**T.C.**

**TRAKYA ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# NANO ÖLÇEKLİ YAPILARDA BURULMA DAVRANIŞININ YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ KULLANILARAK STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ

**MUSTAFA ARDA**

**DOKTORA TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Tez Danışmanı: PROF. DR. Metin AYDOĞDU**

**EDİRNE-2016**

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Murat YURTCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Ayşegül ÖZTÜRK
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımca okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Metin AYDOĞDU
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir Doktora tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

| Jüri Üyeleri | İmza |
|---|---|
| Prof. Dr. Ata MUĞAN | |
| Prof. Dr. Metin AYDOĞDU | |
| Yrd. Doç. Dr. Güler GAYGUSUZOĞLU | |
| Yrd. Doç. Dr. Vedat TAŞKIN | |
| Yrd. Doç. Dr. Andaç ŞAHİN MESUT | |

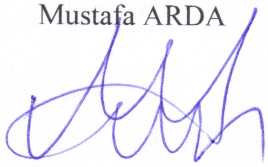
Tarih: 28/12/2016

**T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**
**DOĞRULUK BEYANI**

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

28/12/2016

Mustafa ARDA



Doktora Tezi

Nano Ölçekli Yapılarda Burulma Davranışının Yerel Olmayan Elastisite Teorisi Kullanılarak Statik ve Dinamik Analizi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

## ÖZET

Karbon nanotüpler, sahip olduğu üstün fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Karbon nanotüpler nano-motor, nano-yataklama elemanları, nano-dişli kutuları, nano-sensörler gibi nano-elektromekaniksel parçaların tasarımında kullanılabilirler. Nanotüplerin burulma davranışı geleceğin nano parçaları için önemli bir problem olabilir.

Bu doktora çalışmasında, karbon nanotüplerin statik ve dinamik burulma analizi farklı durum çalışmalarında yapılmıştır. Nanotüp yapısı için sürekli ortam mekaniği modeli Eringen'in Yerel Olmayan Elastisite Teorisi'nden faydalanılarak oluşturulmuştur. Hareketin yönetici denklemleri ve sınır şartları Hamilton Prensibi'nden faydalanılarak çıkarılmıştır. Oluşturulan modelin geçerliliği Moleküler Dinamik Simülasyonu sonuçları ile karşılaştırılarak sağlanmıştır. Elastik ve viskoelastik ortamın, çok duvarlı yapılarda nanotüpler arasında oluşan van der Waals etkileşiminin ve basamak kesitli yapıların karbon nanotüp açısal yer değiştirmesine, burulma titreşimi ve dalga yayılımına olan etkisi araştırılmıştır.

Yerel Olmayan Elastiste Teorisi karbon nanotüplerde klasik sürekli ortam mekaniğine göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Elde edilen sonuçların nano-elektromekaniksel parçaların üretimi ve tasarımında faydalı olacağı düşünülmektedir.

Yıl : 2016

Sayfa Sayısı : 108

Anahtar Kelimeler : karbon nanotüp, yerel olmayan elastisite, burulma, statik analiz, dinamik analiz

Doctoral Thesis

Torsional Static and Dynamic Analysis of Nano Scale Structures Using Nonlocal Elasticity Theory

Trakya University Institute of Natural Sciences

Mechanical Engineering Department

## ABSTRACT

Carbon nanotubes have great potential in many areas due to the advantage of their superior mechanical and physical properties. Carbon nanotubes can be used in designing of nano-electromechanical products like nano-motors, nano-bearings, nano-gearboxes, nano-sensors, etc. Torsion in carbon nanotube has become a interesting problem on future nano-products.

In this doctoral study, torsional static and dynamic analysis of CNTs was investigated on several case studies. Continuum model of carbon nanotube structure has established by using Eringen's Nonlocal Elasticity Theory. Governing equation of motion and boundary conditions have been obtained with the Hamilton Principle. Molecular Dynamics Simulation results have been used on validation of the developed continuum model. Effects of elastic and viscoelastic mediums, van der Waals interaction between nanotubes and heterojunction structures to the angular displacement, torsional vibration and wave propagation of carbon nanotubes have been studied.

Nonlocal Elasticity Theory gives more acceptable results according to classical continuum mechanics model in carbon nanotubes. Present results could be useful in designing and manufacturing of nano-electromechanical products.

Year : 2016

Number of Pages : 108

Keywords : carbon nanotube, nonlocal elasticity, torsion, static analysis, dynamic analysis

# TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başından sonuna kadar emeği geçen, teknik bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen ve akademik hayatta bana yol gösteren saygıdeğer hocam ve danışmanım Prof. Dr. Metin AYDOĞDU'ya tüm katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Doktora Tez Savunma Sınavı Jüri üyeliğini kabul ederek yapıcı ve öğretici yorumlarıyla tezime katkıda bulunan İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Ata MUĞAN ve Namık Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Güler GAYGUSUZOĞLU Hocalarıma teşekkür ederim.

Doktora Tez İzleme Komitesi üyeleri çok değerli Hocalarım Yrd. Doç. Dr. Vedat TAŞKIN ve Yrd. Doç. Dr. Andaç ŞAHİN MESUT'a gösterdikleri ilgi ve yönlendirmeleri sebebiyle teşekkür ederim.

Doktora öğrenimi süresince yoğun zamanlarımda anlayışlı davranan tüm çalışma arkadaşlarıma ve öğrenim hayatım boyunca beni sürekli destekleyen aileme teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

**ŞEKİL LİSTESİ** ..... **ix**
**TABLO LİSTESİ** ..... **xiii**
**SİMGE DİZİNİ** ..... **xiv**
KISALTMALAR ..... xvi
**1. GİRİŞ** ..... **1**
1.1. Problem ve Önemi ..... 4
1.2. Bu Çalışma ile Amaçlananlar ..... 5
**2. KAYNAK ARAŞTIRMASI** ..... **6**
2.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerle İlgili Çalışmalar ..... 6
2.2. Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerle İlgili Çalışmalar ..... 8
2.3. Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerde Dalga Yayılımıyla İlgili Çalışmalar ..... 9
2.4. Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerde Dalga Yayılımıyla İlgili Çalışmalar ..... 10
2.5. Basamak Kesitli Karbon Nanotüplerin Titreşimiyle İlgili Yapılan Çalışmalar ..... 12
2.6. Karbon Nanotüplerin Burulma Titreşimiyle İlgili Çalışmalar ..... 14
**3. YÖNETİCİ DENKLEMLERİN YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ İLE ELDE EDİLMESİ** ..... **16**
3.1. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi ..... 16
3.2. Karbon Nanotüplerin Burulma Davranışı İçin Yerel Olmayan Elastisite Yaklaşımı ..... 20
3.3. Yönetici Denklemlerin Hamilton Prensibi ile Elde Edilmesi ..... 21
3.4. Modelin Geçerliliği ..... 23
3.4.1. Karbon Nanotüp Fiziksel ve Mekanik Özellikleri ..... 25
3.4.2. Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerde Burulma Dalgalarının Yayılımı ..... 27
**4. KARBON NANOTÜPLERİN STATİK VE DİNAMİK BURULMA ANALİZİ** ..... **31**
4.1. Statik Analiz ..... 31
4.1.1. Karbon Nanotüpün Elastik Ortam İçerisindeki Davranışı ..... 31

4.2. Dinamik Analiz ..... 36
4.2.1. Karbon Nanotüpün Elastik Ortam İçerisindeki Dinamik Davranışı ..... 36
4.2.2. Karbon Nanotüpün Viskoelastik Ortam İçerisindeki Davranışı ..... 37
4.2.3. Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Titreşimi ..... 39
4.2.4. Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerde Burulma Dalga Yayılımı ..... 44
4.2.5. Basamak Kesitli Karbon Nanotüp Yapılarının Burulma Titreşimi ..... 47
**5. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA ..... 50**
5.1. Statik Analiz ..... 50
5.1.1. Karbon Nanotüpün Elastik Ortam İçerisindeki Davranışı ..... 50
5.2. Dinamik Analiz ..... 55
5.2.1. Karbon Nanotüpün Elastik Ortam İçerisindeki Davranışı ..... 55
5.2.2. Karbon Nanotüpün Viskoelastik Ortam İçerisindeki Davranışı ..... 60
5.2.3. Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Burulma Titreşimi ..... 63
5.2.4. Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerde Burulma Dalga Yayılımı ..... 71
5.2.5. Basamak Kesitli Karbon Nanotüplerin Burulma Titreşimi ..... 78
**6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME ..... 87**
**KAYNAKLAR ..... 89**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 106**
**TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER ..... 107**

# ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Karbon Nanotüp Yapılarının AKM ile Çekilmiş Fotoğrafı ..... 4
Şekil 2.1 Tek Duvarlı Karbon Nanotüp Yapısının Atomik Kafes Yapısı ..... 7
Şekil 2.2 Çift Duvarlı Karbon Nanotüp Yapısının Atomik Kafes Yapısı ..... 9
Şekil 2.3 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Yapısının Atomik Kafes Yapısı ..... 11
Şekil 2.4 Basamak kesitli Karbon Nanotüp Yapısının Atomik Kafes Yapısı ..... 13
Şekil 3.1 Malzeme Kafes Yapısının Atomik Model ile Gösterimi ..... 17
Şekil 3.2 Bir Boyutlu Kütle-Yay Sistemi Süreklilik Modeli ..... 18
Şekil 3.3 Çeşitli Azalma Fonksiyonu Örnekleri: a)Hata Fonksiyonu b)Çan Fonksiyonu c)Konik Fonksiyonu ..... 19
Şekil 3.4 Karbon Nanotüp Atomik ve Sürekli Ortam Modeli ..... 20
Şekil 3.5 Bir boyutlu Karbon Nanotüp Ayrık Modeli ..... 24
Şekil 3.6 Karbon Nanotüp Kafes Yapısında Şiral Açılarının Oluşumu ..... 25
Şekil 3.7 a)Zikzak ve b)Koltuk Kafes Yapısına Sahip Karbon Nanotüpler ..... 26
Şekil 3.8 Burulma Dalga Yayılımı Frekansının Farklı Teorilere Göre Değişimi ..... 28
Şekil 3.9 $e_0$ Sabiti ile Dalga Yayılımı Frekansının Değişimi ..... 29
Şekil 3.10 Faz Hızının Farklı Teorilere Göre Değişimi ..... 30
Şekil 3.11 Grup Hızının Farklı Teorilere Göre Değişimi ..... 30
Şekil 4.1 Karbon Nanotüp ve İçinde Bulunduğu Elastik Ortam Modeli ..... 32
Şekil 4.2 Statik Analizdeki Tork Yüklemeleri ..... 33
Şekil 4.3 Karbon Nanotüpün Viskoelastik Ortam İçerisindeki Modeli ..... 38
Şekil 4.4 Çift Duvarlı Karbon Nanotüp Modeli ..... 40
Şekil 4.5 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Yapısındaki van der Waals Etkileşimi ..... 41
Şekil 4.6 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Atomik Kafes Yapısı Modeli ..... 44
Şekil 4.7 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Yapısındaki van der Waals Etkileşimi ..... 45
Şekil 4.8 Basamak Kesitli Karbon Nanotüp Yapısı a)Ankastre-Ankastre b)Ankastre-Serbest Sınır Şartları ..... 47
Şekil 5.1 BAYD'nin Nanotüp Boyunca Değişimi ..... 50
Şekil 5.2 BAYD'nin Farklı $\mu$ ve $L$ Değerlerinde Değişimi ..... 51

Şekil 5.3 BAYD'nin Elastik Ortamın Sertliği ile Değişimi ..... 52
Şekil 5.4 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $\mu$ ile A-A Sınır Şartında Değişimi ..... 52
Şekil 5.5 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $\mu$ ile A-S Sınır Şartında Değişimi ..... 53
Şekil 5.6 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $L$ ile A-A Sınır Şartında Değişimi ..... 53
Şekil 5.7 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $L$ ile A-S Sınır Şartında Değişimi ..... 54
Şekil 5.8 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $R_1$ ile A-A Sınır Şartında Değişimi ..... 54
Şekil 5.9 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $R_1$ ile A-S Sınır Şartında Değişimi ..... 55
Şekil 5.10 BFP'nin Elastik Ortamın Sertliği ve $\mu$ ile Değişimi ..... 56
Şekil 5.11 FPO'nun Elastik Ortamın Sertliği ile Değişimi ..... 57
Şekil 5.12 BFP'nin Nanotüp Boyu ve $\mu$ ile Değişimi ..... 57
Şekil 5.13 FPO'nun Nanotüp Boyu ile Değişimi ..... 58
Şekil 5.14 FPO'nun Nanotüp İç Yarıçapı ile Değişimi ..... 58
Şekil 5.15 FPO'nun Yeel Olmayan Parametre ($\mu$) ve Elastik Ortamın Sertliği ile Değişimi ..... 59
Şekil 5.16 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=5nm, $C = 0$) ..... 60
Şekil 5.17 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=20nm, $C = 0$) ..... 61
Şekil 5.18 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=5nm, $C = 0.678$) ... 61
Şekil 5.19 Boyutsuz Sönümün Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($K = 1$) ..... 62
Şekil 5.20 Frekansın Boyutsuz Sönüm Parametresi ve Boyutsuz Sertlik Parametresi ile Değişimi ($\mu$=2nm$^2$ , $L$=5nm) ..... 62
Şekil 5.21 Frekansın Boyutsuz Sönüm Parametresi ve Nanotüp Uzunluğu ile Değişimi ($\mu$=2nm$^2$ , $K = 1$) ..... 63
Şekil 5.22 (a) Küçük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu (b) Büyük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu ($C_t$=0.0001$C_{vdW}$) ..... 66
Şekil 5.23 (a) Küçük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu (b) Büyük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu ($L$=20 nm) ..... 66
Şekil 5.24 (a) Küçük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu (b) Büyük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu ($\mu$=1 nm$^2$) ..... 67

Şekil 5.25 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpün Mod Şekilleri ($L$=5 nm, $\mu$=0 nm$^2$, $C_t$=0.0001$C_{vdW}$ erg/m) ..... 68
Şekil 5.26 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpün Mod Şekilleri ($L$=5 nm, $\mu$=2 nm$^2$, $C_t$=0.0001$C_{vdW}$ erg/m) ..... 68
Şekil 5.27 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpün Mod Şekilleri ($L$=50 nm, $\mu$=2 nm$^2$, $C_t$=0.0001C erg/m) ..... 69
Şekil 5.28 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpün Mod Şekilleri (L=5 nm, $\mu$=2 nm$^2$, $C_t$= 0.01$C_{vdW}$ erg/m) ..... 69
Şekil 5.29 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpün Mod Şekilleri ($L$=50 nm, $\mu$=2 nm$^2$, $C_t$=0.01$C_{vdW}$ erg/m) ..... 70
Şekil 5.30 Genlik Oranının $\mu$ ile Değişimi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$ erg/m) ..... 70
Şekil 5.31 Genlik Oranının $C_t$ ile Değişimi ($\mu$=1 nm$^2$) ..... 71
Şekil 5.32 Burulma Dalga Yayılımı Frekansına Yerel Olmayan Teori Etkisi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$) ..... 72
Şekil 5.33 Faz Hızının Dalga Yayılım Frekansına Göre Değişimi ($C_t$=0.0001$C_{vdW}$) 72
Şekil 5.34 Faz Hızının Dalga Yayılım Frekansına Göre Değişimi ($C_t$=0.001$C_{vdW}$) .. 73
Şekil 5.35 Faz Hızının Dalga Yayılım Frekansına Göre Değişimi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$) .... 73
Şekil 5.36 Grup Hızının 10 Duvarlı Nanotüp için Dalga Sayısı ile Değişimi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$) ..... 74
Şekil 5.37 Grup Hızının 20 Duvarlı Nanotüp için Dalga Sayısı ile Değişimi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$) ..... 75
Şekil 5.38 Grup Hızının 50 Duvarlı Nanotüp için Dalga Sayısı ile Değişimi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$) ..... 75
Şekil 5.39 Genlik Oranının Farklı Nanotüpler için Frekans Sayısı ile Değişimi ($k$=π/2a , $\mu$=0.003 nm$^2$ , $C_t$=0.0001$C_{vdW}$) ..... 77
Şekil 5.40 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=10nm , $\gamma$=0.46) ..... 79
Şekil 5.41 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=20nm , $\gamma$=0.46) ..... 79
Şekil 5.42 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=10nm , $\gamma$=0.67) ..... 80
Şekil 5.43 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=20nm , $\gamma$=0.67) ..... 80
Şekil 5.44 Karakteristik Parametrenin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=10nm , $\gamma$=0.46) ..... 81
Şekil 5.45 Karakteristik Parametrenin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=20nm , $\gamma$=0.46) ..... 81

