek için bir çalışma yapılmıştır. Nano takviyeli lamine kompozitin etkili mekanik özelliklerini değerlendirmek için çok ölçekli bir modelleme yaklaşımı ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Nanotüpler ve polimer matris arasındaki arayüzü modellemek için kohezif bölge yaklaşımı kullanılmıştır. Elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranları dahil olmak üzere nano takviyeli tabakalı kompozitlerin elastik özellikleri tahmin edilmiş ve eş-gerinim ile eş-stres modelleri ile ilişkilendirilmiştir.

Thostenson ve Chou (2003) Karbon nanotüpler için gözlemlenen istisnai mekanik ve fiziksel özellikler, nanotüp bazlı kompozit malzemelerin geliştirilmesini teşvik etmiştir. Ancak makroskopik bir kompozitte bu olağanüstü nano ölçekli özelliklerden yararlanmadan önce önemli zorluklar bulunmaktadır. Nano ölçekte, karbon nanotüpün yapısı, kompozitin genel özelliklerini güçlü bir şekilde etkilemiştir. tarafından yapılan araştırmanın odak noktası, karbon nanotüplerin nanotüp bazlı kompozitlerin elastik özellikleri üzerindeki yapı/boyut etkisi hakkında temel bir anlayış geliştirmektir. Bu amaçla, bir polistiren matris içine gömülü hizalanmış çok duvarlı karbon nanotüplerden oluşan bir model kompozit sistemin nano ölçekli yapısı ve elastik özellikleri karakterize edilmiş ve nanotüpün yapısını hesaba katmak için kısa fiber kompozitlerin modellenmesi için mikromekanik bir yaklaşım kullanılmıştır. Bileşen özelliklerinin, takviye geometrisinin ve nanotüp yapısının bir fonksiyonu olarak nanokompozitin elastisite modülünü tahmin etmek için güçlendirilmiştir. Nanokompozit elastik özellikler, özellikle nanotüp çapına duyarlıdır, çünkü daha büyük çaplı nanotüpler daha düşük bir etkili modül gösterir ve daha küçük çaplı nanotüplere göre kompozitte daha büyük bir hacim fraksiyonu kaplar.

Yang vd. (2002) mikron ölçeğindeki malzemelerin deformasyon davranışının boyuta bağlı olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Uzama ve genleşme gradyanlarının yokluğunda, boyut bağımlılığı, klasik gerinimlere ek olarak eğrilik tansörünün deformasyon bileşenlerinin kullanıldığı klasik gerilme çifti teorisi kullanılarak açıklanmıştır. Gerilme çifti teorisi formülasyonunda, sadece kuvvetlerin geleneksel denge ilişkileri ve kuvvet momentleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, gerilme çiftlerinin davranışlarını yönetmek için ek bir denge bağıntısı geliştirilmiştir. Bağıntıya göre gerilme çifti tansörünün simetrik olmasını ve simetrik eğrilik tansörü, sistemin toplam şekil değiştirme enerjisine gerçek bir katkısı olan teoride tek uygun şekilde konjuge edilmiş yüksek dereceli gerinim ölçüleri olmuştur. Bu modifikasyon temelinde, izotropik malzemeler için doğrusal bir elastik model geliştirilmiştir. Silindirik bir çubuğun burulması ve sonsuz genişlikte düz bir levhanın saf eğilmesi, modifikasyonun etkisini göstermek için analiz edilmiştir.

Jing vd. (2006) tarafından farklı çaplarda gümüş nanoteller hidrotermal kimyasal yöntemle sentezlenmiştir. Dış çapları 20 nm ila 140 nm arasında değişen nanotellerin elastik özellikleri, AKM kullanılarak ölçülmüştür. Nanotellerin bilinen Young modülünün çapın artmasıyla azaldığı bulunmuştur. Gümüş nanotellerin çapı 100 nm'den büyük olduğunda Young modülü sabit bir değere yaklaşmıştır. Gümüş nanotellerin bilinen Young modülünün boyut bağımlılığı, yüzey gerilimi, oksidasyon tabakası ve yüzey pürüzlülüğünün etkilerini içeren yüzey etkisine bağlı olduğu yorumlanmıştır. Böylece boyut bağımlılığını açıklamak için teorik bir analiz sunulmuştur. Bu analiz hem yüzey gerilimi hem de yüzey modülleri içerdiği için önceki modellerden farklıdır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. KNTTK Kirişler

TDKNT ve bir izotropik polimer matrisinin bir karışımından yapılan düz bir KNTTK kirişi dikkate alınır. L uzunluğuna ve h yüksekliğine sahip olan kiriş, Şekil 1a'da gösterilmiştir. Bu çalışmada, kirişlerin Şekil 1b'de gösterildiği gibi enine kesitler üzerinde üç farklı takviye modeline sahip olduğu varsayılmıştır. KNTTK kirişlerinin etkili malzeme özellikleri karışım kuralı kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu nedenle, KNTTK kirişlerinin etkili Young modülü ve kayma modülünün ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$E_{11} = \eta_1 V_{knt} E_{11}^{knt} + V_p E^p \quad (3.1)$$

$$\frac{\eta_2}{E_{22}} = \frac{V_{knt}}{E_{22}^{knt}} + \frac{V_p}{E^p} \quad (3.2)$$

$$\frac{\eta_3}{G_{12}} = \frac{V_{knt}}{G_{12}^{knt}} + \frac{V_p}{G^p} \quad (3.3)$$

burada E_{11}^{knt} , E_{22}^{knt} ve G_{12}^{knt} sırasıyla TDKNT'nin Young modülleri ve kayma modülü; E^p ve G^p ise polimer matrisin karşılık gelen malzeme özellikleri olarak tanımlanır. Ayrıca, V_{knt} ve V_p sırasıyla karbon nanotüp ve polimer matris için hacim fraksiyonlarıdır ve aralarında $V_{knt} + V_p = 1$ ilişkisi mevcuttur. KNT verimlilik parametreleri η_i ($i=1, 2, 3$) ile tanımlanmıştır. Moleküler dinamik simülasyonu tarafından tahmin edilen KNTTK'lerin elastik modülleri ile karışım kuralı tarafından tahmin edilen sayısal sonuçların eşleştirilmesinden belirlenebilirler. Aynı kural kullanılarak, KNTTK kirişlerin Poisson oranı (ν) ve kütle yoğunluğu (ρ) şu şekilde yazılır:

$$\nu = V_{knt} \nu^{knt} + V_p \nu^p; \rho = V_{knt} \rho^{knt} + V_p \rho^p \quad (3.4)$$

burada ν^{knt} , ν^p ve ρ^{knt} , ρ^p sırasıyla KNT ve polimer matrisin Poisson oranları ve yoğunluklarıdır. Şekil 3.1b'de gösterildiği gibi, kirişlerin enine kesitlerine dağıtılan farklı KNT takviye modellerinde malzeme bileşenlerinin dağılımlarını açıklamak için kullanılan matematiksel fonksiyonlar aşağıda verilmiştir:

$$\text{DD KİRİŞ: } V_{knt} = V_{knt}^* \quad (3.5a)$$

$$\text{FD-O KİRİŞ: } V_{knt} = 2 \left(1 - 2 \frac{|z|}{h} \right) V_{knt}^* \quad (3.5b)$$

$$\text{FD-X KİRİŞ: } V_{knt} = 4 \frac{|z|}{h} V_{knt}^* \quad (3.5c)$$

burada V_{knt}^* aşağıdaki denklemden elde edilebilen KNT'lerin verilen hacim fraksiyonudur:

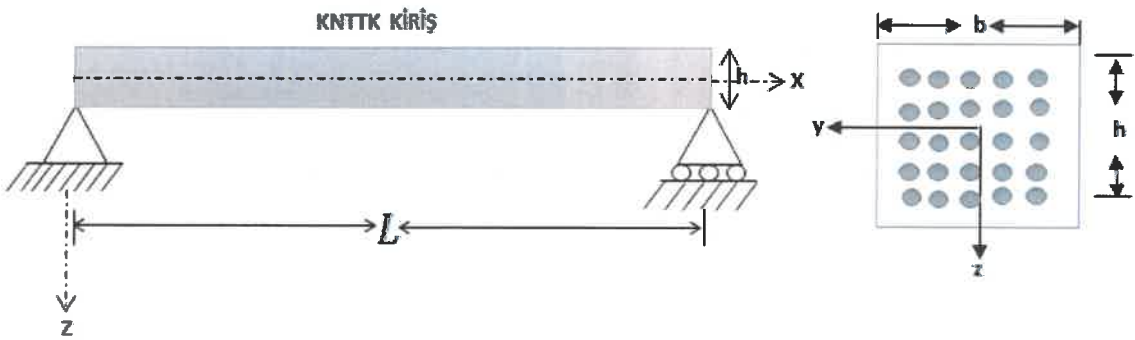
$$V_{knt}^* = \frac{W_{knt}}{W_{knt} + \left(\frac{p^{cnt}}{p^m} \right) (1 - W_{knt})} \quad (3.6)$$

burada W_{knt} , KNT'lerin kütle oranıdır. Denklem (3.5b) ve (3.5c)'den FD-O ve FD-X kirişlerinin, malzeme bileşenlerinin kalınlıkları boyunca sürekli olarak değiştiği fonksiyonel derecelendirilmiş kirişler biçiminde tanımlanabilir; DD kiriş ise homojen (düzgün) olarak dağıtılmış KNT takviyesine sahiptir. Bu çalışmada, verilen hacim fraksiyonu V_{knt}^* ile ilişkili KNT verimlilik parametreleri (η_i) şunlardır:

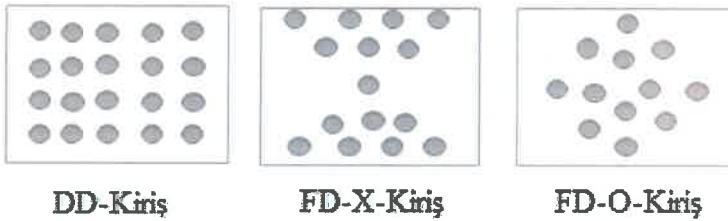
$$V_{knt}^* = 0.12 \text{ durumunda } \eta_1 = 1.2833 \text{ ve } \eta_2 = \eta_3 = 1.0556$$

$$V_{knt}^* = 0.17 \text{ durumunda } \eta_1 = 1.3414 \text{ ve } \eta_2 = \eta_3 = 1.7101$$

$$V_{knt}^* = 0.28 \text{ durumunda } \eta_1 = 1.3238 \text{ ve } \eta_2 = \eta_3 = 1.7380$$



Şekil 3.1. (a) Bir KNTTK kirişinin geometrisi



Şekil 3.1. (b) Farklı takviye modellerinin enine kesitleri

3.2 Kayma Deformasyonlu Kiriş Teorileri

Yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorileri, enine kayma deformasyonunun etkilerini dikkate alır. Kirişin deformasyonlarının $(x - z)$ düzleminde olduğunu varsayarsak ve x, y ve z yönleri boyunca yer değiştirme bileşenlerini genel yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre (u_1, u_2) ve (u_3) ile ifade edilirse aşağıdaki deplasman bileşenleri yazılabilir:

$$u_1(x, z) = u(x) - z \frac{dw(x)}{dx} + f(z)\gamma(x) \quad (3.7a)$$

$$u_2(x, z) = 0 \quad (3.7b)$$

$$u_3(x, z) = w(x) \quad (3.7c)$$

u ve w sırasıyla x ve z yönleri boyunca orta düzlem yer değiştirme bileşenlerini temsil eder, γ nötr eksenindeki herhangi bir noktanın enine kayma gerilimidir:

$$\gamma(x) = \frac{dw(x)}{dx} - \phi(x) \quad (3.8)$$

burada ϕ tarafsız ekseninde herhangi bir noktada kesitin toplam eğilme dönmesidir. f ise kalınlık boyunca enine kayma gerinmesinin dağılımını belirleyen fonksiyondur.

f sıfır alınarak Bernoulli-Euler (kayma deformasyonsuz) kiriş teorisi (BEKT) elde edilir. Kayma etkilerini dikkate almak için çeşitli kayma deformasyonlu kiriş teorileri geliştirilmiştir. Bu teoriler arasında birinci dereceden (Timoshenko), üçüncü dereceden (parabolik), trigonometrik (sinüzoidal) kayma deformasyonlu kiriş teorileri literatürde daha çok kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Bernoulli-Euler kiriş teorisi (BEKT), Timoshenko kiriş teorisi (TKT), parabolik kiriş teorisi (PKT) ve sinüzoidal kiriş teorisi (SKT) kullanılmıştır. Bu kiriş teorileri için kullanılan f fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$\text{BEKT: } f(z) = 0 \quad (3.9a)$$

$$\text{TKT : } f(z) = z \quad (3.9b)$$

$$\text{PKT: } f(z) = z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2}\right) \quad (3.9c)$$

$$\text{SKT: } f(z) = \frac{h}{\pi} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \quad (3.9d)$$

3.3 Değiştirilmiş Şekil Değiştirme Değişimi Teorisi

Değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi (DŞDD) teorisinde toplam şekil değiştirme enerji yoğunluğu şöyle ifade edilebilir:

$$v = v(\varepsilon_{ij}, \gamma_i, \eta_{ijk}^{(1)}, \chi_{ij}^s) \quad (3.10)$$

Deforme olmuş doğrusal elastik izotropik bir malzeme için, DŞDD teorisine göre U şekil değiştirme enerjisi ve şekil değiştirmeler şu şekilde yazılabilir (Lam vd. 2003):

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + p_i \gamma_i + \tau_{ijk}^{(1)} \eta_{ijk}^{(1)} + m_{ij}^s \chi_{ij}^s) dV \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.12)$$

$$\gamma_i = \varepsilon_{mm,i} \quad (3.13)$$

$$\eta_{ijk}^{(1)} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{jk,i} + \varepsilon_{ki,j} + \varepsilon_{ij,k}) - \frac{1}{15} \delta_{ij} (\varepsilon_{mm,k} + 2\varepsilon_{mk,m}) - \frac{1}{15} \{ \delta_{jk} (\varepsilon_{mm,i} + 2\varepsilon_{mi,m}) + \delta_{ki} (\varepsilon_{mm,j} + 2\varepsilon_{mj,m}) \} \quad (3.14)$$

$$\chi_{ij}^s = \frac{1}{2} (\theta_{i,j} + \theta_{j,i}) \quad (3.15)$$

Yukarıdaki klasik ve yüksek mertebeli şekil değiştirmelerle ilişkili olan gerilmeler aşağıdaki gibi yazılabilir (Lam vd. 2003):

$$\sigma_{ij} = \lambda \text{tr}(\varepsilon) \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (3.16)$$

$$p_i = 2\mu l_0^2 \gamma_i \quad (3.17)$$

$$\tau_{ijk}^{(1)} = 2\mu l_1^2 \eta_{ijk}^{(1)} \quad (3.18)$$

$$m_{ij}^s = 2\mu l_2^2 \chi_{ij}^s \quad (3.19)$$

burada l_0, l_1, l_2 mikro kirişe ait boyut ölçek parametreleridir. Ayrıca, λ ve μ Lamé sabitleri olup Young modülü ve Poisson oranı cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.20)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.21)$$

Denklemler (3.7a)-(3.7c), Denklem (3.12)'da kullanarak sıfırdan farklı şekil değiştirme bileşenleri elde edilir:

$$\varepsilon_{11} = \frac{du}{dx} - z \frac{d^2 w}{dx^2} + f \frac{d\gamma}{dx} \quad (3.22)$$

$$\varepsilon_{13} = \varepsilon_{31} = \frac{1}{2} f' \gamma$$

burada (') z'ye göre türevi belirtir. Yukarıdaki ilgili denklemlerin Denklemler (3.13)-(3.15)'da değiştirilmesi sıfır olmayan $\gamma_i, \eta_{ijk}^{(1)}, \chi_{ij}^s$ bileşenlerini verir (Aghazadeh 2013):

$$\gamma_1 = \frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{d^3 w}{dx^3} + f \frac{d^2 \gamma}{dx^2}, \gamma_3 = \frac{d^2 w}{dx^2} + f' \frac{d\gamma}{dx} \quad (3.23)$$

$$\eta_{111}^{(1)} = \frac{2}{5} \left(\frac{d^2 u}{dx^2} - z \frac{d^3 w}{dx^3} + f \frac{d^2 \gamma}{dx^2} - f'' \gamma \right), \eta_{333}^{(1)} = \frac{2}{5} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} - 2f' \frac{d\gamma}{dx} \right),$$

$$\eta_{113}^{(1)} = \eta_{311}^{(1)} = \eta_{131}^{(1)} = \frac{4}{15} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} - 2f' \frac{d\gamma}{dx} \right), \quad (3.24)$$

$$\eta_{223}^{(1)} = \eta_{322}^{(1)} = \eta_{232}^{(1)} = \frac{1}{15} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} - 2f' \frac{d\gamma}{dx} \right)$$

$$\eta_{221}^{(1)} = \eta_{122}^{(1)} = \eta_{212}^{(1)} = -\frac{1}{5} \left(\frac{d^2 u}{dx^2} - z \frac{d^3 w}{dx^3} + f \frac{d^2 \gamma}{dx^2} + \frac{1}{3} f'' \gamma \right)$$

$$\eta_{331}^{(1)} = \eta_{133}^{(1)} = \eta_{312}^{(1)} = -\frac{1}{5} \left(\frac{d^2 u}{dx^2} - z \frac{d^3 w}{dx^3} + f \frac{d^2 \gamma}{dx^2} + \frac{1}{3} f'' \gamma \right)$$

$$\chi_{12}^{(s)} = \chi_{12}^{(s)} = \frac{1}{4} \left(-\frac{d^2 w}{dx^2} + 2f' \frac{d\gamma}{dx} \right), \chi_{23}^{(s)} = \chi_{32}^{(s)} = \frac{1}{4} f'' \gamma \quad (3.25)$$