Şekil 5.46 Karakteristik Parametrenin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=10nm , $\gamma$=0.67)..... 82
Şekil 5.47 Karakteristik Parametrenin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=20nm , $\gamma$=0.67)..... 82
Şekil 5.48 Birleştirilmiş Karbon Nanotüp Yapısının Mod Şekilleri ($L$=10nm , $\gamma$=0.46) ..... 83
Şekil 5.49 Birleştirilmiş Karbon Nanotüp Yapısının Mod Şekilleri ($L$=20nm , $\gamma$=0.46) ..... 83
Şekil 5.50 Birleştirilmiş Karbon Nanotüp Yapısının Mod Şekilleri ($L$=10nm , $\gamma$=0.67) ..... 84
Şekil 5.51 Birleştirilmiş Karbon Nanotüp Yapısının Mod Şekilleri ($L$=20nm , $\gamma$=0.67) ..... 84
Şekil 5.52 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=5nm , $\gamma$=0.22) ..... 85
Şekil 5.53 Karakteristik Parametrenin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi..... 85
Şekil 5.54 Birleştirilmiş Karbon Nanotüp Yapısının Mod Şekilleri ($L$=5nm , $\gamma$=0.22) ..... 86

# TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Karbon Nanotüp için Fiziksel Özellikler ..... 26
Tablo 3.2 Burulma Dalga Yayılımı Frekansları (rad/s) ..... 28
Tablo 5.1 Çift Duvarlı Karbon Nanotüp İçin Doğal Frekanslar (THz) ($C_t$=0.0001$C_{vdW}$) ..... 64
Tablo 5.2 Çift Duvarlı Karbon Nanotüp İçin Doğal Frekanslar (THz) ($L$=10nm) .... 65
Tablo 5.3 Çeştili Rezonans Frekanslarında Karbon Nanotüplerin Genlik Oranları ($k$=π/2a , $C_t$=0.01$C_{vdW}$) ..... 76
Tablo 5.4 Çeştili van der Waals Etkileşimi Değerlerinde Çok Duvarlı Karbon Nanotüpün Kesme ve Kaçma Frekansları ($\mu$=0.003 nm$^2$) ..... 77

# SİMGE DİZİNİ

| | |
|---|---|
| $a$ | İki karbon atomu arasındaki uzaklık |
| $A$ | Karbon nanotüp kesit alanı |
| $\alpha$ | Karbon nanotüp karakteristik değeri |
| $\beta$ | Karbon nanotüp karakteristik değeri |
| $c$ | Ses hızı |
| $\bar{C}$ | Boyutsuz sönüm parametresi |
| $C_{vdW}$ | van der Waals etkileşimi katsayısı |
| $C_t$ | Çevresel van der Waals etkilişimi katsayısı |
| $c_t$ | Viskoelastik ortam sönümü |
| $\Delta s$ | Açısal yer değiştirme yay uzunluğu |
| $\varepsilon$ | Genleme tensörü |
| $e_0$ | Eringen sabiti |
| $E$ | Young modülü |
| $E_K$ | Kinetik enerji |
| $E_P$ | Genleme potansiyel enerjisi |
| $f_{vdW}$ | van der Waals etkileşimi kuvveti |
| $f$ | Açısal frekans |
| $\emptyset$ | Çevresel deformasyon açısı |
| $\psi$ | Açısal yer değiştirme genliği |
| $G$ | Kayma modülü |
| $\gamma$ | Kayma genlemesi |
| $h$ | Karbon nanotüp kalınlığı |
| $I_P$ | Kutupsal atalet momenti |
| $\bar{K}$ | Boyutsuz sertlik parametresi |
| $k_t$ | Elastik ortam sertliği |
| $k$ | Dalga sayısı |
| $L$ | Karbon nanotüp uzunluğu |
| $\lambda$ | Karbon nanotüp karakteristik değeri |

| | |
|---|---|
| $m$ | Mod sayısı |
| $\mu$ | Yerel olmayan parametre |
| $\Omega$ | Boyutsuz frekans parametresi |
| $R_1$ | Karbon nanotüp iç yarıçapı |
| $R_2$ | Karbon nanotüp dış yarıçapı |
| $\rho$ | Yoğunluk |
| $S$ | Kesme kuvveti bileşkesi |
| $T$ | Tork |
| $T_0$ | Uniform tork yükü |
| $T_\theta$ | van der Waals kuvvetiyle oluşan tork |
| $\tau$ | Gerilme tensörü |
| $\theta$ | Açısal yer değiştirme |
| $\bar{\theta}$ | Boyutsuz açısal yer değiştirme |
| $v_P$ | Faz hızı |
| $v_G$ | Grup hızı |
| $W$ | Toplam sanal iş |
| $\omega$ | Dalga yayılım frekansı |
| $\bar{x}$ | Boyutsuz karbon nanotüp uzunluğu |

## KISALTMALAR

| | |
|---|---|
| AKM | Atomik kuvvet mikroskobu |
| A-A | Ankastre-Ankastre |
| A-S | Ankastre-Serbest |
| BAYD | Boyutsuz açısal yer değiştirme |
| BFP | Boyutsuz frekans parametresi |
| BKP | Boyutsuz karakteristik parametre |
| BSP | Boyutsuz sönüm parametresi |
| DTY | Doğrusal tork yükü |
| FPO | Frekans parametresi oranı |
| KNT | Karbon nanotüp |
| MD | Moleküler dinamik |
| Ref | Referans |
| STY | Sinüsoidal tork yükü |
| TTM | Taramalı tünelleme mikroskobu |
| UTY | Uniform tork yükü |
| vdW | van der Waals |

# BÖLÜM 1

# GİRİŞ

Nanoteknoloji günümüz bilim insanları ve mühendisleri için oldukça ilgi çekici bir alandır. Yaklaşık son 50 yıllık süreçte oldukça hızlı ilerleme kaydetmiş ve geleceğin mühendislik uygulamalarında önemli bir yer teşkil edeceği öngörülmektedir.

Nanoteknolojinin temelleri, Amerikalı fizikçi Richard Feynman'ın Aralık 1959'da California Institue of Technology'de gerçekleşen American Physical Society toplantısında yaptığı "There's Plenty of Room at the Bottom" [1] isimli konuşmasıyla atıldı:

*"I would like to describe a field, in which little has been done, but which an enormous amount can be done in principle. This field is not quite the same as the others…. Furthermore, a point that is most important is that it would have an enormous number of technical applications. What I want to talk about is the problem of manipulating and controlling things on a small scale."*

Feynman bu konuşmasında atom ve moleküllerin istenilen özellikler doğrultusunda ve belli bir düzende sıralanarak olması imkansız gibi gözüken uygulamaların başarılabileceğinden bahsetmişti. Bu fikir, dünya çapında bilim insanlarının nano boyutla ilgili hayal gücünde yeni bir çığır açmıştır. Bundan sonra atılan en büyük adım ise "Taramalı Tünelleme Microskobu(TTM)"nin bulunması olmuştur. Gerd Binnig ve Heinrich Roher [2–4], 1981 yılında IBM Zurich Araştırma Laboratuvarında yaptıkları bu çalışma ile 1989 yılında Nobel Ödülü'nü kazanmışlardır. TTM mikroskobu ile bilim insanları atomik ölçekteki yapıların fotoğraflarını elde etmişler ve bu yapılar hakkında bilgi sahibi olmuşlardır. Bu gelişme daha sonraki yıllarda karbon nanotüplerin ve fullerenlerin keşfine ön ayak olmuştur. Binnig, Calvin Quate ve Chirtopher Gerber [5] ilk "Atomik Kuvvet Mikroskobu(AKM)"yi 1986 yılında bulmuşlardır. Nanoteknoloji kelimesi ise ilk kez

Tokyo Bilim Üniversitesi'nden Nario Taniguchi [6] tarafından 1974 yılında kullanılmıştır. Taniguchi, yarı iletkenlerle ilgili iyon ışınları kullanarak film kaldırma işlemini atomik ölçekte tanımlamıştır. 1991 yılında bu alandaki ilk doktora tezi K. Eric Drexler tarafından MIT Media Lab.'da "Moleculer Machinery and Manufacturing with Applications to Computation" [7] isimli çalışma ile yapılmıştır. TTM'lerin ilk kez gerçek kullanımı IBM araştırmacısı Don Eigler [8] tarafından 35 Xenon atomunun manipüle edilmesiyle gerçekleşmiştir.

Nanoyapıların teknolojik kullanımı açısından sahneye çıkışı Fullerene'lerin kaza sonucu da olsa Richard Smalley, Harry Kroto ve Robert Curl [9] tarafından 1985 yılında bulunmasıyla olmuştur. Bu çalışmalarıyla 1996 yılında Nobel Ödülü'nü almaya hak kazanmışlardır.

Karbon nanotüp(KNT)'lerin keşfi ise 1991 yılında Suomi Iijima [10] tarafından gerçekleştirilmiştir. Ancak KNT'lerin varlığı daha önceki çalışmalarda teorik olarak tahmin edilmişti. Iijima çok duvarlı karbon nanotüpleri çözünmeyen grafit çubuklar içinde üretmeyi başarmıştır. Aslında fulleren üretmeye çalışırken istenmeyen sonuç olarak KNT yapılarını gözlemlemiştir. Mintmire, Dunlap ve White [11], tek duvarlı karbon nanotüpleri ilk olarak üretmişler ve olağanüstü iletim özelliklerini deneysel sonuçlar ile ortaya koymuşlardır. Bu iki çalışma bilim dünyasında büyük yankı uyandırmıştır. Tek duvarlı karbon nanotüpler üzerine Bethune ve Iijima [12–15]'nın yaptığı çalışmalar gelişmeleri hızlandırmıştır. Bu çalışmalara göre, karbon nanotüplerin çapı birkaç nanometre iken boyları birkaç mikrometreye kadar çıkabilmektedir. Yani karbon nanotüpler oldukça büyük boyut oranına sahip olabilirler. Bu nedenle bu yapının daha farklı elektronik, mekanik ve moleküler özellikleri olacağı düşünülmüştür. Özellikle keşfinin ilk yıllarındaki bütün teorik çalışmalarda karbon nanotüplerin bir boyutlu yapısındaki elektronik ve mekanik özelliklere odaklanılmıştır.

Günümüzde nanoteknoloji birçok disipline ayrılmıştır. Karbon nanotüpler ile ilgili inanması güç bir sürü uygulama bilim insanları ve mühendisler tarafından tasarlanmaktadır. Örnek olarak nanoteknoloji sayesinde, hava araçlarının %98 daha hafif yapısal elemanlara sahip olacağına dair öngörüler vardır. Kullanılmakta olan geleneksel malzemelere göre daha yüksek mekanik dayanım, düşük yoğunluk, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği gibi fiziksel özellikleri karbon nanotüpleri geleceğin endüstrisinde önemli bir konuma getirmektedir.

Nano yapıların modellenmesinde genel olarak üç yaklaşım kullanılmaktadır: Sürekli ortam modeli, ayrık model ve deneysel model. Karbon nanotüp ve grafen ile yapılan ilk çalışmalar deneysel metod kullanılarak gerçekleştirilmiştir [16,17]. Deneysel yaklaşım, nano yapıların statik ve dinamik davranışının anlaşılmasında tabii ki daha gerçekçi ve geçerli sonuçlar vermektedir. Ancak nano boyuttaki her bir parametreyi kontrol etmenin zorluğu deneysel yaklaşımı karmaşık hale getirmektedir.

Moleküler Dinamik(MD) Simülasyonu ve Kafes Dinamiği gibi atomik ölçekteki modellemeler ayrık modellerdir. Deneysel modelin mevcut fiziksel zorluklarından dolayı birçok bilim insanı atomik simülasyonlara yönelmiştir. Moleküler dinamik simülasyonunda bilgisayar programları ile nano yapı içindeki her bir atom ve molekülün fiziksel hareketi göz önüne alınmaktadır. N adet atomdan oluşan yapıdaki her bir atomun hızı ve konumu modellenmektedir. Newton'un hareket denklemleri kullanılarak atomların izlediği yörüngeler belirlenir. Parçacıklar arasındaki kuvvetler ve potansiyel enerji moleküler mekanik kuvvet alanları göz önüne alınarak tanımlanır. MD simülasyonu çok fazla hesap gücü gerektirdiğinden kaynak, zaman ve para açısından dezavantajlara sahiptir.

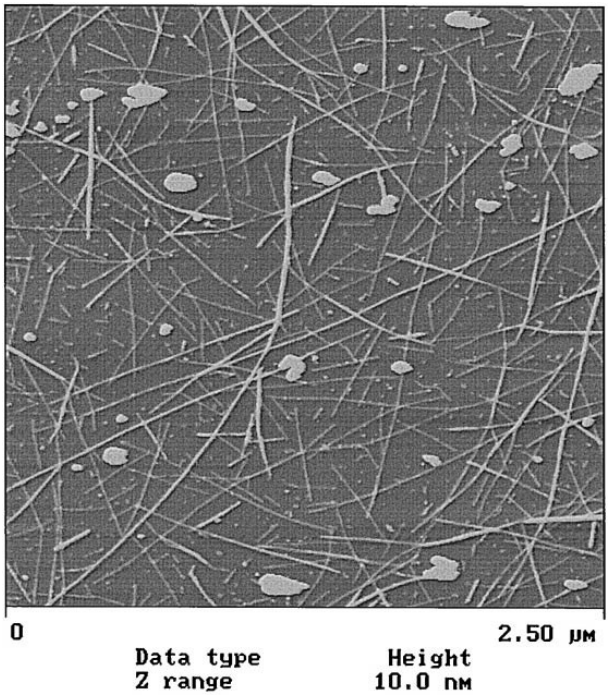
Klasik sürekli ortam modeli, ayrık modelden farklı olarak ayrık atomlar yerine nano yapıyı karbon atomları arasında hiç boşluk olmayan sürekli kütlesel bir yapı olarak tanımlar. Sürekli mekanik modelde kullanılan Euler-Bernoulli kiriş teorisi, Timoshenko kiriş teorisi, klasik kabuk teorisi nano yapılarda da kullanılabilmektedir. Süreklilik (yerel elastisite) teorisi bir noktadaki gerilmenin sadece o noktadaki genlemeye bağlı olduğu temel ilişkisine dayanır. Ancak deneysel ve MD simülasyonlarından elde edilen sonuçlar klasik sürekli mekanik yaklaşımın nano boyutta geçerli olmadığını göstermektedir. Atomik ölçekteki etkileşimler ve gerilmeler küçük ölçek etkisi olarak da adlandırılan boyut etkisine neden olmaktadır. Deneysel çalışmalarda da boyut etkisi gözlenmiştir. Nano yapılardaki süreksizlikleri klasik sürekli mekanik teorisi ile modelleyebilmek için süreklilik teorisinde küçük ölçek etkisini de göz önüne alan değişiklikler yapmak gerekir.

Klasik süreklilik teorisini nano boyut için yeniden yorumlayan Eringen, Yerel Olmayan Elastisite Teorisi ile küçük ölçek etkisini ve uzun mesafe etkileşimlerini dikkate almıştır. Yerel olmayan elastisite teorisi diğer atomların etkisini de göz önüne alır. Bu teoriye göre: "Süreklilikte bir noktadaki gerilme etrafındaki diğer noktaların gerilmelerinin fonksiyoneli olarak ifade edilebilir". Dolayısıyla bir

noktadaki gerilme etrafında yer alan diğer noktalara da bağlı olur. Bu tür yaklaşım atomik ölçekte yerel teoriye göre daha tutarlı ve geçerli sonuçlar vermektedir.