Sonuç olarak, Denklemler (3.22)-(3.25), Denklemler (3.16)-(3.19)'te yerleştirilerek, gerilme tansörünün sıfır olmayan bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\sigma_{11} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + f \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right), \sigma_{22} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + f \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_{33} = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + f \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right), \sigma_{13} = \sigma_{31} = k_s \mu f' \gamma \quad (3.26)$$

$$p_1 = 2\mu l_0^2 \lambda \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + f \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} \right), p_3 = 2\mu l_0^2 \left(-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + f' \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right) \quad (3.27)$$

$$\tau_{111}^{(1)} = \frac{4}{5} \mu l_1^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + f \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} - f'' \gamma \right), \tau_{333}^{(1)} = \frac{4}{5} \mu l_1^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2f' \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right),$$

$$\tau_{113}^{(1)} = \tau_{311}^{(1)} = \tau_{131}^{(1)} = -\frac{8}{15} \mu l_1^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2f' \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right),$$

$$\tau_{223}^{(1)} = \tau_{322}^{(1)} = \tau_{232}^{(1)} = \frac{2}{15} \mu l_1^2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2f' \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right),$$

$$\tau_{221}^{(1)} = \tau_{112}^{(1)} = \tau_{212}^{(1)} = -\frac{2}{5} \mu l_1^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + f \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} - f'' \gamma \right),$$

$$\tau_{331}^{(1)} = \tau_{133}^{(1)} = \tau_{313}^{(1)} = -\frac{2}{5} \mu l_1^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + f \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} - f'' \gamma \right) \quad (3.28)$$

$$m_{12}^s = m_{21}^s = \frac{\mu l_2^2}{2} \left(-2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - f' \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right), m_{23}^s = m_{32}^s = \frac{1}{2} \mu l_2^2 f'' \gamma \quad (3.29)$$

k_s 'in TKT için bu çalışmada 5/6 olarak belirlenen; BEKT, PKT ve SKT'de ise 1 olarak alınan kayma düzeltme faktörü olduğuna dikkat edilmelidir. Daha sonra DŞDD teorisine dayanan gerinim enerjisi şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l \int_A \left(\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + p_i \gamma_i + \tau_{ijk}^{(1)} \eta_{ijk}^{(1)} + m_{ij}^s \chi_{ij}^s \right) dv$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^l \int_A \left\{ \sigma_{11} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + f \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right) + \sigma_{13} (f' \gamma) \right\} \quad (3.30)$$

$$+ p_1 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + f \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} \right) + p_3 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + f' \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right)$$

$$+ \tau_{221}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - z \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + f \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} - f'' \gamma \right) + \frac{4}{3} \tau_{221}^{(1)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2f' \frac{\partial \gamma}{\partial x} \right) \} dA dx$$

Dış kuvvetler tarafından yapılan iş

$$W = \frac{1}{2} \int_0^l P \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx \quad (3.31)$$

burada P aksenal basınç kuvvetidir.

Mikro kirişin burkulmada yönetici denklemlerini ve ilgili sınır koşullarını belirlemek için aşağıdaki varyasyonel ilke kullanılmıştır:

$$\delta(U - W) = 0 \quad (3.32)$$

Denklemler (3.28)-(3.30)'yi Denklem (3.32)'de yazılarak ve $\delta u, \delta w$ ve $\delta \gamma$ katsayılarının sıfıra eşitlenmesi ile yönetici denklemler şöyle elde edilebilir (Aghazadeh 2013):

$$\begin{aligned} & A_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \left(2A_{11} + \frac{4}{5} A_{551} \right) \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} - B_{11} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + B_{55} \left(2B_{550} + \frac{4}{5} B_{551} \right) \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} \\ & + \left(F_{11} + \frac{2}{5} F_{671} \right) \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} - \left(2F_{470} + \frac{4}{5} F_{471} \right) \frac{\partial^4 \gamma}{\partial x^4} = 0 \end{aligned} \quad (3.33a)$$

$$\begin{aligned} & B_{11} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - \left(2B_{550} + \frac{4}{5} B_{551} \right) \frac{\partial^5 u}{\partial x^5} - \left(D_{11} + 2A_{550} + \frac{8}{15} A_{551} + A_{552} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \\ & + \left(2D_{550} + \frac{4}{5} D_{551} \right) \frac{\partial^6 w}{\partial x^6} + \left(F_{22} + 2F_{570} + \frac{16}{15} F_{571} + \frac{F_{572}}{2} + \frac{2}{5} F_{681} \right) \frac{\partial^3 \gamma}{\partial x^3} \\ & - \left(2F_{480} + \frac{4}{5} F_{481} \right) \frac{\partial^5 \gamma}{\partial x^5} - P \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \end{aligned} \quad (3.33b)$$

$$\begin{aligned} & - \left(F_{11} + \frac{2}{5} F_{671} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(2F_{470} + \frac{4}{5} F_{471} \right) \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \\ & \left(F_{22} + 2F_{570} + \frac{16}{15} F_{571} + \frac{F_{572}}{2} + \frac{2}{5} F_{681} \right) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \left(2F_{480} + \frac{4}{5} F_{481} \right) \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} \\ & + \left(k_s F_{55} + \frac{8}{15} F_{661} + \frac{F_{662}}{4} \right) \gamma - \left(F_{33} + 2F_{550} + \frac{32}{15} F_{551} + \frac{F_{552}}{4} + \frac{4}{5} F_{461} \right) \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} \\ & + \left(2F_{440} + \frac{4}{5} F_{441} \right) \frac{\partial^4 \gamma}{\partial x^4} = 0 \end{aligned} \quad (3.33c)$$

İlgili sınır koşulları şunlardır:

$$\begin{aligned} & \left\{ -A_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + \left(2A_{550} + \frac{4}{5} A_{551} \right) \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + B_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \left(2B_{550} + \frac{4}{5} B_{551} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right. \\ & \left. - \left(F_{11} + \frac{2}{5} F_{671} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x} + \left(2F_{470} + \frac{4}{5} F_{471} \right) \frac{\partial^3 \gamma}{\partial x^3} \right\} \Big|_{x=0,L} = 0 \text{ veya } \delta u \Big|_{x=0,L} = 0 \end{aligned} \quad (3.34a)$$

$$\left\{ \left(2A_{550} \frac{4}{5} A_{551} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \left(2B_{550} \frac{4}{5} B_{551} \right) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \frac{2}{5} F_{671} \gamma + \left(2F_{470} + \frac{4}{5} F_{471} \right) \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} \right\} \Big|_{x=0,L} = 0 \text{ veya } \delta \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (3.34b)$$

$$\left\{ -B_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(2B_{550} \frac{4}{5} B_{551} \right) \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + P \frac{\partial w}{\partial x} + \left(D_{11} + 2A_{550} \frac{8}{15} A_{551} + A_{552} \right) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \left(2D_{550} \frac{4}{5} D_{551} \right) \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} + \left(F_{22} + 2F_{570} \frac{16}{15} F_{571} + \frac{F_{572}}{2} + \frac{2}{5} A_{681} \right) \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} + \left(2D_{480} \frac{4}{5} F_{481} \right) \frac{\partial^4 \gamma}{\partial x^4} \right\} \Big|_{x=0,L} = 0 \text{ veya } \delta w \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (3.34c)$$

$$\left\{ B_{11} \frac{\partial u}{\partial x} - \left(2B_{550} + \frac{4}{5} B_{551} \right) \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} - \left(D_{11} + 2A_{550} + \frac{8}{15} A_{551} + A_{552} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \left(2D_{550} + \frac{4}{5} D_{551} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \left(F_{22} + 2F_{570} + \frac{16}{15} F_{571} + \frac{F_{572}}{2} + \frac{2}{5} F_{681} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x} - \left(2F_{480} + \frac{4}{5} F_{481} \right) \frac{\partial^3 \gamma}{\partial x^3} \right\} \Big|_{x=0,L} = 0 \text{ veya } \delta \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (3.34d)$$