## 1.1. Problem ve Önemi

Nano kirişler veya nano çubuklar gibi yapılar tek boyutlu olarak sınıflandırılmaktadır. Nano-elektormekanik sistemlerin modellenmesinde bu yapılar kullanılmaktadırlar. Şekil (1.1)'de karbon nanotüpün AKM(Atomik Kuvvet Mikroskobu) ile çekilmiş fotoğrafı görülmektedir [18]. Nano kablolar ise yine tek boyutlu yapılar olmalarına rağmen boyut oranları(boy/çap) oldukça büyüktür. Gelecekte, bilgisayarlarda ve güneş panellerinin geliştirilmesinde kullanılması düşünülmektedir. Özellikle silisyum tabanlı mikroişlemcilerdeki transistörlerin 16nm sınırına dayanması ve transistör sayısının Moore Yasası'na göre artık artış gösterememesi yeni yarıiletken arayışlarını beraberinde getirmiştir. Atom ölçeğindeki karbon nanotüp benzeri yapıların modellenmesi ve elektronik veya mekanik parçalar olarak kullanılması mümkündür.




Şekil 1.1 Karbon Nanotüp Yapılarının AKM ile Çekilmiş Fotoğrafı

Nanotüpler, üstün mekanik, ısıl ve elektriksel özelliklerinden dolayı nano ölçekteki yapıların arasında en fazla dikkat ve ilgi çeken yapılardır. Uzun ve ince

silindirik yapıda karbon atomlarının periyodik altıgen düzende bir araya gelmesiyle oluşur. Tek duvarlı ve çok duvarlı yapılarda bulunmaktadırlar. Çok duvarlı karbon nanotüpler, farklı çaptaki tek duvarlı karbon nanotüplerin iç içe geçerek bir arada yer almasıyla oluşurlar. Karbon nanotüpler, süper kapasitörlerde elektrod, uzay asansörlerinde kablo malzemesi, nano ölçekteki aletlerde yapısal malzeme olarak, nano-kompozitlerde destekleyici olarak, biyomedikal, biyoelektriksel, çok hızlı mikro-elektronik çiplerde ve güneş hücrelerinde kullanılması düşünülmektedir.

Nano boyuttaki yapıların deneysel, hesaplamalı ve sürekli mekanik teorisine göre analizleri geleceğin nano-mühendislik uygulamalarında önemli yer tutacaktır. Bu bağlamda nanotüpler kullanım alanlarında burulmaya maruz kalmaktadırlar.

## 1.2. Bu Çalışma ile Amaçlananlar

Bu çalışmada nanotüplerin statik ve dinamik burulma problemi incelenmiştir.

Bölüm 2'de karbon nanotüpler ile ilgili literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bölüm 3'de, karbon nanotüp yapısının sürekli mekanik modeli, Yerel Olmayan Elastisite Teorisi ve Hamilton Prensibi kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin geçerliliği Kafes Dinamiği ve MD simülasyonu sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 4'de, burulma davranışının statik ve dinamik analizi, burulma titreşimi, çoklu duvar yapıları, basamak kesitli nanotüp yapıları gibi farklı örnek durumlar için geliştirilen model kullanılmıştır. Bölüm 5'de ise çalışılan örnek durumların analiz sonuçları paylaşılmıştır. Son bölümde ise çalışmanın genel değerlendirmesi yapılmıştır.

Mevcut çalışma ile öncelikli olarak literatürde bu alan ile ilgili bulunan boşluk doldurulmak istenmiştir. Elde edilen sonuçların gelecekte tasarlanacak olan nano elektromekanik sistemlerin tasarımına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

# BÖLÜM 2

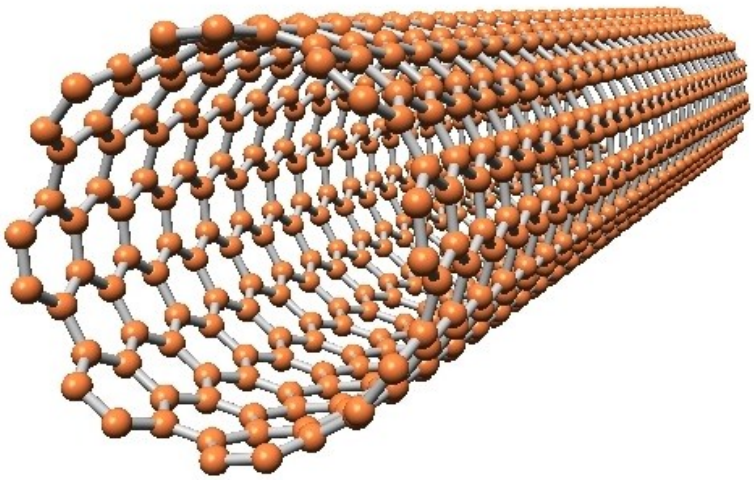
# KAYNAK ARAŞTIRMASI

Karbon nanotüpler bilim insanları için görece yeni bir konu olduğundan bu alanla ilgili çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Özellikle uygulama alanlarının sürekli artması karbon nanotüpler ile ilgili çalışmaların sayısını her geçen gün artırmaktadır. Dong ve diğ. [19] nano ölçekteki konum algılamalı doğrusal servo motorları deneysel, teorik ve tasarım parametreleri açısından incelemişlerdir. Hall ve diğ. [20] karbon nanotüplerin üretim yöntemlerinde gerçekleşen önemli gelişmeleri değerlendirmişlerdir. Yeni yöntemlerle uygulanan döndürme kuvvetinin mekanik ve elektriksel tepkisinin ölçülmesi mümkün olmaktadır. Karbon nanotüpleri nano-elektromekanik parçalar [21,22], ilaç endüstrisi [23] , nano-yataklama elemanları [24,25] ve nano-osilatörler [26] gibi çeşitli alanlarda kullanma çalışmaları yapılmaktadır. Örnek olarak çok duvarlı karbon nanotüp yataklama elemanı etrafında dönen bir plakadan oluşan nano-elektromekanik sistem tasarlanmıştır [24,25]. Statik ve dinamik analiz ile ilgili ilk çalışmalar 20 yıl öncesine dayanmaktadır.

## 2.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerle İlgili Çalışmalar

Tek duvarlı karbon nanotüpler ile ilgili statik analiz ilk olarak Peddieson [27] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yerel olmayan Euler-Bernoulli kiriş modelini kullanarak nano-kirişlerin statik analizini yapmıştır. Sudak [28] kiriş burkulmalarında yerel olmayan elastisiteyi kullanmıştır. Wang ve Liew [29] Timoshenko kiriş teorisini kullanarak nano yapıların statik analizini yapmıştır. Reddy [30], Euler-Bernoulli, Timoshenko, Reddy ve Levinson kiriş teorilerini Eringen'in yerel olmayan elastisite teorisinin diferansiyel temel bağıntılarını kullanarak yeniden yorumlamıştır. Aydogdu [31] daha önceki kiriş teorilerini de kapsayan genel yerel olmayan kiriş teorisi

geliştirmiştir. Fazelzadeh ve diğ. [32] farklı dizilişlerdeki tek duvarlı karbon nanotüplerin titreşimini yerel olmayan aniztropik kabuk teorisini kullanarak araştırmışlardır. Ghannadpour ve diğ. [33] yerel olmayan Euler kirişlerinin eğilme, burkulma ve titreşim analizini Ritz metdounu kullanarak yapmışlardır. Hu ve diğ. [34] tek duvarlı karbon nanotüplerin titreşimini yerel olmayan kiriş, çubuk modellerini ve moleküler dinamik simülasyonunu kullanarak incelemişlerdir. Kiani [35] eksenel hareket eden sabit destekli tek duvarlı karbon nanotüpleri yerel olmayan Rayleigh kiriş teorisini kullanarak çalışmışlardır.



Şekil 2.1 Tek Duvarlı Karbon Nanotüp Yapısının Atomik Kafes Yapısı

Karbon nanotüplerin çalışabileceği ortamların sönüm etkisine de sahip olabileceği düşüncesi, viskoelastik ortam etkisini göz önüne alan çalışmaların önünü açmıştır. Ghavanloo ve diğ. [36] doğrusal viskoelastik Winkler ortamına gömülü olan karbon nanotüpün titreşim ve denge analizini Euler-Bernoulli kiriş modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Shen [37] elastik ortam içine gömülü mikrotüplerin burkulma ve burkulma sonrası analizini yapmıştır. Mikrotüp yerel olmayan silindirik kabuk olarak, elastik ortam ise Pasternak ortamı olarak modellemiştir. Soltani ve diğ. [38] ise biyolojik doku içerisinde viskoz sıvı taşıyan tek duvarlı karbon nanotüplerin enine titreşimini modellemiştir. Karbon nanotüpü yerel olmayan Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullanarak, biyolojik viskoelasitk dokuyu ise Kelvin–Voigt modelini kullanarak analiz etmişlerdir. Ghavanloo ve diğ. [39] viskoelastik ortam içerisinde sıvı taşıyan kavisli karbon nanotüplerin düzlem içi titreşim analizini yapmıştır. Zhen ve diğ. [40] biyolojik doku içerisinde sıvı taşıyan çift duvarlı karbon nanotüplerin enine titreşimlerini

çalışmıştır. Daneshmend [41] sitoplazma-mikrotüp çiftinin mekanik titreşimini araştırmıştır.

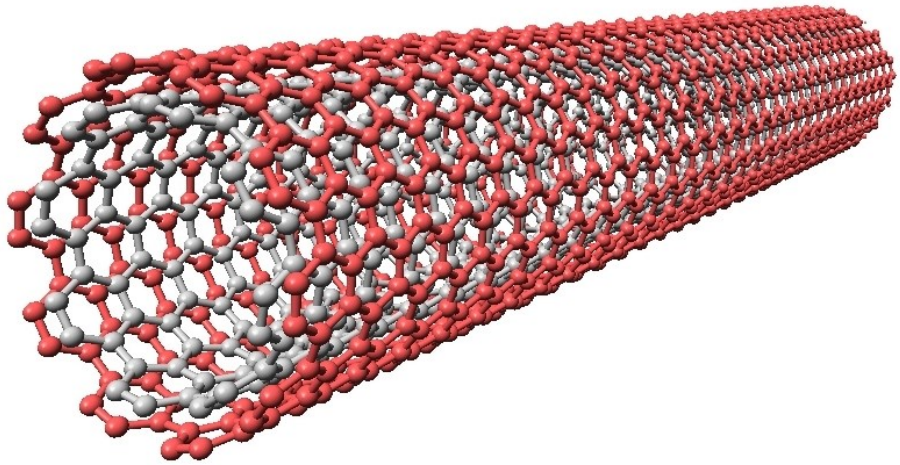
Rafiei ve diğ. [42] viskoelastik ortam içindeki uniform olmayan sıvı taşıyan tek duvarlı karbon nanotüplerin titreşim karakteristiğini Euler-Bernoulli kiriş teorisi ile incelemişlerdir. Ghorbanpour ve Arani [43] visko-Pasternak ortamı içine gömülü sıvı taşıyan çift karbon nanotüp sisteminin yerel olmayan titreşim analizini yapmışlardır. Çift karbon nanotüp sistemi uniform sıcaklık ve manyetik alan değişimi içinde yer almaktadır. Kazemi-Lari ve diğ. [44] Kelvin-Voigt viskoelastik ortama gömülü karbon nanotüpün teğetsel sıkıştırma yükü altında statik ve dinamik analizini Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Lei ve diğ. [45] yerel olmayan viskoelastik sönümlü nano-kirişlerin dinamik analizini yapmışlardır. Yönetici denklem ve sınır şartlarının elde edilmesinde Timoshenko kiriş teorisini kullanmışlardır. Wang ve Li [46] sönüm etkili nanotüpün serbest doğrusal olmayan titreşimini yerel olmayan elastisite ve Hamilton prensibini kullanarak çalışmışlardır. Pang ve diğ. [47] viskoelastik tek duvarlı karbon nanotüpün enine dalga yayılımı için genel yönetici denklemini yerel olmayan elastisite teorisi ve Kelvin modelini kullanarak elde etmişlerdir. Daneshmend [48] Winkler/Pasternak ortamına gömülü tek duvarlı karbon nanotüpün serbest titreşimini kabuk teorisiyle incelemiştir. Formulasyonda gerilme ve genleme elastisite gradyanları birlikte yer almaktadır. Karličić ve diğ. [49] yerel olmayan viskoelastik çift nano-çubuk sisteminin serbest boyuna titreşimini incelemişlerdir. Rezaee and Maleki [50] ise viskoelastik ortama gömülü sıvı taşıyan karbon nanotüpler için daha gerçekçi bir model önermişlerdir.

Ayrıca boron-nitrit nanotüpleri de karbon nanotüplere alternatif olarak kullanılabilmektedir. Arani ve diğ. [51] viskoelastik ortam içine gömülü sıvı taşıyan çift duvarlı boron nitrit nanotüplerin doğrusal olmayan serbest titreşimlerini incelemişlerdir. Modellemede Timoshenko kiriş teorisini kullanarak enine kesme deformasyonu ve dönme ataleti etkisini göz önüne almışlardır. Arani ve Roudbari [52] boron-nitrit nanotüp çifti üzerinde hareket eden nano-parçacık sistemi için yerel olmayan enine ve boyuna titreşim modelini Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullanarak geliştirmişlerdir.

## 2.2. Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerle İlgili Çalışmalar

Çift veya çok duvarlı karbon nanotüpler, nanotüplerin arasında oluşan van der Waals etkileşimleri nedeniyle statik ve dinamik analizi fazla çalışılan konulardandır. He

ve diğ. [53] süreklilik teorisini kullanarak çok duvarlı karbon nanotüplerde burkulma analizini van der Waals etkileşimini göz önüne de alarak incelemişlerdir. Kimoto ve diğ. [54] eksenel hareket eden çift duvarlı karbon nanotüplerim moleküler dinamik simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Wang ve diğ. [55] eksenel gerinmiş üç duvarlı karbon nanotüplerin titreşimini Flügge kabuk teorisini kullanarak incelemişlerdir. Aydogdu [56] çift duvarlı karbon nanotüplerin eksenel titreşimini yerel olmayan elastisite teorisini kullanarak incelemiştir. Bu çalışmada van der Waals etkileşimi eksenel doğrultuda ele alınmıştır.



Şekil 2.2 Çift Duvarlı Karbon Nanotüp Yapısının Atomik Kafes Yapısı

## 2.3. Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerde Dalga Yayılımıyla İlgili Çalışmalar

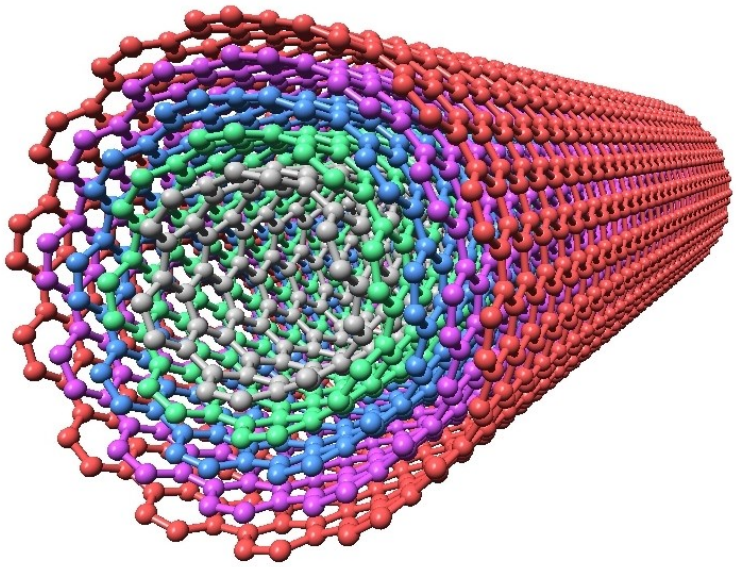
Karbon nanotüplerin sahip olduğu üstün fiziksel özellikler dolayısıyla dalga yayılımı konusu birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Isıl ve elektriksel özelliklerinin iyi olması ve süper iletkenlik gibi yetenekleri dolayısıyla karbon nanotüplerin dalga yayılımı karakteristikleri incelenmektedir. Wang ve Hu [57] tek duvarlı karbon nanotüplerde eğilme dalga yayılımını süreklilik mekaniği ve moleküler dinamik simülasyonunu kullanarak incelemişlerdir. Duan ve diğ. [58] yerel olmayan Timoshenko kiriş teorisi için küçük ölçek parametresini ($e_0$) tek duvarlı karbon nanotüplerin serbest titreşim durumu için değerini bulmuşlardır. Kalibrasyonda moleküler dinamik simülasyonu ile elde edilen titreşim frekanslarını kullanmışlardır. Wang ve Wang [59] yerel olmayan elastisite teorisinin temel bağıntılarını Euler-Bernoulli, Timoshenko kiriş ve silindirik kabuk modellerinde kullanarak karbon nanotüplerde dalga yayılımını araştırmışlardır. Wang ve Varadan [60] karbon

nanotüplerde dalga yayılımı için yerel olmayan elastik kabuk teorisi önermişlerdir. Çevresel ve boyuna doğrultulardaki dalga yayılımı üzerindeki küçük ölçek etkisini teorik ve sayısal sonuçlarla destekleyerek incelemişlerdir. Aifantis [61] süreklilik elastisitesinin uzun mesafe etkileşimi ve yüzey etkilerini de içerecek şekilde nano-elastisitede yüksek mertebeden gerilme ve genleme gradyanları kullanarak genişletilebileceğini göstermiştir. Askes and Aifantis [62] karbon nanotüplerin dinamik davranışını incelemek için yerel olmayan ve gradyan elastisite yaklaşımlarını Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorilerine uygulamışlardır. Lim ve Yang [63] karbon nanotüplerde dalga yayılımı için yerel olmayan elastik gerilme alanı teorisini temel alan bir model oluşturmuşlardır. Song ve diğ. [64] eksenel gerilme içeren çubuk ve kirişlerin boyuna ve enine dalga yayılımını incelemişlerdir. Yönetici denklemleri yerel olmayan elastisite ve uzama gradyanları teorisini kullanarak elde etmişlerdir. Boyut etkisini ifade eden iki adet küçük ölçek parametresi kullanmışlardır. Yakaiah ve Rao [65] karbon nanotüplerin dalga yayılımı karakteristiğini ortaya çıkarmak için ikinci, dördüncü, altıncı ve sekizinci mertebeden yerel olmayan genleme gradyanı modellerini türetmişlerdir. Sonuçları klasik süreklilik modeli ile karşılaştırmışlardır. Huang ve diğ. [66] karbon nanotüplerdeki eğilme dalgalarının yayılım davranışına elastik ortam etkisini incelemişlerdir. Lim ve Yang [63] karbon nanotüplerde dalga yayılımı için varyasyonel prensibe dayanan yerel olmayan model oluşturmuşlardır. Wang ve diğ. [67] doğrusal olmayan geometriye sahip tek duvarlı karbon nanotüplerin dalga karakteristiklerini çalışmışlardır.

## 2.4. Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerde Dalga Yayılımıyla İlgili Çalışmalar

Çift veya daha çok duvarlı karbon nanotüplerdeki dalga yayılımı, van der Waals etkileşiminin dalga karakteristiğini nasıl etkileyeceğinin araştırılması açısından önemlidir. Yoon ve diğ. [68] çok duvarlı karbon nanotüplerde ses dalga yayılımını çoklu elastik kiriş modelini kullanarak gerçekleştirmiştir. Ayrıca Yoon ve diğ. [69] kesme deformasyonlarının enine dalga yayılımına olan etkisini her bir karbon nanotüp için incelemişlerdir. Wang [70] karbon nanotüplerin dalga yayılımında Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorilerini kullanmıştır. Cai ve Wang [71] iç gerilmelerin çoklu karbon nanotüp yapısına olan dinamik etkisini Timoshenko katmanlaşmış kiriş teorisini kullanarak çalışmışlardır.

Dong ve Wang [72] elastik ortam içine gömülü karbon nanotüplerdeki dalga yayılımına kesme deformasyonlarının etkisini incelemişlerdir. Çok duvarlı karbon nanotüp yapısını çoklu kabuk olarak modellemişler ve iki nanotüp arasındaki van der Waals etkileşimini dikkate almışlardır. Wang ve diğ. [73] yerel olmayan elastik süreklilik modelini kullanarak çift duvarlı karbon nanotüplerdeki enine dalga yayılımına küçük ölçek etkisini incelemişlerdir. Formulasyonda yerel olmayan Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teorilerini kullanmışlardır. Wang ve diğ. [74] tek ve çoklu duvarlı karbon nanotüplerde boyuna ve eğilme dalga yayılımının grup hızlarını incelemişlerdir. Dalga yayılımı bağıntıları süreklilik mekaniği ile kiriş ve silindirik kabuk teorileri kullanılarak oluşturulmuştur. Dong ve diğ. [75] silindirik kabuk modeli kullanarak çok duvarlı karbon nanotüplerin dalga yayılımını elastik ortam etkisini de göz önüne alan analitik modeli önermişlerdir. Selim ve diğ. [76] basma gerilmeleri altındaki tek ve çift duvarlı karbon nanotüplerde dalga yayılımı için analitik metod geliştirmiştir. Ayrıca tek duvarlı karbon nanotüplerde genişleme dalga yayılımı ile ilgili küçük ölçek etkisini içeren model Selim [77] tarafından önerilmiştir.



Şekil 2.3 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Yapısının Atomik Kafes Yapısı

Narendar ve Gopalakrishnan [78] yerel olmayan elastisitenin çok duvarlı karbon nanotüplerde dalga yayılımına olan etkisini incelemişlerdir. Her bir karbon nanotüpü birinci dereceden kesme deformasyonlu kiriş olarak ve van der Waals etkileşimini nanotüpler arasında dağılmış yaylar olarak modellediler. Yang ve diğ. [79] çift duvarlı karbon nanotüplerde dalga yayılımı karakteristiklerini incelemişlerdir. Timoshenko kiriş

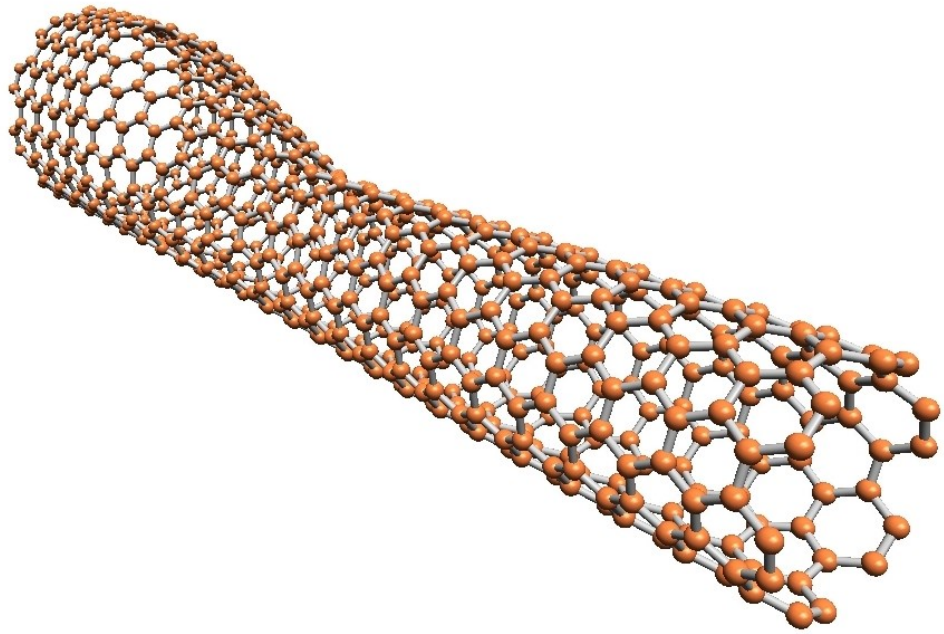
teorisini yerel olmayan süreklilik elastisite teorisi ile birlikte kullanmışlardır. Aydogdu [80,81] tek ve çok duvarlı karbon nanotüplerde boyuna dalga yayılımını Eringen'in yerel olmayan elastisite teorisini kullanarak çalışmıştır.

Karbon nanotüplerin modellenmesinde genellikle Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılmakla birlikte silindirik kabuk teorilerini kullanan çalışmalar da vardır. Silindirik kabuk teorilerin en önemli avantajı eksenel, çevresel ve radyal yer değiştirmelerin birbirlerinden etkilenecek şekilde bir arada bulunmasıdır. Liew ve Wang [82] tek ve çift duvarlı karbon nanonotüplerde dalga yayılımını Love ve Cooper-Naghdi silindirik kabuk teorilerini kullanarak incelemişlerdir. Dong ve Wang [83] elastik ortam içine gömülü karbon nanotüplerin dalga yayılımı karakteristiklerini kabuk modeli kullanarak incelemişlerdir. Mitra ve Gopalakrishnan çok duvarlı karbon nanotüplerde dalga yayılımını sürekli çoklu kabuk modelini kullanarak çalışmışladır. Çok duvarlı karbon nanotüplerde dalga yayılımı ile ilgili diğer benzer çalışmalara literatürde rastlanmaktadır [47,84–95].

## 2.5. Basamak Kesitli Karbon Nanotüplerin Titreşimiyle İlgili Yapılan Çalışmalar

Basamak kesitli karbon nanotüp yapıları, farklı çaplardaki iki veya daha çok sayıda karbon nanotüpün birbirlerine bağlanmasıyla oluşur. Karbon nanotüplerin farklı çaplarda olmaları dışardan uygulanan torkun farklı oranlarda iletilmesine yardımcı olur.

Basamak kesitli karbon nanotüp yapılarıyla ilk ilgilenen Chico ve diğ. [96] olmuştur. Tamamen karbondan yapılmış metal/yarı iletken ve yarı iletken/yarı iletken basamak kesitli nano elektronik araçlar yapılarını çalışmışlardır. Romero ve diğ. [97] karbon nanotüp ve organik yarı iletken polimerleri birleştirilmiş yapı olarak optoelektronik uygulamalarında kullanmayı düşünmüşlerdir. Yao ve diğ. [98] karbon nanotüpleri metalik nanotüpler ile tek elektron transistörleri olarak, yarı iletken nanotüpler ile alan etkili transistörler olarak modellemişlerdir. Hu ve diğ. [99] birkaç yüz nanometre uzunluğundaki yarı iletken karbon nanotüpleri alan etkili transistörler oluşturmak için araştırmışlardır. Zhang ve diğ. [100] en küçük basamak kesitli yapıyı oluşturmak için tek duvarlı karbon nanotüp/karbid çiftini kullanmışlardır. Treboux ve diğ. [101] doğrusal olarak birleşmiş koltuk ve zikzak nanotüplerin elektronik özelliklerini hesaplamışlardır. Ferreira ve diğ. [102] basamak kesitli metalik/yarı iletken karbon nanotüp yapılarının yerel elektronik özelliklerini araştırmışlardır.



Şekil 2.4 Basamak kesitli Karbon Nanotüp Yapısının Atomik Kafes Yapısı

Odintsov ve diğ. [103] metalik ve yarı iletken tek duvarlı karbon nanotüpler arasında oluşan basamak kesitli yapıların elektronik özelliklerini araştırmışlardır. Kim ve diğ. [104] iki veya daha çok duvarlı karbon nanotüpten oluşan basamak kesitli yapının elektrik taşıma özelliklerini çalışmışlardır.

Zhang and Iijima [105] basamak kesitli karbon nanotüp yapılara şekil verilmesiyle ilgili ilk patenti alan bilim insanlarıdır. Karbon nanotüp ile temas halinde olan metal veya yarı iletken reaktif kısım ısıtılınca karbon nanotüpün kısmen karpite dönüştüğü gözlenmiştir. Böylece basamak kesitli yapının reaksiyon ürünü ve karbon nanotüp şekillendirilmiş olur.

Andriotis ve diğ. [106,107] Y şeklinde birleşmiş karbon nanotüp yapılarının kuantum iletkenliğini Green fonksiyonunu kullanarak hesaplamışlardır. Sonuçları basamak kesitli yapıların doğrulma ve anahtarlama özelliklerinin simetriye ve düşük derecede şiral açıya bağlı olduğunu göstermiştir. Cassel ve diğ. [108] çok duvarlı basamak kesitli karbon nanotüp yapıların baştan sona üretimini ve elektriksel özelliklerini çalışmışlardır. Anatram ve Leonard [109] şiral açıya bağlı elektronik özellikleri olan karbon nanotüp tabanlı nano araçların fiziğini araştırmışlardır. Luo ve Zhu [110] elektorkimyasal ve kimyasal buhar kaldırma yöntemlerini bir arada kullanarak Ag/Si, $Pt_6Si_5$/Si, Ni/KNT ve Ag/a-KNT olmak üzere 4 farklı çeşit bir boyutlu karbon nanotüp basamak kesitli yapı sentezlemişlerdir. Sun ve diğ. [111]

oldukça uzun karbon nanotüp/metal basamak kesitli yapısında oldukça önemli fotokimyasal akımları keşfetmişlerdir. Li ve diğ. [112] moleküler basamak kesitli yapıların elektronik taşıma özelliklerini araştırmışlardır. Liao ve diğ. [113] boron karbonitrid/karbon nanotüp basamak kesitli yapısının direk sentezini gerçekleştirmişlerdir. Yu ve diğ. [114] açılı çok duvarlı karbon nanotüplerin $TiO_2$ nano parçacıkları ile kaplanmasıyla oluşan basamak kesitli yapıyı üretmişlerdir. Jia ve diğ. [115] karbon nanotüp/silikon basamak kesitli yapılarından oluşan güneş hücrelerinin 100mWcm$^{-2}$ güneş radyasyonu altında 5–7% verimde çalıştığını göstermişlerdir.

Basamak kesitli karbon nanotüplerin statik ve dinamik analizi ile ilgili yapılan çalışmaların sayısı oldukça azdır. Filiz ve Aydogdu [116] karbon nanotüp basamak kesitli yapılarının eksenel titreşimini çalışmışlardır. Yönetici denklemlerin bulunmasında Eringen'in yerel olmayan temel denklemleri kullanılmıştır. Arani and Kolahchi [117] doğrusal karbon nanotüp basamak kesitli yapılarının eksenel burkulmasını Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullanarak incelemişlerdir.