$$\left\{ \left(2B_{550} + \frac{4}{5} B_{551} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \left(2D_{550} + \frac{4}{5} D_{551} \right) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \frac{2}{5} F_{481} \gamma + \left(2F_{480} + \frac{4}{5} F_{481} \right) \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} \right\} \Big|_{x=0,L} = 0 \text{ veya } \delta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (3.34e)$$

$$\left\{ F_{11} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \left(2F_{470} + \frac{4}{5} F_{471} \right) \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \left(F_{22} + 2F_{570} + \frac{16}{15} F_{571} + \frac{F_{572}}{2} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \left(2F_{480} + \frac{4}{5} F_{481} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \left(F_{33} + 2F_{550} + \frac{32}{15} F_{551} + \frac{F_{552}}{4} + \frac{2}{5} F_{461} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x} - \left(2F_{440} + \frac{4}{5} F_{441} \right) \frac{\partial^3 \gamma}{\partial x^3} \right\} \Big|_{x=0,L} = 0 \text{ veya } \delta \gamma \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (3.34f)$$

$$\left\{ \left(2F_{470} + \frac{4}{5} F_{471} \right) \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} - \left(2F_{480} + \frac{4}{5} F_{481} \right) \frac{\partial^3 \gamma}{\partial x^3} - \frac{2}{5} F_{461} \gamma + \left(2F_{440} + \frac{4}{5} F_{441} \right) \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^2} \right\} \Big|_{x=0,L} = 0 \text{ veya } \delta \left(\frac{\partial \gamma}{\partial x} \right) \Big|_{x=0,L} = 0 \quad (3.34g)$$

Yukarıdaki denklemlerdeki bileşenler şu şekilde tanımlanır:

$$\{A_{11}, B_{11}, D_{11}, F_{11}, F_{111}, F_{11}\} = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E(z) \{1, z, z^2, f, zf, f^2\} dz \quad (3.35a)$$

$$\{A_{55}, B_{55}, D_{55}, F_{44}, F_{46}, F_{47}, F_{48}, F_{55}, F_{57}, F_{66}, F_{67}, F_{68}\} \\ = b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{E(z)}{2(1+\nu(z))} \{1, z, z^2, f^2, ff'', f, zf, f^2, f', f'', f'', zf''\} dz \quad (3.35b)$$

$$\{A_{550}, B_{550}, D_{550}, F_{440}, F_{460}, F_{470}, F_{480}, F_{550}, F_{570}, F_{660}, F_{670}, F_{680}\}$$

$$= b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{E(z)l_0^2}{2(1+\nu(z))} \{1, z, z^2, f^2, f f'', f, z f, f'^2, f', f''^2, f'', z f''\} dz \quad (3.35c)$$

$$\{A_{551}, B_{551}, D_{551}, F_{441}, F_{461}, F_{471}, F_{481}, F_{551}, F_{571}, F_{661}, F_{671}, F_{681}\}$$

$$= b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{E(z)l_1^2}{2(1+\nu(z))} \{1, z, z^2, f^2, f f'', f, z f, f'^2, f', f''^2, f'', z f''\} dz \quad (3.35d)$$

$$\{A_{552}, B_{552}, D_{552}, F_{442}, F_{462}, F_{472}, F_{482}, F_{552}, F_{572}, F_{662}, F_{672}, F_{682}\}$$

$$= b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{E(z)l_2^2}{2(1+\nu(z))} \{1, z, z^2, f^2, f f'', f, z f, f'^2, f', f''^2, f'', z f''\} dz \quad (3.35e)$$

Denklemler (3.33a)-(3.33c), basit mesnetli KNTK mikro kiriş için Navier çözüm yöntemi kullanılarak analitik olarak çözülmüştür. Bilinmeyen Fourier katsayıları ve trigonometrik fonksiyonlar içeren deplasman bileşenlerinin açılımı aşağıda verilmiştir:

$$u(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} U_m \cos \frac{m\pi}{L} x \quad (36)$$

$$w(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} W_m \sin \frac{m\pi}{L} x \quad (37)$$

$$\gamma(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} R_m \cos \frac{m\pi}{L} x \quad (38)$$

burada U_m , W_m ve R_m bilinmeyen Fourier katsayılarıdır. Denklemler (36)-(38), basit mesnetli kirişe ait sınır koşullarını sağlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, KNT hacim fraksiyonunun, kesit içinde dağılımın ve malzeme boyut parametresinin KNT ile güçlendirilmiş kompozit mikro kırımların kritik burkulma yükü değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan malzeme özellikleri şöyledir (Wattanasakulpong ve Ungbhakorn 2013): $E^p = 2.5 \text{ GPa}$, $\nu^p = 0.3$, $\rho^p = 1190 \text{ kg/m}^3$, $E_{11}^{KNT} = 600 \text{ GPa}$, $E_{22}^{KNT} = 10 \text{ GPa}$, $G^{KNT} = 17.2 \text{ GPa}$, $\nu^{KNT} = 0.19$, $\rho^{KNT} = 1400 \text{ kg/m}^3$. Öncelikle, gerçekleştirilen analizin doğruluğunu ve geçerliliğini ispatlamak için elde edilen sonuçlarla daha önce Wattanasakulpong ve Ungbhakorn (2013) tarafından yayınlanmış bir çalışmadaki sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1’de KNT takviyeli kırımların klasik boyutsuz kritik burkulma yükü ($\bar{P}_{kr} = P_{kr} / b_1^p$) değerlerinin farklı kırım teorilerine dayalı olarak karşılaştırılması yapılmıştır. b_1^p yalnızca polimer matristen imal edilmiş kırıma ait değerlerdir. Sonuçlar incelendiğinde PKT ve SKT’ye dayalı sonuçların birebir uyum içinde oldukları fakat TKT’ye göre elde edilen frekans değerleri arasında gözle görülür bir fark olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu farkın nedeninin bu çalışmada klasik sonuçlar için kayma düzeltme faktörü olarak 5/6 kullanılması ancak karşılaştırma yapılan çalışmada herhangi bir kayma düzeltme faktörünün kullanılmaması olarak yorumlanabilir.

Çizelge 4.1. Karbon nanotüp takviyeli kırımların boyutsuz kritik burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması ($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.12$)

Kırım teorisi	DD		FD-O		FD-X	
	Wattanasakulpong ve Ungbhakorn (2013)	Bu çalışma	Wattanasakulpong ve Ungbhakorn (2013)	Bu çalışma	Wattanasakulpong ve Ungbhakorn (2013)	Bu çalışma
BEKT	-	0.13715	-	0.07052	-	0.20293
TKT	0.1032	0.09832	0.0604	0.05867	0.1367	0.12834
PKT	0.0984	0.09845	0.0576	0.05762	0.1289	0.12886
SKT	0.0985	0.09852	0.0575	0.05750	0.1291	0.12911

KNT takviyeli kırımların klasik boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri farklı kırım teorilerine dayalı olarak sırasıyla $V_{KNT}^* = 0.17$ ve $V_{KNT}^* = 0.28$ için Çizelge 4.2 ve 4.3’te verilmiştir. Bu tablolar incelendiğinde en büyük burkulma yükü değerlerinin FD-X dağılımında ve BEKT’ye bağlı olarak elde edilenler olduğu görülmektedir. Ayrıca KNT’lerin hacim fraksiyonunun artmasına bağlı olarak burkulma yükü değerlerinin de arttığı açıkça görülmektedir.

Çizelge 4.2. Karbon nanotüp takviyeli kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri ($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.17$)

Kiriş teorisi	DD	FD-O	FD-X
BEKT	0.2007	0.1024	0.2973
TKT	0.1500	0.0875	0.1989
PKT	0.1502	0.0864	0.1979
SKT	0.1503	0.0863	0.1981

Çizelge 4.3. Karbon nanotüp takviyeli kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri ($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.28$)

Kiriş teorisi	DD	FD-O	FD-X
BEKT	0.3216	0.1632	0.4758
TKT	0.2193	0.1331	0.2867
PKT	0.2197	0.1325	0.2764
SKT	0.2198	0.1324	0.2762

KNT ile güçlendirilmiş mikro kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri sırasıyla $V_{KNT}^* = 0.12$, $V_{KNT}^* = 0.17$ ve $V_{KNT}^* = 0.28$ için Çizelge 4.4-4.6'de sunulmuştur. Malzeme boyut ölçek parametresi kiriş yüksekliğine eşit seçilerek boyut etkisi dikkate alınmıştır. Elde edilen kritik burkulma yükü değerlerinin boyut etkisine bağlı olarak klasik kritik burkulma yükü değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu Çizelgelerde TKT* değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi teorisi için kullanılan yeni kayma düzeltme faktörlü Timoshenko kiriş teorisini temsil etmektedir. Kullanılan yeni kayma düzeltme faktörü (k_s^*) şöyledir

$$k_s^* = \frac{5}{6} \left(10^{l^a/h^a} \right) \quad (4.2)$$

burada

$$a = 3^{(h/l)^{0.08}} - 0.45 \quad (4.3)$$

Sonuçlara bakıldığında PKT, SKT ve TKT* kayma deformasyonlu kiriş teorilerine dayalı kritik burkulma yükü değerleri arasında çok iyi bir uyum olduğu görülmektedir. TKT'ye bağlı sonuçlar ise diğerlerinden çok düşük kalmaktadır. Ayrıca, KNT'nin hacim fraksiyonunun artmasıyla boyutsuz kritik burkulma yükü değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.4. Karbon nanotüp takviyeli mikro kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri ($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.12$, $l = h$)