## 2.6. Karbon Nanotüplerin Burulma Titreşimiyle İlgili Çalışmalar

Karbon nanotüplerin burulma davranışı ile ilgili ilk çalışma Hu ve diğ. [118] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada tek ve çift duvarlı karbon nanotüplerin enine ve burulma dalga yayılımını incelemişlerdir. Yerel olmayan tek ve çift elastik silindirik kabuk modeli kullanılmıştır. Selim [119] iç basma gerilmesine sahip tek duvarlı karbon nanotüplerin burulma titreşimini incelemiştir. Shen ve Zhang [120] ısıl ortamda burulmaya maruz kalan çift duvarlı karbon nanotüplerin burkulma ve burkulma sonrası analizini yerel olmayan kesme deformasyon kabuk teorisi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Gheshlaghi ve diğ. [121] geliştirilmiş gerilme çifti teorisini kullanarak karbon nanotüplerin burulma titreşimini incelemiştir. Murmu ve diğ. [122] karbon nanotüp ve ucunda bağlı olan fulleren yapısının burulma titreşimini yerel olmayan elastisite teorisini kullanarak incelemiştir. Narendar ve Gopalakrishnan [123] dönen karbon nanotüplerdeki dalga yayılımını yerel olmayan elastisite teorisini kullanarak araştırmışlardır. Li ve diğ. [124] nano-şaft, nano-çubuk ve nanotüp gibi yapıların statik ve dinamik analizi için yerel olmayan elastik gerilme alanı teorisi geliştirmişlerdir. Narendar [125] Eringen'in yerel olmayan elastisite teorisini kullanarak yerel olmayan burulma çubuk modeli oluşturulmuştur. Güçlü yerel olmayan etkiden dolayı farklı burulma dalga davranışları elde etmiştir. Lim ve diğ. [126] karbon

nanotüplerin burulma titreşimi davranışı için yerel olmayan elastik gerilme modeli oluşturmuşlar ve analitik çözümlerini sunmuşlardır. Khademolhosseini [127] tek duvarlı karbon nanotüpün burulma titreşimini yerel olmayan sürekli kabuk teorisini kullanarak incelemiştir. Elde ettiği sonuçları moleküler dinamik simülasyonu sonuçları ile karşılaştırarak oluşturduğu modelin geçerliliğini göstermiştir. Demir ve Civelek [128] mikrotüplerdeki eksenel ve burulma dalga yayılımına boyut etkisini yerel olmayan sürekli ve ayrık çubuk modelini kullanarak incelemişlerdir.

Karbon nanotüplerin yerel olmayan sürekli mekanik modellenmesi ile ilgili yayımlanmış kitaplar da bulunmaktadır. Tseperes ve Silvestre [129] karbon nanotüp, grafen ve bu yapıların kompozitlerinin modellenmesi ve mekanik davranışı hakkında derleme bir çalışma yapmışlardır. Moleküler dinamik simülasyonu, sürekli kabuk mekaniği, atomik kafes yapısı temelli sonlu elemanlar, yerel olmayan elastisite gibi farklı modelleme tekniklerinin uygulamalarına yer vermişlerdir. Gopalakrishnan ve Narendar [130] nano yapılardaki dalga yaylımını yerel olmayan elastisite teorisini kullanarak incelemişlerdir. Karbon nanotüplerdeki dalga yayılımını çeşitli durum çalışmalarında araştırmışlardır. Elishakoff [131] yerel olmayan kiriş mekaniğini nano yapı uygulamalarında kullanarak bazı temel problemlerin çözümüne değinmiştir. Murmu ve diğ. [132] yerel olmayan süreklilik mekaniğini kullanarak daha kapsamlı ve güncel problemlere değinmişlerdir.

# BÖLÜM 3

# YÖNETİCİ DENKLEMLERİN YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ İLE ELDE EDİLMESİ

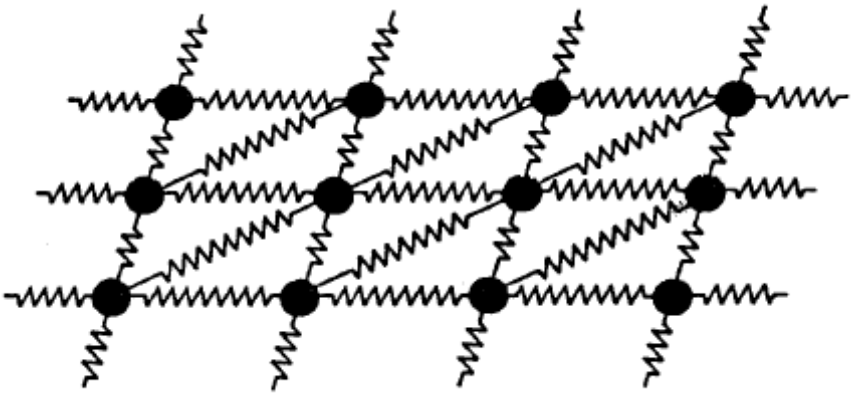
Bu bölümde karbon nanotüplerin statik ve dinamik burulma davranışı için yönetici denklemler ve sınır şartları elde edilecektir. Modelin oluşturulmasında Yerel Olmayan Elastisite Teorisi ve Hamilton Prensibi kullanılacaktır. Modelin geçerliliği Kafes Dinamiği ve Moleküler Dinamik Simülasyonu sonuçlarıyla karşılaştırılarak araştırılacaktır.

## 3.1. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi

Klasik fizik ve sürekli ortam mekaniğinin uygulama alanı dışında kalan birçok problem vardır. Malzemelerdeki çatlaklar ve dislokasyonlardaki gerilme alanları, kuvvet, moment, ısı gibi yüklerin yoğunlaştığı noktalardaki tekillikler, köşelerdeki süreksizlikler, kısa dalga boyundaki yayılımın tahmininde karşılaşılan başarısızlıklar, mikro kanallardaki akışkan viskozitesinin modellenmesi gibi fiziksel olaylar klasik alan teorisi tarafından tanımlanamamaktadır. Süperiletkenlik konusu da elektromanyetizma içinde klasik alan teorisi ile açıklanamayan bir durumdur. Yüksek frekanslı dalgaların yayılımı için geliştirilen modeller deneysel verilerden oldukça sapmaktadır. Bu durumlardaki malzeme davranışlarını tanımlamak için atomik kafes dinamiği kullanılmaktadır [133].

Yerel olmayan sürekli ortam teorisi, malzemedeki bir noktanın geriye kalan diğer tüm noktalardan etkilendiği esasına dayanır. Klasik teoriye göre, malzeme içinde yer alan bir nokta sürekli kabul edilir ve fiziksel olarak bağımsız özelliklere sahip olduğu varsayılır(kütle, yük, elektrik alan, manyetik alan v.b.). Malzemenin durumu,

üzerindeki bir nokta için bağımsız elemanların fonksiyonu olarak farklı bağıntılar şeklinde ifade edilebilir. Bunlar temel bağıntılar olarak adlandırılır [133].



Şekil 3.1 Malzeme Kafes Yapısının Atomik Model ile Gösterimi [133]

Yerel olmayan alan teorisi için fiziğin 2 temel kanunu şu şekilde genişletilmiştir:

- Enerji dengesi malzemenin tümü için geçerlidir.
- Malzemenin bir noktadaki durumu, diğer noktaların fonksiyoneli olarak ifade edilebilir (Şekil (3.1)).

Bunun anlamı, malzemenin her bir noktasındaki durumu bilebilmek için o noktalardaki bağımsız değişkenleri belirlemek gerekir. Ayrıca zaman içinde gerçekleşen yerel olmayan davranış "hafızaya bağlılık" olarak tanımlanmıştır [133].

Klasik alan teorisinin uygulama alanı uzunluk ve zaman ölçeğine bağlıdır. $L$ dış karakteristik uzunluğu, $l$ ise iç karakteristik uzunluğu temsil etsin. Eğer boyut $L/l >>1$ olursa klasik teori doğru sonuçlar vermektedir. Boyut oranı $L/l \sim 1$ olursa klasik teori başarısız olur ve yerine atomik veya yerel olmayan teoriler kullanılır. Dinamik durumda ise benzer durum zaman için geçerlidir. $T$ dış karakteristik zamanı(uygulanan yükün zaman ölçeği) ve $\tau$ ise iç karakteristik zamanı(titreşimin bir molekülden diğerine iletilme zaman ölçeği) ifade ediyor olsun. Klasik teoriler $T/\tau \sim 1$ olduğunda başarısız olurlar. $L/l$ ve $T/\tau$ ölçeğine göre uzay-zamanda bu şekilde meydana gelen belirsizlikleri anlamak için yerel olmayan davranış ve hafıza etkisine ihtiyaç vardır [133].

Gerçek malzemeler mükemmel kafes yapılarına sahip değillerdir ve bu durumu açıklamak için yerel olmayan süreklilik teorileri kullanılabilir. Aslında kafes parametresinin büyüklüğüne bağlı olarak kafes dinamiği ile uyumlu sonuçlar

vermektedir. Bu nedenle yerel olmayan sürekli ortam teorisi fizikte ve uygulamalı bilimlerde geçerli olmaktadır.




Şekil 3.2 Bir Boyutlu Kütle-Yay Sistemi Süreklilik Modeli [133]

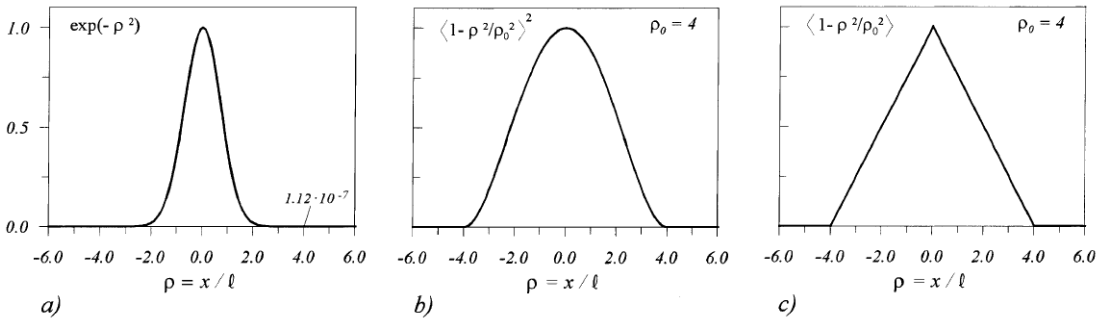
Süreklilik ortam teorisi ve fiziksel tekillikler ile ilgili ilk çalışmalar Eringen tarafından editörlüğü yapılan Continuum Physics, Cilt IV'de yer alan makalelerdir [134–136]. Kafes dinamiği açısından yerel olmayan elastisite temel denklemleri Krumhansl [137,138], Kröner ve Datta [139], ve Kunin [140] tarafından ortaya konmuştur. Hafızaya bağlı yerel olmayan elastisite temel bağıntıları [141] ve mikropolar yerel olmayan elastisite Eringen tarafından önerilmiştir [142]. Önerilen erken dönem teorileri enerji dengesini içermemekteydiler. Yerel olmayan temel denklemleri Eringen ve Edelen [143] ve Eringen [144,145] tarafından formüle edilmiştir.

Yerel olmayan elastisite teorisi, kırılma mekaniğindeki çözülemeyen bir problemi çözmesinden dolayı birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bilindiği üzere klasik elastisite teorisine göre çatlak olan keskin uçtaki gerilme sonsuz olur. Eringen ve Kim [146,147]'in yerel olmayan elastisite çözümü çatlak ucundaki gerilmenin sonlu olduğunu göstermiştir. Gerilme önce maksimum değere ulaşıp sonrasında çatlak uç noktasından uzaklaştıkça azalmaktadır. Benzer olarak sıkı dislokasyon probleminin yerel olmayan elastisite ile çözümünde; dislokasyonun merkezinde gerilme ortadan kalkmakta, malzeme içerisinde maksimuma doğru yükselmekte ve mesafe arttıkça klasik teori sonucuna doğru yaklaşmaktadır. Bu sonuçlar, doğal kırılma kriterlerine giriş niteliği taşıyan maksimum gerilme hipotezini ve yapışma gerilimini içermektedir. Ayrıca yerel olmayan çözüm, tüm Brillouin bölgesi boyunca harmonik dalgaların yaylımının kafes dinamiği çözümü ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Sürekli ortamdaki boyuta bağlılığı göz önüne almak için, yerel olmayan elastisitenin gerilme tensörü Eşitlik (3.1)'deki gibi ifade edilir [133].

$$\tau_{ij}(x) = \int_V \chi(|x - x'|, \gamma) C_{ijkl} \varepsilon_{kl}(x') dV(x'), \quad \forall x \in V, \tag{3.1}$$

Burada $\tau_{ij}$ yerel olmayan gerilme tensörünü, $\varepsilon_{kl}$ gerinme tensörünü, $C_{ijkl}$ elastik modül tensörünü, $\chi(|x-x'|,\gamma)$ uzun mesafe etkisini ortaya çıkaran azalma fonksiyonunu ve $|x-x'|$ ise Öklit mesafesini ifade etmektedir. Azalma fonksiyonu iki önemli özelliğe sahiptir: 1) İlgilenilen noktada maksimum değere sahiptir ve o noktadan uzaklaştıkça azalmaktadır. 2) Öklit mesafesinin dışında Dirac-Delta Fonksiyonu gibi davranarak etkisini kaybeder ve yerel elastisite gerilme değerini verir. Böylece yerel elastisite teorisnin tahmin edemediği boyut etkisini yerel olmayan elastisite teorisi karşılayabilmektedir [148]. Azalma fonksiyonu farklı şekillerde seçilebilir. Şekil (3.3)'de görüldüğü üzere hata, çan veya konik fonksiyon gibi çeşitleri vardır [149].




Şekil 3.3 Çeşitli Azalma Fonksiyonu Örnekleri: a)Hata Fonksiyonu b)Çan Fonksiyonu c)Konik Fonksiyonu [149]

Integral-kısmi diferansiyel denklem yerine Yerel Olmayan Elastisite teorisinin diferansiyel formu daha çok kullanılmaktadır. Azalma fonksiyonu Eringen tarafından aşağıdaki gibi önerilmiştir.

$$\chi(|\mathrm{x}|,\gamma) = (2\pi l^2\gamma^2)^{-1}K_0\left(\sqrt{\mathrm{x}\cdot\mathrm{x}}\,/l\gamma\right) \tag{3.2}$$

burada $K_0$, modifiye edilmiş Bessel fonkisyonunu ifade etmektedir. $\gamma = e_0 a/l$ ifadesindeki, $a$ elastik ortamın iç karakteristik uzunluğunu ve $e_0$ ise malzemeye bağlı Eringen sabitini ifade etmektedir.

Yerel olmayan elastisite için bünye denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(1-\mu\nabla^2)\tau_{kl} = \lambda\varepsilon_{rr}\delta_{kl} + 2G\varepsilon_{kl} \tag{3.3}$$

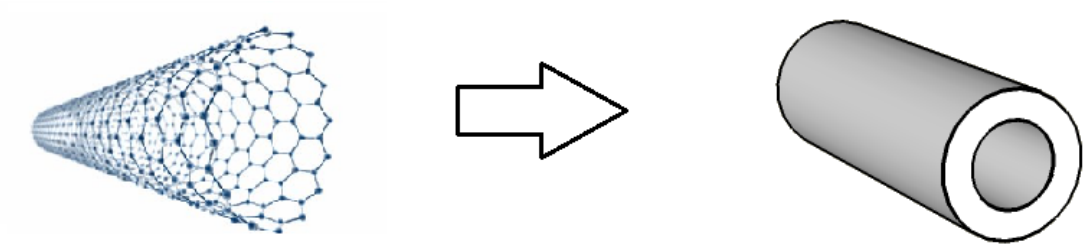
burada $\tau_{kl}$ yerel olmayan gerilme tensörü, $\varepsilon_{kl}$ genleme tensörü, $\lambda$ ve $G$ malzeme sabitleri ve $\mu = (e_0 a)^2$ yerel olmayan parametre olarak adlandırılmaktadır.

Yerel olmayan elastisite teorisinin geçerliğinin sağlanmasında $e_0$'ın belirlenmesinin büyük önemi vardır. Bu parametre Eringen tarafından atomik model dalga yayılımı eğrileri kullanılarak belirlenmiştir [133,150]. $e_0$ sayısı Eringen tarafından eksenel dalga yayılımı için 0.39 olarak önerilmiştir. Özel bir malzeme, geometri veya problem için $e_0$ sayısı Born-Karman atomik kafes dinamiği modeli, moleküler dinamik simülasyonu ve deneysel çalışma sonuçlarına göre belirlenebilir. Aydogdu [80], $e_0$'ın yarıçap, Young modülü ve kullanılan teoriye bağlı olduğunu göstermiştir. Literatür araştırmalarında genel kanı olarak $e_0 a$ parametresinin 2nm'den küçük alındığı görülmektedir [59] ($e_0 a < 2.0$).

Eringen, ortaya koyduğu bu teori ile süreklilik modeli sonuçlarının, ayrık model sonuçlarına yaklaşmasını sağlamıştır. Böylece her iki modeli kapsayan yeni bir model ortaya çıkarmıştır.