Kiriş teorisi	DD	FD-O	FD-X
BEKT	0.2019	0.1356	0.2681
TKT	0.1293	0.0985	0.1283
TKT*	0.1908	0.1305	0.2489
PKT	0.1914	0.1304	0.2510
SKT	0.1913	0.1304	0.2509

Çizelge 4.5. Karbon nanotüp takviyeli mikro kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri ($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.17$, $l = h$)

Kiriş teorisi	UD	FD-O	FD-X
BEKT	0.3115	0.2146	0.4095
TKT	0.2067	0.1594	0.2471
TKT*	0.2960	0.2071	0.3834
PKT	0.2970	0.2068	0.3874
SKT	0.2970	0.2068	0.3871

Çizelge 4.6. Karbon nanotüp takviyeli mikro kirişlerin boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri ($L/h=15$, $V_{KNT}^* = 0.28$, $l = h$)

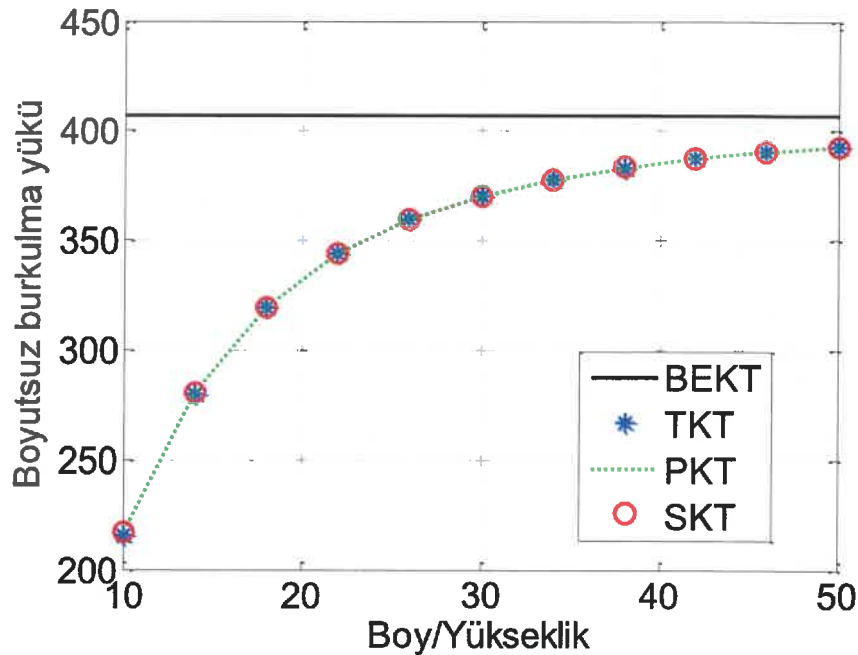
Kiriş teorisi	UD	FD-O	FD-X
BEKT	0.4501	0.2977	0.6104
TKT	0.2760	0.2127	0.3361
TKT*	0.4225	0.2859	0.5628
PKT	0.4234	0.2833	0.5722
SKT	0.4233	0.2835	0.5709

Şekil 4.1-4.5'te boy/yükseklik oranı, malzeme boyut ölçek parametresi/yükseklik oranı, karbon nanotüp hacim fraksiyonu gibi parametrelerin kritik burkulma yükü değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

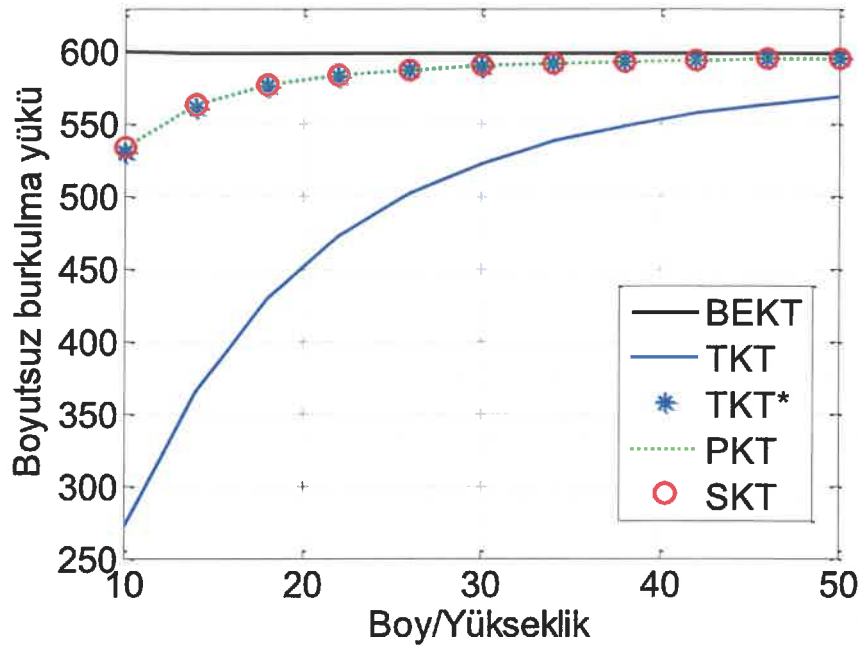
Şekil 4.1 ve 4.2'de sırasıyla farklı kiriş teorilerine dayalı DD kirişe ait klasik ve boyut etkili boyutsuz kritik burkulma yükü ($P_{kr}L^2/(E^pI)$) değerlerinin boy/yükseklik (L/h) oranına bağlı olarak değişimi çizdirilmiştir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi

boy/yükseklik oranı arttıkça BEKT'e dayalı burkulma yükü değerleri sabit kalırken TKT, PKT ve SKT'ye bağlı elde edilen burkulma yükü değerleri artmaktadır. Bu üç kayma deformasyonlu kiriş teorisine dayalı elde edilen sonuçlar neredeyse aynıken BEKT'e bağlı sonuçlar diğerlerinden daha büyüktür. Aradaki bu fark boy/yükseklik oranının küçük olduğu durumlarda çok daha belirgin olup bu oranın artmasına bağlı olarak giderek kaybolmaktadır.

Şekil 4.2'ye bakıldığında boyut etkili kritik burkulma yükü değerlerinin klasik burkulma yükü değerlerinden önemli ölçüde büyük olduğu görülmektedir. Burada dikkat çeken husus TKT'ye göre elde edilen değerlerin diğerlerinden özellikle küçük boy/yükseklik oranlarında belirgin bir biçimde farklı olmasıdır. Ancak, yeni boyut etkili kayma düzeltme faktörüne sahip TKT*'a göre elde edilen burkulma yükü değerlerinin PKT ve SKT ile çok iyi uyum içerisinde olduğu vurgulanabilir.

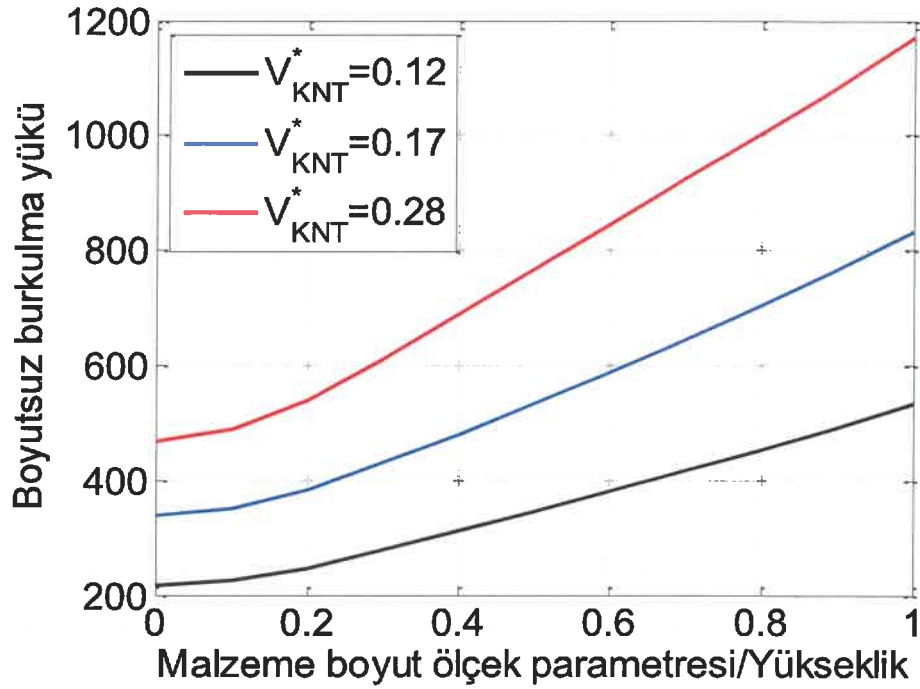


Şekil 4.1. DD kirişe ait klasik boyutsuz kritik burkulma yükü ($P_{kr} L^2 / (E_m I)$) değerlerinin boy/yükseklik (L/h) oranına bağlı olarak değişimi ($l = 0$)