## 3.2. Karbon Nanotüplerin Burulma Davranışı İçin Yerel Olmayan Elastisite Yaklaşımı

Doğrusal izotropik uniform karbon nanotüp için ayrık ve sürekli ortam mekaniği modelleri Şekil (3.4)'de görülmektedir. Burulma probleminde Eşitlik (3.3)'deki yerel olmayan elastisite teorisinin temel bağıntısı Eşitlik (3.4)'deki gibi yazılır [151].



Şekil 3.4 Karbon Nanotüp Atomik ve Sürekli Ortam Modeli [152]

$$\left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \tau = G\gamma \tag{3.4}$$

burada $\gamma$ kayma genlemesini, $\tau$ kayma gerilmesini ifade etmektedir. Kesit alanına göre kesme kuvveti bileşkesi kayma gerilmesi cinsinden ifade edilirse

$$S = \int_A \tau \, dA \tag{3.5}$$

burada $A$, karbon nanotüpün kesit alanını ifade etmektedir. Tork ifadesi ise

$$T = \int_A \tau z \, dA \tag{3.6}$$

Eşitlik (3.4), (3.5) ve (3.6)'yı kullanarak aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

$$S - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} = GA\gamma \tag{3.7}$$

$$T - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = GI_P \frac{\partial \theta}{\partial x} \tag{3.8}$$

### 3.3. Yönetici Denklemlerin Hamilton Prensibi ile Elde Edilmesi

Varyasyonel metod, sanal iş ve minimum potansiyel enerji gibi varyasyonel prensipleri kullanarak bir cisimde konuma bağlı olan sürekli fonksiyonun yaklaşık çözümünün bulunmasıdır. Klasik anlamda varyasyonel prensip, bir fonksiyonelin varsayılan çözümünde yer alan belirsiz parametrelere göre fonksiyoneli minimize etme veya kararlı noktalarını bulma işlemidir. Burada fonksiyonel sistemin toplam enerjisini ifade edebilir. Fonksiyonel, ele alınan problemin yönetici denklemini, sınır veya başlangıç ve kısıt koşullarını içermektedir [153].

Varyasyonel metodun mekanikte önemli yeri vardır. Varyasyonel formulasyon 3 durumda kullanılabilir [153]:

- Mekanikte çoğu problem ekstremum (minimum veya maksimum) noktalarının bulunması ile ilgilidir ve varyasyonel olarak ifade edilebilirler.
- Vektör mekaniği ile ifade edilebilen problemler aynı zamanda varyasyonel prensiplerle de formüle edilebilir.
- Varyasyonel metod, diğer yöntemlerle çözümü zor olan pratik problemlere yaklaşık çözümler önerebilmektedir.

Minimum potansiyel enerji prensibi, elastik bir cismin enerji dengesi olarak da ifade edilebilir. Yer değiştirme için sonlu elemanlar metodu kullanılarak cismin yer değiştirme ve gerilme alanı yaklaşık olarak ifade edilebilir [153].

Karbon nanotüpün burulma titreşimi için hareket denklemi ve sınır şartları Hamilton prensibi ile yerel olmayan elastisite teorisi kapsamında belirlenecektir. Hamilton prensibi [153]:

$$\int_{t_1}^{t_2}[\delta W + \delta E_K - \delta E_P]\, dt = 0 \tag{3.9}$$

burada $W$, dış torkun yaptığı toplam sanal işi, $E_K$ kinetik enerjiyi, $E_P$ ise genleme potansiyel enerjiyi temsil etmektedir ve aşağıdaki gibi tanımlanır [153]:

$$W = \int_0^L T\theta\, dx \tag{3.10}$$

$$E_K = \int_0^L \rho I_P \left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)^2 dx \tag{3.11}$$

$$E_P = \int_0^L G I_P \left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^2 dx \tag{3.12}$$

burada $\rho$ yoğunluk, $I_P$ kutupsal atalet momenti, $R_1$ and $R_2$ karbon nanotüpün iç ve dış yarıçapı, $\theta$ açısal yer değiştirme ve $G$ kayma modülüdür. Kutupsal atalet momenti Eşitlik (3.13)'deki gibi ifade edilir:

$$I_P = \pi \frac{(R_2{}^4 - R_1{}^4)}{2} \tag{3.13}$$

$W$, $E_K$ ve $E_P$, Eşitlik (3.10), (3.11) ve (3.12) kullanılarak yerel olmayan elastisite teorisine göre Eşitlik (3.8) ile yeniden ifade edilirse [154–157] :

$$\delta W = \int_{t_1}^{t_2}\int_0^L T\,\delta\theta dx dt - \int_{t_1}^{t_2}\int_0^L \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)\right]\delta\theta dx dt \tag{3.14}$$

$$\delta E_K = \int_0^L\int_{t_1}^{t_2}\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho I_P\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)\right]\delta\theta dx dt - \int_{t_1}^{t_2}\int_0^L\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\rho I_P\left(\frac{\partial^3\theta}{\partial x\partial t^2}\right)\right]\delta\theta dx dt \tag{3.15}$$

$$\delta E_P = \int_{t_1}^{t_2}\int_0^L\frac{\partial}{\partial x}\left[G I_P\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)\right]\delta\theta dx dt \tag{3.16}$$

Eşitlik (3.9), Eşitlik (3.14), (3.15) ve (3.16)'ya göre tekrar düzenlenirse

$$\left\{\begin{array}{c}\left(\int_{t_1}^{t_2}\int_0^L T\,\delta\theta dxdt\right)\\ -\left(\int_{t_1}^{t_2}\int_0^L \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)\right]\delta\theta dxdt-\int_{t_1}^{t_2}\left[\mu\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)\right][\delta\theta(L)-\delta\theta(0)]dt\right)\end{array}\right\}+$$
$$\left\{\begin{array}{c}\left(\int_0^L\int_{t_1}^{t_2}\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho I_P\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)\right]\delta\theta dtdx-\int_0^L\left[\rho I_P\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)\right][\delta\theta(t_2)-\delta\theta(t_1)]dx\right)-\\ \left(\int_{t_1}^{t_2}\int_0^L\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\rho I_P\left(\frac{\partial^3\theta}{\partial x\partial t^2}\right)\right]\delta\theta dtdx-\int_{t_1}^{t_2}\left[\mu\rho I_P\left(\frac{\partial^3\theta}{\partial x\partial t^2}\right)\right][\delta\theta(L)-\delta\theta(0)]dt\right)\end{array}\right\}-$$
$$\left\{\int_{t_1}^{t_2}\int_0^L\frac{\partial}{\partial x}\left[GI_P\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)\right]\delta\theta dtdx-\int_{t_1}^{t_2}\left[GI_P\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)\right][\delta\theta(L)-\delta\theta(0)]dt\right\}=0 \quad (3.17)$$

Eşitlik (3.17), gerekli düzenlemelerden sonra Eşitlik (3.18)'deki halini alır:

$$\int_{t_1}^{t_2}\int_0^L\left\{[T]-\left[\mu\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)\right]+\left[\rho I_P\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2}\right)\right]-\left[\mu\rho I_P\left(\frac{\partial^4\theta}{\partial x^2\partial t^2}\right)\right]-\left[GI_P\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}\right)\right]\right\}\delta\theta dtdx-$$
$$\int_{t_1}^{t_2}\left\{\left[\mu\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)\right]+\left[\mu\rho I_P\left(\frac{\partial^3\theta}{\partial x\partial t^2}\right)\right]+\left[GI_P\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)\right]\right\}[\delta\theta(L)-\delta\theta(0)]dt=0 \quad (3.18)$$

Eşitlik (3.18)'e göre burulma hareketinin yönetici denklemi:

$$GI_P\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}\right)=\rho I_P\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2}\right)-\mu\rho I_P\left(\frac{\partial^4\theta}{\partial x^2\partial t^2}\right)+T-\mu\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) \quad (3.19)$$

ve sınır şartları:

$$\mu\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\mu\rho I_P\left(\frac{\partial^3\theta}{\partial x\partial t^2}\right)+GI_P\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)=0 \quad veya$$
$$\theta=0 \quad (3.20)$$

Eşitlik (3.19) burulma hareketi için karbon nanotüpün yönetici denklemidir. Eğer yerel olmayan parametre sıfır olarak kabul edilirse ($\mu=0$), klasik sürekli ortam mekaniği denklemi elde edilir. Böylece Yerel Olmayan Elastisite teorisi kullanılarak nano, mikro ve makro boyutta kullanılabilecek bir model geliştirilmiş olur.

### 3.4. Modelin Geçerliliği

KNT'lerde eksenel dalga yayılımı kafes dinamiği sonuçları kullanılarak daha önceki çalışmalarda ele alınmıştır [31,80,133,150,158]. Eringen, $e_0$ katsayısını kafes

dinamiği yayılım eğrilerini kullanarak yerel olmayan teori için belirlemiştir. Burada ise benzer kafes modeli burulmalı dalga yayılımı için çevresel doğrultuda oluşturulacaktır. KNT yapısı bir boyutlu olarak karbon atomları ve aralarında yer alan yaylar ile modellenmiştir. Oluşturulan atomik model Şekil (3.5)'de görülmektedir [152].

N adet kütle için burulma hareket denklemi Eşitlik (3.21)'de ifade edilmiştir.

$$J\ddot{\theta}_n = k_t(\theta_n + 1 - 2\theta_n + \theta_n - 1) \tag{3.21}$$

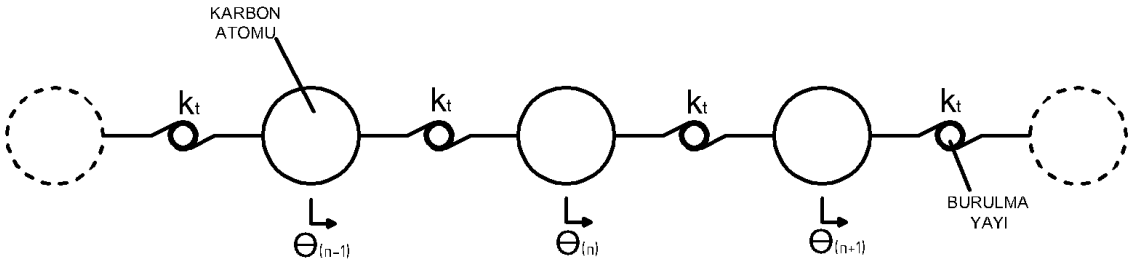
burada $J$ bir kütlenin atalet momentini ve $\theta_n$ ise $n$. kütlenin açısal yer değiştirmesini ifade etmektedir. Harmonik dalga yayılımı kabulü yapılırsa

$$\theta_n = \theta e^{i(kna-\omega t)} \tag{3.22}$$

yazılabilir. Eşitlik (3.22), Eşitlik (3.21)'de yerine yazılırsa, Eşitlik (3.24)'deki dalga yayılımı bağıntısı elde edilir:

$$-\omega^2 J\theta_n = k_t(e^{ika} + e^{-ika} - 2)\theta_n \tag{3.23}$$

$$\omega^2 = \frac{4k_t}{J} sin^2(\frac{ka}{2}) \tag{3.24}$$




Şekil 3.5 Bir boyutlu Karbon Nanotüp Ayrık Modeli

Karbon nanotüpün sertliği $k_t a=G$ ve $J=a\rho$ olduğu kabul edilirse, Eşitlik (3.25) elde edilir:

$$\omega_{KD} = 2\frac{C}{a}\sqrt{sin^2(\frac{ka}{2})} \tag{3.25}$$

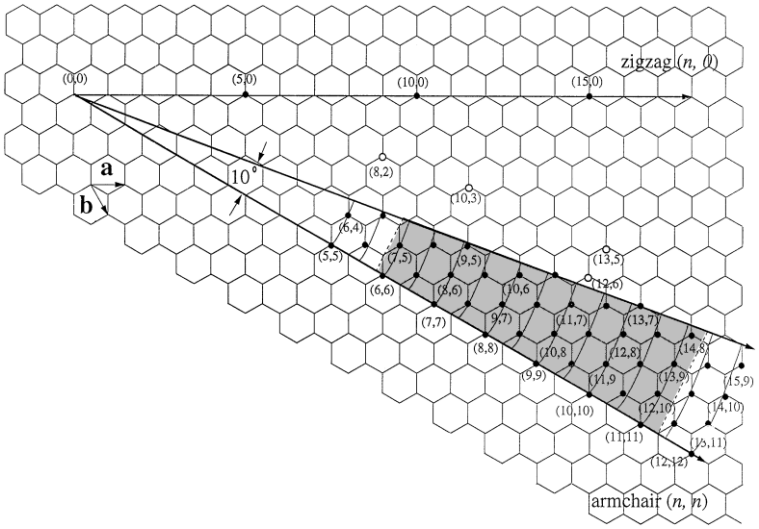
Burada $a=0.142nm$ [150] iki karbon atomu arasındaki mesafeyi tanımlamaktadır. $c$ ise ses hızı olarak tanımlanmaktadır ($c^2 = G/\rho$).

Eşitlik (3.25), Kafes Dinamiği'ne göre burulma dalga yayılımı ifadesidir ve eksenel dalga yayılımı bağıntısı ile büyük benzerlik göstermektedir [80]. Sadece Young modülü ($E$) yerine Kayma modülü ($G$) geçmiştir.

### 3.4.1. Karbon Nanotüp Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Geliştirilen mevcut yerel olmayan karbon nanotüp modelinin geçerliliği dalga yayılımı sonuçlarının kafes dinamiği ile karşılaştırılması ile gerçekleştirilecektir. Sayısal sonuçların elde edilebilmesi ve sonraki bölümlerde ele alınacak çalışmalarda kullanmak üzere malzeme fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Karbon nanotüpler sahip oldukları şiral açılarına göre farklı fiziksel özelliklere sahip olmaktadır. En çok kullanılanlar zikzak ve koltuk şiral açısına sahip kafes yapılarıdır. Şekil (3.6)'da şiral açılarına göre kafes yapılarının oluşma şekilleri görülmektedir.

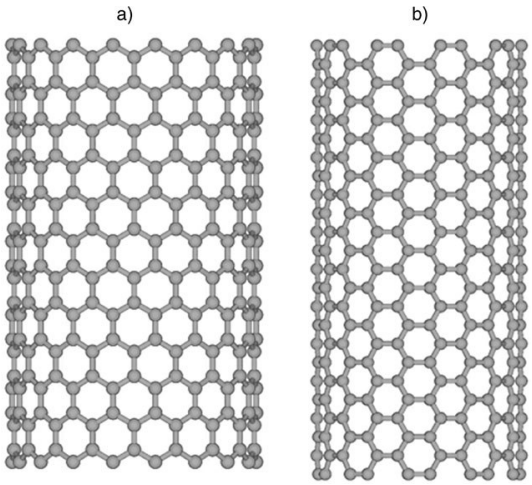



Şekil 3.6 Karbon Nanotüp Kafes Yapısında Şiral Açılarının Oluşumu [159]

Şiral açısı karbon nanotüp yapısı oluşurken kıvrılan uçların birleşme noktalarının bağlanma şeklini belirler. Zikzak ve koltuk kafes yapısı için bağlanma şekilleri Şekil (3.7)'de görülmektedir.

Karbon nanotüplerin duvar kalınlığı ve elastik özellikleri ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Birbirinden farklı kabuller yapılmakla birlikte, Ref.

[160,161]'da yapılan çalışmalara göre Kayma Modulü ($G$) karbon nanotüp çapına bağlı olarak elde edilmiştir. Çapın 1nm'den daha büyük değerleri için kayma modulü değeri çok büyük bir değişim göstermemektedir.