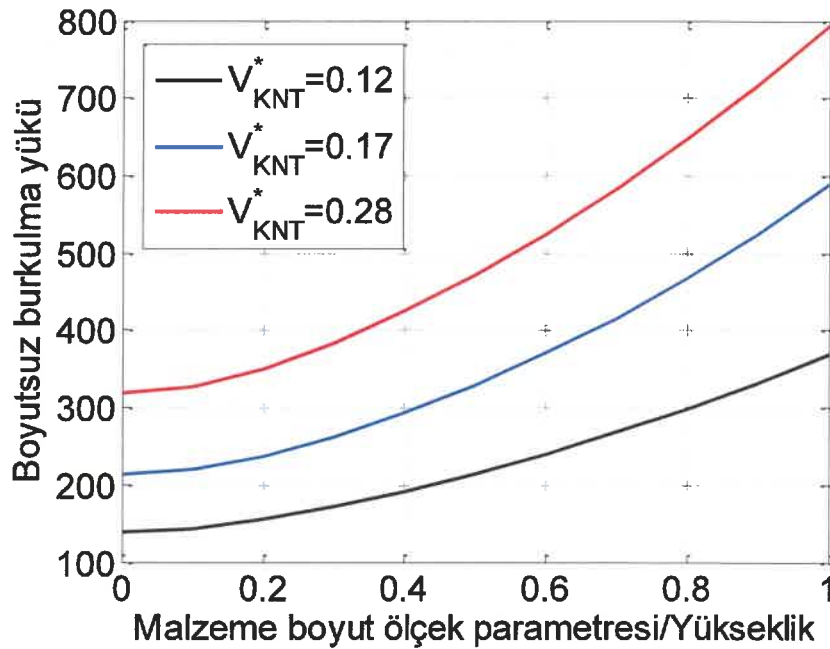


Şekil 4.2. DD kirişe ait boyut etkisinin dikkate alındığı boyutsuz kritik burkulma yükü ($P_{kr}L^2/(E_m I)$) değerlerinin boy/yükseklik (L/h) oranına bağlı olarak değişimi ($l = h$)

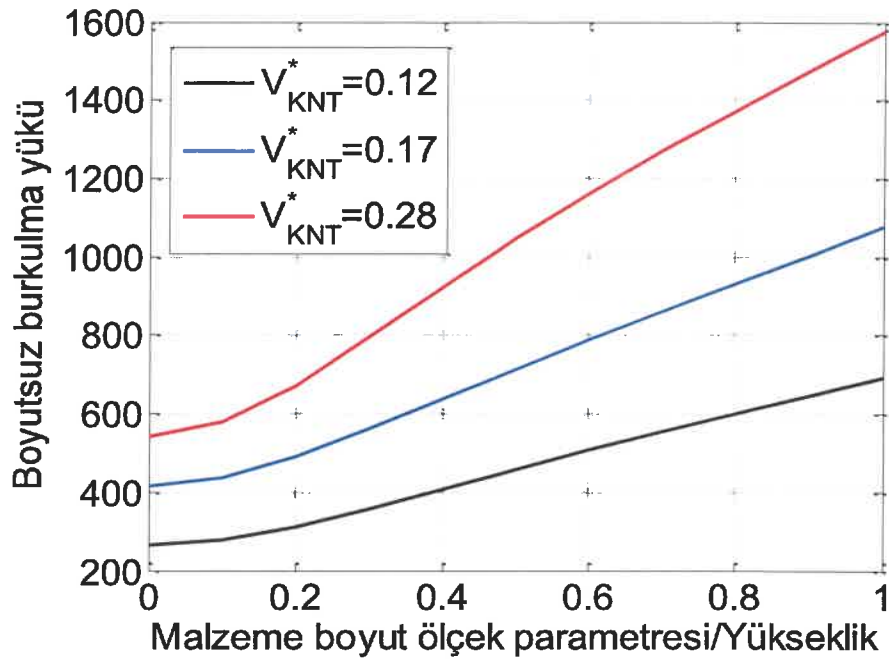
Şekil 4.3-4.5' te sırasıyla DD, FD-O ve FD-X kirişlerin PKT'ye dayalı farklı KNT hacim fraksiyonlarına ait boyutsuz kritik burkulma yükü ($P_{kr}L^2/(E^p I)$) değerlerinin malzeme boyut ölçek parametresi/yükseklik (l/h) oranına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. KNT hacim fraksiyonu değeri arttıkça boyutsuz burkulma yükü değerlerinin de önemli ölçüde arttığı rahatlıkla görülmektedir. KNT'lerin Young modüllerinin çok yüksek olması bu artışın nedeni olarak belirtilebilir. Ayrıca, malzeme boyut ölçek parametresi/yükseklik oranının sıfır olması klasik burkulma yükü değerlerine karşılık gelmektedir. Bu oranın artmasına bağlı olarak kritik burkulma yükü değerleri de gözle görülür biçimde artmaktadır. Dahası, en güçlü modelin FD-X kirişi; en zayıfın ise FD-o kirişi olduğu kritik burkulma yükü değerlerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 4.3. DD kirişin PKT'ye dayalı boyutsuz kritik burkulma yükü ($P_{kr} L^2 / (E^p I)$) değerlerinin malzeme boyut ölçek parametresi/yükseklik (l/h) oranına bağlı olarak değişimi ($L = 10h$)



Şekil 4.4. FD-O kirişin PKT'ye dayalı boyutsuz kritik burkulma yükü ($P_{kr} L^2 / (E^p I)$) değerlerinin malzeme boyut ölçek parametresi/yükseklik (l/h) oranına bağlı olarak değişimi ($L = 10h$)



Şekil 4.5. FD-X kirişin PKT'ye dayalı boyutsuz kritik burkulma yükü ($P_{kr}L^2/(E^pI)$) değerlerinin malzeme boyut ölçek parametresi/yükseklik (l/h) oranına bağlı olarak değişimi ($L = 10h$)

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, karbon nanotüp takviyeli kompozit (KNTTK) mikro kırıların boyut etkili burkulma davranışları incelenmiştir. KNTTK kırılerinin malzeme özellikleri karışım kuralı kullanılarak formüle edilmiştir. Yönetici diferansiyel denklemler değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi teorisi ve çeşitli kayma deformasyonlu kırı teorilerine dayalı olarak minimum toplam potansiyel enerji ilkesi yardımıyla elde edilmiştir. Basit mesnetli KNTTK mikro kırıların çözümü için Navier çözüm yöntemi kullanılmıştır. Matematiksel modellerin geçerliliği, mevcut bazı sonuçlarla karşılaştırılarak sayısal olarak doğrulanmıştır. Boyut ölçek parametresinin, boy/yükseklik oranının, KNT hacim fraksiyonunun, kayma deformasyonunun ve takviye modelinin kritik burkulma yükü değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

KNT hacim fraksiyonu değeri arttıkça boyutsuz burkulma yükü değerlerinin de önemli ölçüde arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Kayma deformasyonu etkisi boy/yükseklik oranının küçük olduğu durumlarda çok daha belirgin olduğu ve bu oranın artmasına bağlı olarak giderek yok olduğu gözlemlenmiştir. Boyut etkisinin hesaba katılmasıyla kritik burkulma yükü değerleri de gözle görülür biçimde artmıştır. Dahası, en güçlü modelin FD-X kırı; en zayıfın ise FD-O kırı olduğu kritik burkulma yükü değerlerinden anlaşılmaktadır. Ek olarak, FD-X kırı en yüksek kritik burkulma yüküne sahip olup bunu sırasıyla DD ve FD-O kırıler takip etmektedir. Buradan takviye modelinin burkulma davranışı üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