Şekil 3.7 a)Zikzak ve b)Koltuk Kafes Yapısına Sahip Karbon Nanotüpler [162]

Tablo 3.1 Karbon Nanotüp için Fiziksel Özellikler

| KNT Kafes Yapısı | Nanotüp İç Çapı (nm) | Kayma Modulü (TPa) | Yoğunluk ($\rho$) ($kg/m^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Nanotüp Et Kalınlığı ($h$) | | |
| | | | 0.066 nm | 0.132 nm | 0.340 nm |
| Koltuk (6x6) | 0.818 | 0.425 | 10662 | 4961 | 1580 |
| Koltuk (8x8) | 1.088 | 0.435 | 10863 | 5138 | 1704 |
| Koltuk (10x10) | 1.360 | 0.450 | 10989 | 5251 | 1789 |
| Koltuk (12x12) | 1.630 | 0.475 | 11074 | 5329 | 1851 |

Yoğunluk ($\rho$), Ref. [163]'deki hesaplama metodu ile bulunmuştur. Ref. [163]'deki çalışmada $1m^2$ alana sahip grafenin kütlesinin 1/1315 gr olduğu kabulünden yola çıkılmıştır. Buradan geliştirilen yoğunluk ifadesi Eşitlik (3.26)'da görülmektedir.

$$\rho = \frac{2R_2 10^{-3}}{1315\left({R_2}^2 - {R_1}^2\right)} \tag{3.26}$$

Yoğunluk, karbon nanotüp yarıçapı ve kalınlığına bağlıdır. Bu çalışmada kullanılacak olan karbon nanotüp şiral açıları ve bunlar için seçilen fiziksel özellikler Tablo (3.1)'de görülmektedir.

### 3.4.2. Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerde Burulma Dalgalarının Yayılımı

Bölüm (3.3)'de elde edilen hareketin yönetici denklemi tork etkisi yok sayılarak ($T_e = 0$), burulma dalga yayılımı problemi için ele alınırsa:

$$GI_P \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \rho I_P \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - \mu \rho I_P \frac{\partial^4 \theta}{\partial x^2 \partial t^2} \tag{3.27}$$

elde edilir. Çevresel doğrultuda harmonik dalga yayılımı kabulü yapılırsa, KNT için açısal yer değiştirme ifadesi:

$$\theta(x,t) = \psi e^{j(\omega t - kx)} \tag{3.28}$$

burada $\psi$ açısal yer değiştirmenin genliğini, $\omega$ burulma dalga yayılımı frekansını, $k$ dalga sayısını ve $j^2$=-*1*'i ifade etmektedir. Eşitlik (3.27)'deki zaman ve konuma göre türevler, Eşitlik (3.28)'e göre alınarak tekrar düzenlenirse:

$$\frac{\rho}{G}\mu\omega^2 k^2 + \frac{\rho}{G}\omega^2 - k^2 = 0 \tag{3.29}$$

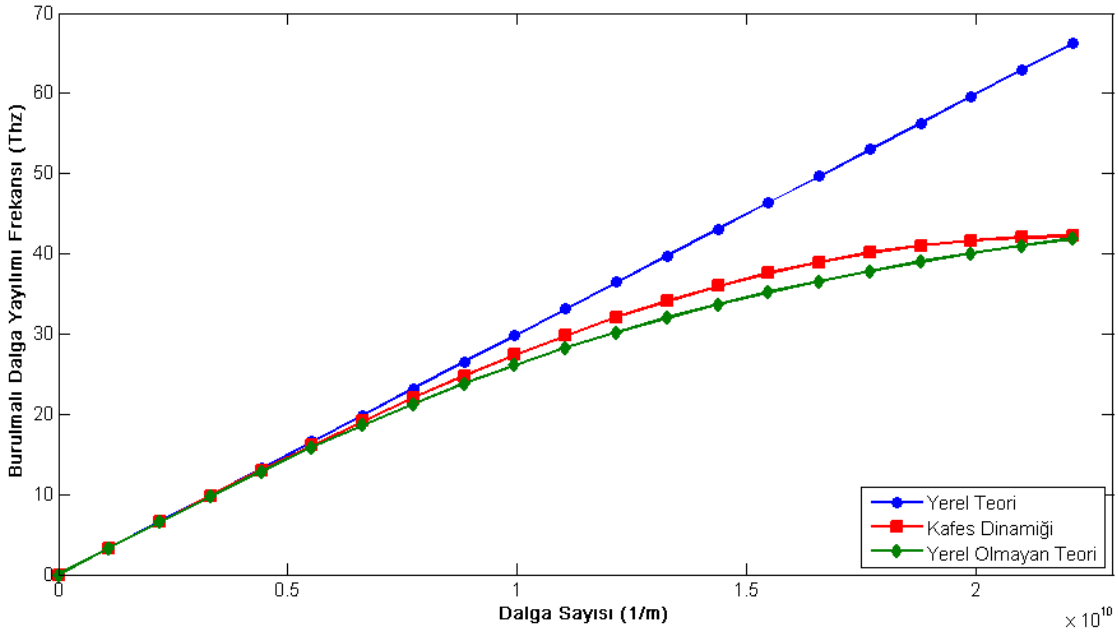
$$\omega_{NL} = c\sqrt{\frac{k^2}{(e_0 a)^2 k^2 + 1}} \tag{3.30}$$

Eşitlik (3.30), Yerel Olmayan Elastisite Teorisi'ne göre burulma dalga yayılımı ifadesidir. Eringen'in $e_0$ parametresini belirlemek için yaptığı şekilde [150], Eşitlik (3.25) kullanılarak Kafes Dinamiği dalga yayılımı sonuçlarına yaklaşması için $e_0$=0.39 olarak kabul edilmesi gerektiği ortaya çıkar. $e_0$=0.39 kabulü ile birinci Brillouin-Bölgesi sonunda Kafes Dinamiği dalga yayılımı sonuçları ile oldukça yakın sonuçlar elde edilmektedir.

Periyodik örgü potansiyelinin elektron durumları üzerine olan etkisiyle, $k$ ekseninin doğal olarak çok sayıda bölgelere ayrıldığı görülmektedir. Bu bölgeler Brillioun Bölgeleri olarak adlandırılmaktadır. Bir boyutlu yapılarda $k \leq \pi/a$ bölgesi

birinci Brillioun bölgesidir ve bu aralıktaki $k$ değerlerine sahip olan durumlar en düşük enerji bandında bulunurlar [145].

Burulma dalga yayılımı frekansının dalga sayısı ile değişimi Şekil (3.8)'de görülmektedir. Yerel Teori dalga yayılım frekansı dalga sayısı ile doğrusal olarak artarken yerel olmayan frekans ve kafes dinamiği sonuçları birinci Brillouin-Bölgesi sonunda yakın sonuçlar vermektedirler.




Şekil 3.8 Burulma Dalga Yayılımı Frekansının Farklı Teorilere Göre Değişimi

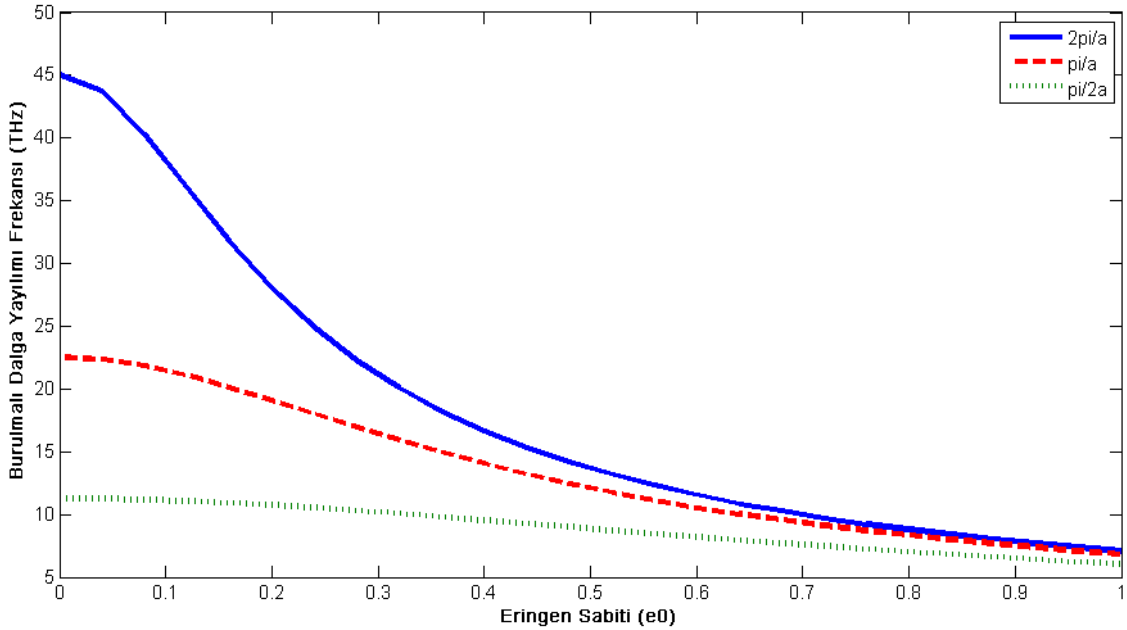
Tablo 3.2 Burulma Dalga Yayılımı Frekansları (rad/s)

($e_0$=0.185, Koltuk(6,6); $e_0$=0.18, Koltuk(10,10), $L$=17.424 nm)

| | Referans [127] | | Bu Çalışmada Kullanılan Model | |
|---|---|---|---|---|
| Mod Sayısı | Koltuk (6,6) | Koltuk (10,10) | Koltuk (6,6) | Koltuk (10,10) |
| 1 | 2.50 x $10^{12}$ | 2.41 x $10^{12}$ | 2.5061 x $10^{12}$ | 2.4339 x $10^{12}$ |
| 4 | 9.88 x $10^{12}$ | 9.62 x $10^{12}$ | 10.015 x $10^{12}$ | 9.7272 x $10^{12}$ |
| 16 | 39.4 x $10^{12}$ | 38.4 x $10^{12}$ | 39.491 x $10^{12}$ | 38.370 x $10^{12}$ |
| 24 | 59.0 x$10^{12}$ | 57.6 x$10^{12}$ | 58.152 x $10^{12}$ | 56.529 x $10^{12}$ |
| 36 | 88.5 x$10^{12}$ | 85.3 x$10^{12}$ | 83.873 x $10^{12}$ | 81.609 x $10^{12}$ |

Geliştirilen mevcut modelin geçerliliğinin araştırılması amacıyla yapılacak ikinci karşılaştırma ise literatürde Khademolhosseini [127] tarafından farklı mod sayıları ve

şiral açıları için elde edilen Moleküler Dinamik Simülasyonu sonuçları ile gerçekleştirilecektir. Tablo (3.2)'de burulma dalga yayılımı frekans değerleri görülmektedir. Geliştirilen mevcut model, Moleküler Dinamik Simülasyonu sonuçları ile oldukça yakın bir uyum göstermektedir.




Şekil 3.9 $e_0$ Sabiti ile Dalga Yayılımı Frekansının Değişimi

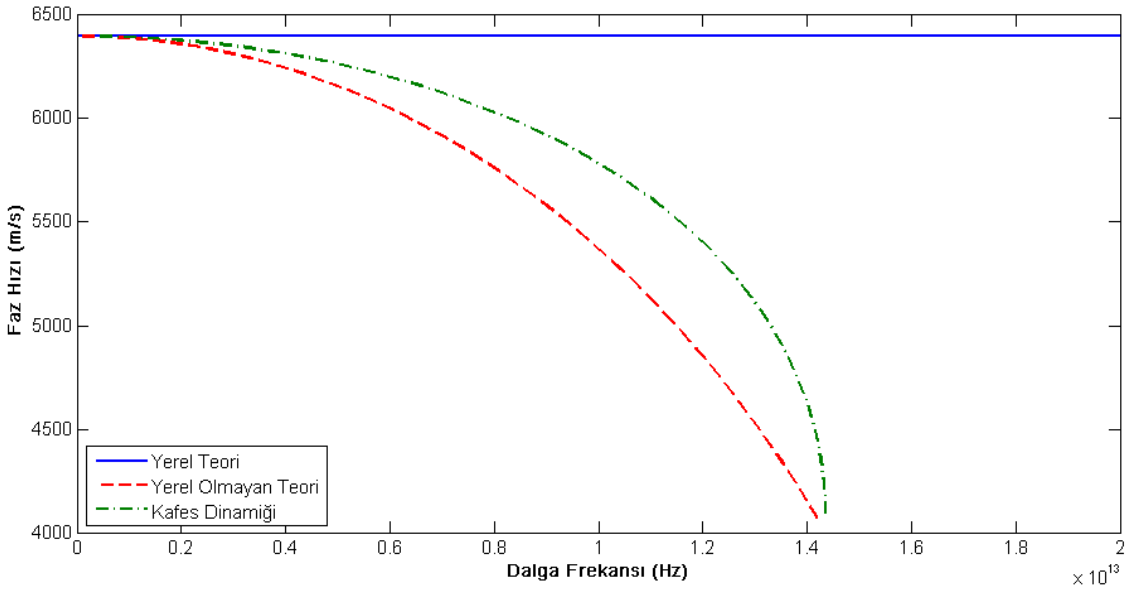
Şekil (3.9)'de yerel olmayan parametrenin burulma dalga yayılımı frekansına olan etkisi görülmektedir. Karbon nanotüp yerel olmayan elastisite yaklaşımı ile daha yumuşak bir yapıya sahip olmaktadır. Eringen sabitinin ($e_0$) artmasıyla dalga yayılım frekansı azalmakta ve limit değere doğru yaklaşmaktadır.

Faz hızı ($\upsilon_P$) sürekli yapının içinde yayılan bir parçacığın hızını ifade etmektedir. Hiçbir fiziksel büyüklüğe bağlı değildir, sadece dalga sayısı ile değişmektedir (Eşitlik (3.31)). Grup hızı ($\upsilon_G$) birbirine yakın frekanslarda yayılan dalga grubunun genel şeklini tanımlamaktadır. Eşitlik (3.32) kullanılarak elde edilir [130].

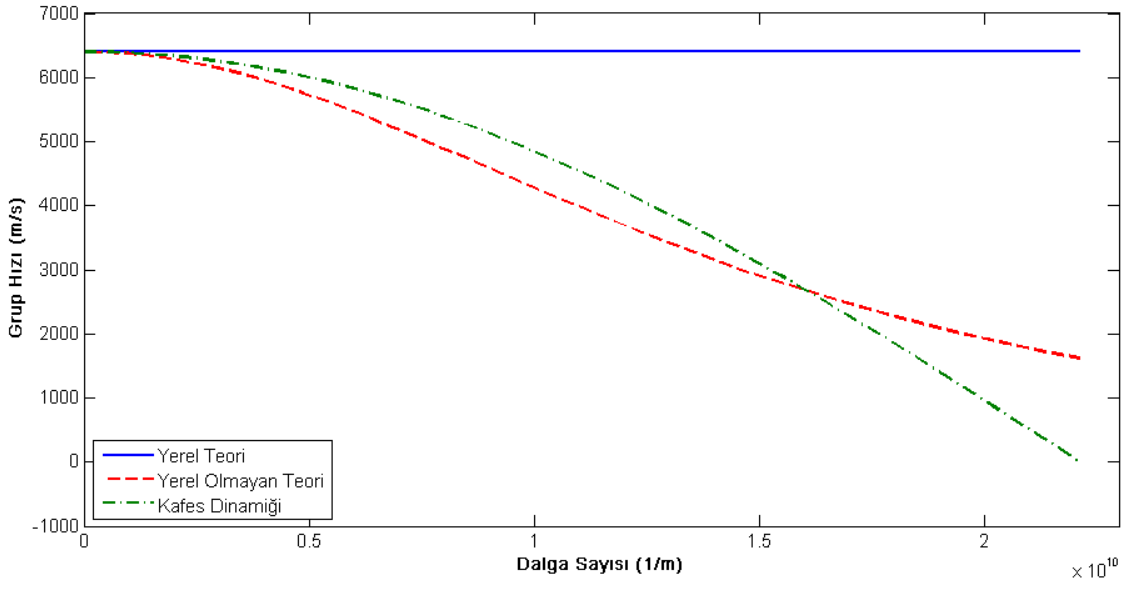
$$\upsilon_P = \frac{\omega}{k} \tag{3.31}$$

$$\upsilon_G = \frac{d\omega}{dk} \tag{3.32}$$

Birinci Brillioun Bölgesi'nin sonunda farklı teorilerin burulma dalga yayılımı sonuçları birbirine oldukça yakındır. Yerel elastisite teorisi sabit bir değer vermekte ancak fiziksel kısıtlamalardan dolayı bu durum mümkün olmamaktadır. Grup hızları ise $1.6x10^{10}$ (1/m) değerinde birbirlerine oldukça yaklaşmaktadır. Ancak birinci Brillioun Bölgesi'nin sonlarına doğru aradaki fark açılmaktadır.