6.KAYNAKLAR

- Aghazadeh, R. 2013. Static and free vibration analyses of small-scale functionally graded beams possessing a variable length scale parameter using different beam theories. Yüksek lisans tezi, Middle East Technical University, 90 s.
- Ajayan, P. Zhou, O. 2001. Applications of carbon nanotubes. *Carbon Nanotubes*, 391–425.
- Akbarzadeh-Khorshidi, M. and Shariati, M. 2017. Buckling and postbuckling of size-dependent cracked microbeams based on a modified couple stress theory. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 58(4): 717-724.
- Akbarzadeh-Khorshidi, M. 2019. Postbuckling of viscoelastic micro/nanobeams embedded in visco-pasternak foudation based on the modified couple stress theory. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 1:14 <https://doi.org/10.1007/s11043-019-09439-8>.
- Akbarzadeh-Khorshidi, M. and Shariati, M. 2019. Investigation of flexibility constants for a multi-spring model: a solution for buckling of cracked micro/nanobeams. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 57: 49-58.
- Akgöz, B. and Civalek, Ö. 2011. Strain gradient elasticity and modified couple stress models for buckling analysis of axially loaded micro-scaled beams. *International Journal of Engineering Science*, 49(11): 1268–1280.
- Akgöz, B. and Civalek, Ö. 2013. A size-dependent shear deformation beam model based on the strain gradient elasticity theory, *International Journal of Engineering Science*, 70: 1-14.
- Akgöz, B. and Civalek, Ö. 2014. Thermo-mechanical buckling behavior of functionally graded microbeams embedded in elastic medium. *International Journal of Engineering Science*, 85: 90–104.
- Alemour, B., Bradan. O. Hassan, M.R. 2019. A Review of Using Conductive Composite Materials in Solving Lightning Strike and Ice Accumulation Problems in Aviation. *Journal of Aerospace Technology*, 11: e1919. <https://doi.org/10.5028/jatm.v11.1022>.
- Ansari, R., Gholami, R. and Sahmani, S. 2011. Free vibration analysis of size-dependent functionally graded microbeams based on the strain gradient Timoshenko beam theory. *Composite Structures*, 94(1): 221-228.
- Balasubramanian, K. Burghard, M. 2005. Chemically functionalized carbon nanotubes. *Small*, 1:180–192.
- Beumer, K. 2016. Broadening nanotechnology's impact on development. *Nanotechnol*, 11:398–400.
- Bousahla, A.A., Bourada, F. And Mahmoud, S.R. 2020. Buckling and dynamic behavior of the simply supported CNT-RC beams using an integral-first shear deformation theory. *Computers and Concrete*, 25(2): 155-166 <https://doi.org/10.12989/cac.2020.25.2.155>.

- Chen, X., Ma, L.S., Zheng, Y.M. Lee. D.W. 2011. Theoretical analysis of postbuckling behavior with experimental validation using electrothermal microbeams. *Applied Physics Letters*, 98(7): <https://doi.org/10.1063/1.3555441>.
- Chong, A.C.M. and Lam, D.C.C. 1999. Strain gradient plasticity effect in indentation hardness of polymers. *Journal of Materials Research*, 14(10): 4103–4110.
- Chuang, W.C., Lee, H.L. Chang, P.Z. Hu, Y.C. 2010. Review on the modeling of electrostatic MEMS. *Sensors*, 10(6): 6149–6171. <https://doi.org/10.3390/s100606149>.
- Dos Santos, J.V.A. and Reddy J.N. 2012 Free vibration and buckling analysis of beams with a modified couple-stress theory. *International Journal of Applied*, 4(3): 1250026.
- Dresselhaus, S., Dresselhaus, G., Charlier, C. ve Hernandez, E. 2004. Electronic, thermal and mechanical properties of carbon nanotubes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 362(1823): 2065–2098.
- Dutton, S., Kelly, D. Baker, A. 2004. Composite materials for aircraft structures. Reston: AIAA. <https://doi.org/10.2514/4.861680>.
- Ebrahimi, F. and Fatema, M. 2019. A modified couple stress theory for buckling analysis of higher order inhomogeneous microbeams with porosities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 233(8): 2855-2866.
- Endo, M., Hayashi, T., Ahm Kim, Y. Muramatsu, H. 2008. *Development and application of carbon nanotubes*. AAPS Bull 18:3.
- Eringen, A.C. 1972. Nonlocal polar elastic continua, *International Journal Engineering Science*, 10: 1–16.
- Gay, D. Hoa, S.V. 2007. Composite materials: design and applications. 2nd ed. Boca Raton: CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420045208>.
- Gibson, R.F. 2010. "A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures", *Composite Structures*, Vol. 92 No. 12, pp. 2793-2810.
- Harris, P. 2007. Solid state growth mechanisms for carbon nanotubes. *Carbon*, 45:229–239.
- He, H.; Pham-Huy, L.; Dramou, P.; Xiao, D.; Zuo, P. Pham-Huy, C. 2013. Carbon Nanotubes: Applications in pharmacy and medicine. *BioMed Research International*, 1–12.
- Hong, S. and Myung, S. 2007. Nanotube Electronics: A flexible approach to mobility. *Nature Nanotechnology*, 2: 207–208.
- Iijima, S. 1991. Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, 354 56-58 <https://doi.org/10.1038/354056a0>.
- Iijima, S. Ichihashi, T. 1993. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter, *Nature*, 363 603–605, <https://doi.org/10.1038/363603a0>.

- Jing, G.Y., Duan, H.L., Sun, X.M., Zhang, Z.S., Xu, J.Li., Y.D., Wang, J.X. and Li, Y.D. 2006. Surface effects on elastic properties of silver nanowires: Contact atomic-force microscopy. *Physical Review B*, 73(23): 235409.
- Kamarian, S. Bodaghi, M. and Isfahani, R.B. 2020. A comparison between the effects of shape memory alloys and carbon nanotubes on the thermal buckling of laminated composite beams. *Mechanics Based Design of Structure and Machines*, <https://doi.org/10.1080/15397734.2020.1776131>.
- Kang, I. Vd. 2006. Introduction to carbon nanotube and nanofiber smart materials. *Compos B Eng*, 37:382–394.
- Karamanlı, A. and Vo, T.P. 2021. Bending, vibration, buckling analysis of bi-directional FG porous microbeams with a variable material length scale parameter. *Applied Mathematical Modelling*, 91: 723-748.
- Karami, B., Janghorban, M. Tounsi, A. Galerkin's approach for buckling analysis functionally graded anisotropic nanoplates/ different boundary conditions. *Engineering with Computers*, 2019;35(4): 1297–316.
- Katunin, A., Krukiewicz. K., Turczyn, R., Sul, P. Bilewicz, M. 2017. Electrically conductive carbon fibre-reinforced composite for aircraft lightning strike protection. Presented at: 7th International Conference on Key Engineering Materials; *Penang, Malaysia*, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/201/1/012008>.
- Ke, L.L., Wang, Y.S. and Wang, Z.D. 2011. Thermal effect on free vibration and buckling of size-dependent microbeams. *Physica E: Low-dimensional Systems*, 43(7): 1387-1393 <https://doi.org/10.1016/j.physe.2011.03.009>.
- Khajueenejad, F. Ghanbari, J. 2015. Internal length parameter and buckling analysis of carbon nanotubes using modified couple stress theory and Timoshenko beam model. *Mater Res Express*, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/2/10/105009>.
- Khan, M.I. Lin, F. 2014. Comparative analysis and design of harmonic aware low power latches and flip-flops. In: IEEE 10th international conference on electron devices and solid-state circuits (EDSSC), Chengdu.
- Khan, M.I., Qamar, A., Shabbir, F. Shoukat, R. 2017. Design, development and implementation of Low power and high speed A/D converter in submicron CMOS technology. *Microsystem Technologies*, 23(12): 6005–6014.
- Khan, M.I., Dong, H., Shabbir, F. Shoukat, R. 2018. Embedded passive components in advanced 3D chips and micro/nano electronic systems. *Microsystem Technologies*, 24(2): 869–877.
- Kieback, B., Neubrand, A. and Riedel, H. 2003. "Processing techniques for functionally graded materials", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 362 Nos 1-2, pp. 81-106.
- Kim, J.K. and Sham, M.L. 2000. Impact and delamination failure of woven-fabric composites. *Composites Science and Technology*, 60: 745-751.
- Kocatürk, T. Akbaş, Ş.D. 2013. Wave propagation in a microbeam based on the modified couple stress theory. *Structural Engineering and Mechanics*, 46(3): 417-431.

- Komijani, M., Reddy, J.N. Ferreira, A.J.M. 2014. Nonlinear stability and vibration of pre/post-buckled microstructure-dependent FGPM actuators. *Meccanica*, 49(11):2729–2745. [https:// doi. org/10. 1007/ s11012- 013- 9834-4](https://doi.org/10.1007/s11012-013-9834-4).
- Kong, S. 2021. A Review on the Size-Dependent Models of Micro-beam and Micro-plate Based on the Modified Couple Stress Theory. *Arch Computat Methods Eng*, <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09567-w>.
- Kulkarni, M., Carnahan, D., Kulkarni, K., Qian, D. and Abot, J.L. 2010. Elastic response of a carbon nanotube fiber reinforced polymeric composite: a numerical and experimental study, *Composites Part B: Engineering*, 41: 414–421.
- Kumar, P. and Srinivas, J. 2017. Free vibration, bending and buckling of a FG-CNT reinforced composite beam. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 13 (4): 590-611.
- Lam, D.C.C., Yang, F., Chong, A.C.M. Wang, J., and Tong, P. 2003. Experimental and theory in strain gradient elasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51: 1477-1508.
- Lei, J., He, Y., Guo, S., Li, Z. Liu, D. 2016 Size-dependent vibration of nickel cantilever microbeams: *experiment and gradient elasticity*, AIP Adv 6(10) :51–59.
- Li, H., Pang, F., Miao, X., Du, Y. Tian, H. 2018. A semi-analytical method for vibration analysis of stepped doubly-curved shells of revolution with arbitrary boundary conditions. *Thin Walled Struct*, 129: 125–44.
- Li, Z., He, Y., Lei, J., Guo, S., Liu, D. Wang, L. 2018. A standard experimental method for determining the material length scale based on modified couple stress theory. *International Journal of Mechanical Sciences*, 141: 198-205.
- Li, Z., He, Y., Lei, J., Han, S., Guo, S. Liu, D. 2019. Experimental investigation on size-dependent higher-mode vibration of cantilever microbeams. *Microsystem Technologies*, 25: 3005–3015.
- Liew, K.M. Lei, Z.X. Zhang, L.W. 2015. Mechanical analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composites: A review Author links open overlay panel. *Composite Structures*, 120: 90-97.
- Lubin, G. editor 2013. Handbook of composites. *Boston: Springer*, <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7139-1>.
- Ma, H.M., Gao. X.L. Reddy, J.N. 2008. A microstructure-dependent Timoshenko beam model based on a modified couple stress theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56(12): 3379–3391. [https:// doi. org/10. 1016/j. jmps. 2008. 09. 007](https://doi.org/10.1016/j.jmps.2008.09.007).
- McFarland, A.W. and Colton, J.S. 2005. Role of material microstructure in plate stiffness with relevance to microcantilever sensors. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15 (5): 1060.
- Melechko, A.V., Merkulov, V.I., McKnight, T.E., Guillorn, M.A., Klein, K.L., Lowndes, D.H. Simpson, M.L. 2005. Vertically aligned carbon nanofibers and

- related structures: controlled synthesis and directed assembly. *J Appl Phys*, 97: 041301.
- Mindlin, R.D. ve Tiersten, H.F. 1962. Effects of couple-stresses in linear elasticity. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 11(1): 415–488.
- Mohammad-Abadi, M., Daneshmehr, AR. And Homayounfar, M. 2015. Size dependent thermal buckling analysis of micro composite laminated beams using modified couple stress theory. *International Journal of Engineering Science*, 92: 47–62.
- Mohammadimehr, M., Mohammadi-Dehabadi, A.A., Akhavan alavi, S.M., Alambeigi, K., Bamdad, M., Yazdani, R. And Hanifehlou, S. 2018. Bending, buckling, and free vibration analyses of carbon nanotube reinforced composite beams and experimental tensile test to obtain the mechanical properties of nanocomposite. *Steel and Composite Structures*, 29(3): 405-422 DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2018.29.3.405>.
- Nateghi, A., Salamat-talab, M., Rezapour, J. and Daneshian, B. 2012. Size dependent buckling analysis of functionally graded micro beams based on modified couple stress theory. *Applied Mathematical Modelling*, 36(10): 4971–4987.
- Niino, M. Maeda, S. Recent 1990. development status of functionally gradient materials. *ISIJ INT*. 30: 699–703.
- Numanoğlu, H.M. 2019. Nano ölçekli sürekli ve ayrık sistemlerin yerel olmayan sonlu elemanlar formülasyonu (NL-FEM) ile dinamik analizi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, 252 s.
- Peng, S. vd. 2003. Carbon nanotube chemical and mechanical sensors, pp 1–8.
- Reddy, J.N. 2011. Microstructure-dependent couple stress theories of functionally graded beams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(11): 2382-2399 <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2011.06.008>.
- Robertson, J. 2007 Growth of nanotubes for electronics. *Mater Today* 10: 36–43.
- Rosato, D. 2013 .Designing with plastics and composites: a handbook. Boston: Springer Science & Business Media.
- Ruan, S., Gao, P. Yu, T.X. 2006. Ultra-strong gel-spun UHMWPE fibers reinforced using multiwalled carbon nanotubes. *Polymer* 47: 1604-1611.
- Salvetat, J.P., Bonard, J.M., Thomson, N.H., Kulik, A.J., Forro, L., Benoit, W. Zuppiroli, L. 1999. Mechanical properties of carbon nanotubes. *Appl Phys A Mater Sci Process*, 69: 255–260.
- Shen, H.S. 2009. Nonlinear bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates in thermal environments. *Composite Structures*, 91, 9–19.
- Shoaib, M., Hamid, N.H., Malik, A.F., Zain Ali, N.B. Tariq, Jan, M. 2016. A review on key issues and challenges in devices level MEMS testing. *J Sens*, 1–14.
- Shoukat, R. Khan, M.I. 2018. Design and development of a clip building block system for MEMS. *Microsystem Technologies*, 24(2): 1025–1031.

- Shoukat, R. Khan, M.I. 2019 Synthesis of nanostructured based carbon nanowalls at low temperature using inductively coupled plasma chemical vapor deposition (ICP-CVD). *Microsystem Technologies*, 25: 4439–4444.
- Shoukat, R. Khan, M.I. 2020. Amalgamation of aligned carbon nanostructures at low temperature and the synthesis of vertically aligned carbon nanofibers (CNFs). *Microsystem Technologies*, 26: 1521–1529.
- Şimşek, M. Reddy, J.N. 2013. A unified higher order beam theory for buckling of a functionally graded micro-beam embedded in elastic medium using modified couple stress theory. *Composite Structures*, 101: 47–58.
- Sinha, N., Ma, J. Yeow, J.T.W. 2006. Carbon nanotube-based sensors. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6: 573–590.
- Stölken, J.S. and Evans, A.G. 1998. A microbend test method for measuring the plasticity length scale. *Acta Materialia*, 46(14): 5109–5115.
- Sun, X., Yu, R.Q., Xu, G.Q., Hor, T.S.A. Ji, W. 1998. Broadband optical limiting with multiwalled carbon nanotubes. *Appl Phys Lett*, 73: 3632.
- Tagrara, S.H. Benachour., A., Bouiadjra, M.B. and Tounsi, A. 2015. On bending, buckling and vibration responses of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite beams. *Steel and Composite Structures*, 19(5) : 1259-1277 <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.5.1259>.
- Thostenson, E.T. Chou, T.W. 2003. On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modelling and characterization. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(5) : <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/5/323>.
- Udupa, G., Rao, S., Shrikantha and Gangadharan, K.V. 2014. "Functionally graded composite materials-an overview", *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 1291-1299.
- Vajtai, R., Wei, B.Q. Ajayan, P.M. 2004. Controlled growth of carbon nanotubes. *Philos Trans R Soc Lond Ser A Math Phys Eng Sci*, 362: 2143.
- Wattanasakulpong, N. and Ungbhakorn, V. 2013. Analytical solutions for bending, buckling and vibration responses of carbon nanotube-reinforced composite beams resting on elastic foundation. *Computational Materials Science*, 71: 201–208.
- Yang, F., Chong, A. C. M., Lam, D. C. C., and Tong, P. 2002. Couple stress based strain gradient elasticity. *International journal of Solids and Structures*, 39: 2731-2743.
- Yas, M.H. and Samadi, N. 2012. Free vibrations and buckling analysis of carbon nanotube-reinforced composite Timoshenko beams on elastic foundation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98: 119-128.
- Zerrouki, R. Karas, A. Zidour M. 2020. Critical buckling analyses of nonlinear FG-CNT reinforced nano-composite beam. *Advances in Nano Research*, 9(3): 211-220.
- Zhao, J.X. 2003. Application of carbon composite materials for civil aviation [J]. *Hi tech Fiber & Application* 3.

- Zhang, M. and Li, J. 2009. Carbon nanotube in different shapes. *Materials today*, 12(6): 12-18.
- Zhang, B., He, Y., Liu, D., Gan, Z. Shen, L. 2014. Size-dependent functionally graded beam model based on an improved third-order shear deformation theory. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 47: 211-230.

ÖZGEÇMİŞ

Hoshang FİKRET

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2018-2021	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, İnşaat Mühendislik Bölümü, Antalya
Lisans 2011-2017	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendislik Bölümü, Antalya