Şekil 3.10 Faz Hızının Farklı Teorilere Göre Değişimi




Şekil 3.11 Grup Hızının Farklı Teorilere Göre Değişimi

# BÖLÜM 4

# KARBON NANOTÜPLERİN STATİK VE DİNAMİK BURULMA ANALİZİ

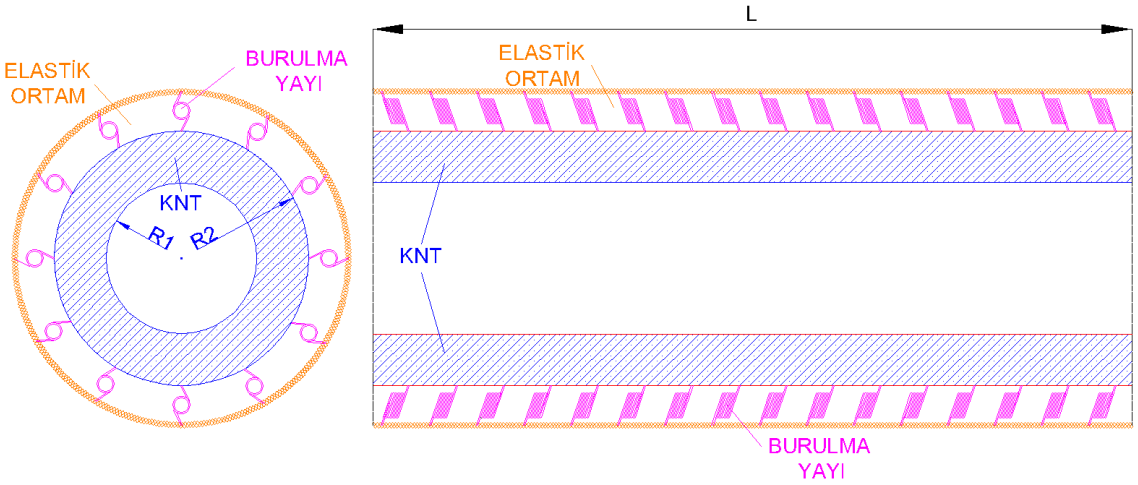
Bu bölümde karbon nanotüplerin statik ve dinamik burulma analizi yapılacaktır. Elastik ortam, viskoelastik ortam, çift ve çok duvarlı yapılar ve basamak kesitli yapılar Bölüm 3'de elde edilen yönetici denklem ve sınır şartları ile incelenecektir. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi'nin burulma davranışına etkisi incelenecektir. Elastik, sönüm ve van der Waals etkisinin boyutsuz açısal yer değiştirme ve boyutsuz frekans parametresine olan etkisi araştırılacaktır. Ankastre ve serbest sınır şartları bahsedilen problemlerde göz önüne alınacaktır.

## 4.1. Statik Analiz

Tek duvarlı karbon nanotüpler, Şekil (2.1)'de görüleceği üzere bir karbon atomu kalınlığına sahip tek sıra grafenin kıvrılarak boru şeklini alması şeklinde ifade edilebilir. Statik analiz kısmında elastik ortam içine gömülü bulunan tek duvarlı karbon nanotüp yapısı incelenecektir.

### 4.1.1. Karbon Nanotüpün Elastik Ortam İçerisindeki Davranışı

Karbon nanotüp, içine gömülü olduğu düşünülen elastik ortam ile birlikte Şekil (4.1)'de görülmektedir. Elastik ortam, burulma yayı davranışı göstereceği düşünülerek modellenmiştir. Yönetici denklem Bölüm 3'de elde edildiği şekliyle statik durum için hatırlanacak olursa:




Şekil 4.1 Karbon Nanotüp ve İçinde Bulunduğu Elastik Ortam Modeli

$$GI_P \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) k_t \theta - \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) T_e \tag{4.1}$$

burada $k_t$ birim uzunluk başına elastik ortamın sertliğini ve $T_e$ karbon nanotüpe etki eden torku ifade etmektedir. Eşitlik (4.1)'in boyutsuzlaştırılmış formu $\bar{x} = \frac{x}{L}$ kabulü ile birlikte elde edilir:

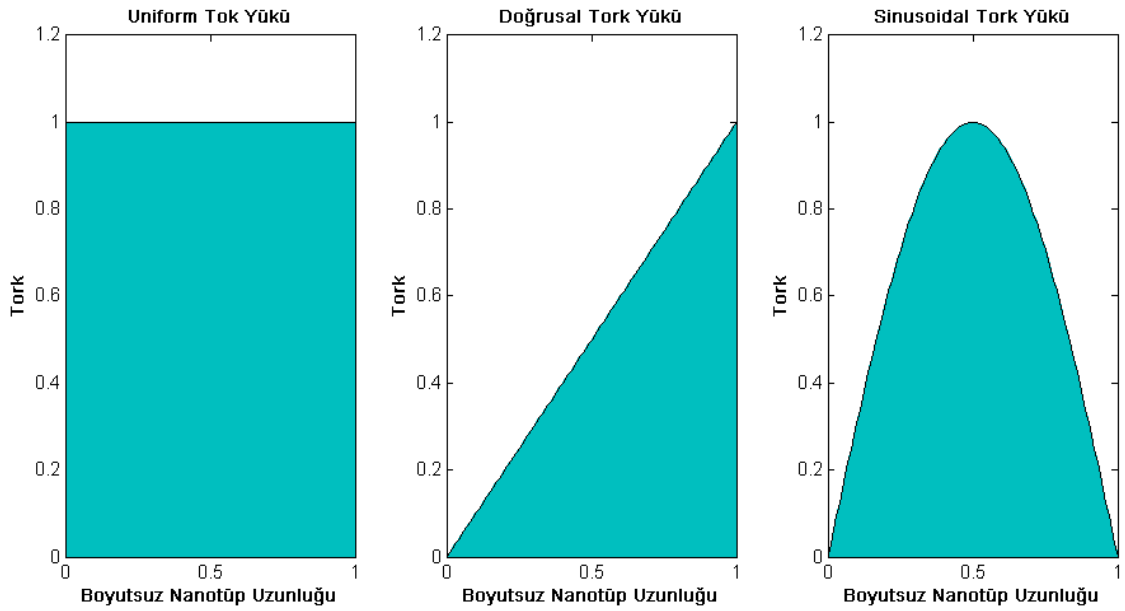
$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{x}^2} - \alpha^2 \theta = \frac{(\mu T_e'' - T_e) L^2}{GI_P + \mu k_t} \quad , \quad \alpha^2 = \frac{k_t L^2}{GI_P + \mu k_t} \tag{4.2}$$

burada $L$ karbon nanotüpün uzunluğunu ifade etmektedir. Statik analiz için 3 farklı tork yükleme durumu incelenecektir: Uniform Tork Yükü(UTY), Doğrusal Tork Yükü (DTY) ve Sinüsoidal Tork Yükü (STY) (Şekil (4.2)).

- **Uniform Tork Yükü (UTY)**

Uniform tork yükü $T_e = T_0$ şeklinde tanımlanmıştır. Burada $T_0$ tork yükünün genliğini ifade etmektedir. Eşitlik (4.2), sabit tork yükleme durumunda aşağıdaki gibi ifade edillir:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{x}^2} - \alpha^2 \theta = \frac{-T_0 L^2}{GI_P + \mu k_t} \tag{4.3}$$




Şekil 4.2 Statik Analizdeki Tork Yüklemeleri

Eşitlik (4.3)'deki diferansiyel denklemin genel çözümü Eşitlik (4.4)'de ifade edildiği şekildedir:

$$\theta(\bar{x}) = C_1 e^{\alpha\bar{x}} + C_2 e^{-\alpha\bar{x}} + \frac{T_0}{k_t} \tag{4.4}$$

burada $C_1$ ve $C_2$ sınır şartlarına bağlı olan sabitlerdir. Ankastre-Ankastre (A-A) ve Ankastre-Serbest (A-S) sınır şartları göz önüne alınırsa:

$$\left.\begin{matrix} \bar{x}=0 \rightarrow \theta=0 \\ \bar{x}=1 \rightarrow \theta=0 \end{matrix}\right\} \quad A-A \tag{4.5}$$

Karbon nanotüp için açısal yer değiştirme ifadeleri A-A sınır şartında elastik ortamın olduğu ve olmadığı durumlar için aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\bar{\theta} = \frac{-\bar{x}^2}{2} + \frac{\bar{x}}{2} \quad , \quad k_t = 0 \tag{4.6}$$

$$\bar{\theta} = \frac{GI_P}{k_t L^2}\left[\frac{-e^{\alpha\bar{x}} - e^{\alpha(1-\bar{x})}}{e^{\alpha}+1} + 1\right] \quad , \quad k_t \neq 0 \tag{4.7}$$

burada $\bar{\theta}$ boyutsuz açısal yer değiştirme parametresidir ve $\bar{\theta} = \theta\frac{GI_P}{T_0 L^2}$ şeklinde tanımlanmaktadır. Yerel olmayan elastisitenin elastik ortamın olmadığı UTY durumu

için etkisi görülmemektedir. Yerel ve yerel olmayan davranış aynıdır. A-S sınır şartları Eşitlik (4.8)'de belirtilmiştir:

$$\left.\begin{matrix}\bar{x}=0\rightarrow\theta=0\\ \bar{x}=1\rightarrow\theta'=0\end{matrix}\right\} \quad A-S \tag{4.8}$$

Karbon nanotüp için açısal yer değiştirme ifadeleri A-S sınır şartında Eşitlik (4.9) ve (4.10)'da elastik ortamın olduğu ve olmadığı durumlar için belirtilmiştir:

$$\bar{\theta}=\frac{-\bar{x}^2}{2}+\bar{x} \quad , \quad k_t=0 \tag{4.9}$$

$$\bar{\theta}=\frac{GI_P}{k_tL^2}\left[\frac{-e^{\alpha\bar{x}}-e^{\alpha(2-\bar{x})}}{e^{2\alpha}+1}+1\right] \quad , \quad k_t\neq 0 \tag{4.10}$$

Yerel ve yerel olmayan davranış A-A sınır şartında olduğu gibi elastik ortamın olmadığı durum için aynıdır.

- **Doğrusal Tork Yükü (DTY)**

Doğrusal tork yükü $T_e=T_0\bar{x}$ şeklinde tanımlanmıştır. Eşitlik (4.2), doğrusal tork yükleme durumunda aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar{x}^2}-\alpha^2\theta=\frac{-T_0\bar{x}L^2}{GI_P+\mu k_t} \tag{4.11}$$

Eşitlik (4.11)'ün genel çözümü Eşitlik (4.12)'deki gibi ifade edilir:

$$\theta(\bar{x})=C_1e^{\alpha\bar{x}}+C_2e^{-\alpha\bar{x}}+\frac{T_0}{k_t}\bar{x} \tag{4.12}$$

burada $C_1$ ve $C_2$ bilinmeyen sabitlerdir ve sınır şartlarına bağlı olarak bulunurlar. Ankastre-Ankastre (A-A) ve Ankastre-Serbest (A-S) sınır şartları göz önüne alınarak çalışmaya devam edilecektir.

Karbon nanotüp için açısal yer değiştirme ifadeleri A-A sınır şartında Eşitlik (4.13) ve (4.14)'de elastik ortamın olduğu ve olmadığı durumlar için belirtilmiştir.

Yerel olmayan elastisitenin elastik ortamın olmadığı DTY durumu için etkisi görülmemektedir. Yerel ve yerel olmayan davranış aynıdır.

$$\bar{\theta} = \frac{-\bar{x}^3+\bar{x}}{6} \quad , \quad k_t = 0 \tag{4.13}$$

$$\bar{\theta} = \frac{GI_P}{k_t L^2}\left[\frac{e^{\alpha\bar{x}}-e^{-\alpha\bar{x}}}{-e^{\alpha}+e^{-\alpha}} + \bar{x}\right] \quad , \quad k_t \neq 0 \tag{4.14}$$

Karbon nanotüp için açısal yer değiştirme ifadeleri A-S sınır şartında Eşitlik (4.15) ve (4.16)'da elastik ortamın olduğu ve olmadığı durumlar için belirtilmiştir. Yerel olmayan elastisitenin elastik ortamın olmadığı DTY durumu için etkisi görülmemektedir. Yerel ve yerel olmayan davranış aynıdır.

$$\bar{\theta} = \frac{-\bar{x}^3+3\bar{x}}{6} \quad , \quad k_t = 0 \tag{4.15}$$

$$\bar{\theta} = \frac{GI_P}{k_t L^2}\left[\frac{e^{-\alpha\bar{x}}-e^{\alpha\bar{x}}}{\alpha(e^{\alpha}+e^{-\alpha})} + \bar{x}\right] \quad , \quad k_t \neq 0 \tag{4.16}$$

- **Sinusoidal Tork Yükü (STY)**

Sinusoidal tork yükü $T_e = T_0\, sin(\pi\bar{x})$ şeklinde tanımlanmıştır. Eşitlik (4.2), sinusoidal tork yükü durumunda aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar{x}^2} - \alpha^2\theta = \frac{-T_0(\mu\pi^2+L^2)}{GI_P+\mu k_t} sin(\pi\bar{x}) \tag{4.17}$$

Eşitlik (4.17)'nin genel çözümü Eşitlik (4.18)'deki gibi ifade edilir:

$$\theta(\bar{x}) = C_1 e^{\alpha\bar{x}} + C_2 e^{-\alpha\bar{x}} + \frac{T_0(\mu\pi^2+L^2)}{k_t L^2+\pi^2(GI_P+\mu k_t)} sin(\pi\bar{x}) \tag{4.18}$$

burada $C_1$ ve $C_2$ belirsiz katsayılardır ve sınır şartlarına bağlı olarak bulunurlar. Ankastre-Ankastre (A-A) ve Ankastre-Serbest (A-S) sınır şartları göz önüne alınarak çalışmaya devam edilecektir.

Karbon nanotüp için açısal yer değiştirme ifadeleri A-A sınır şartında Eşitlik (4.19) ve (4.20)'da elastik ortamın olduğu ve olmadığı durumlar için ifade edilmiştir:

$$\bar{\theta} = \left[\frac{\mu}{L^2} + \frac{1}{\pi^2}\right] sin(\pi\bar{x}) \quad , \quad k_t = 0 \tag{4.19}$$

$$\bar{\theta} = \frac{GI_P}{L^2}\frac{(\mu\pi^2+L^2)}{k_t L^2+\pi^2(GI_P+\mu k_t)} sin(\pi\bar{x}) \quad , \quad k_t \neq 0 \tag{4.20}$$

Karbon nanotüp için açısal yer değiştirme denklemleri A-S sınır şartında Eşitlik (4.21) ve (4.22)'de elastik ortamın olduğu ve olmadığı durumlar için ifade edilmiştir:

$$\bar{\theta} = \left[\frac{\mu}{L^2} + \frac{1}{\pi^2}\right](sin(\pi\bar{x}) + \pi\bar{x}) \quad , \quad k_t = 0 \tag{4.21}$$

$$\bar{\theta} = \frac{GI_P}{L^2}\frac{(\mu\pi^2+L^2)}{k_tL^2+\pi^2(GI_P+\mu k_t)}\left[\frac{\pi(e^{\alpha\bar{x}}-e^{-\alpha\bar{x}})}{\alpha(e^{\alpha}+e^{-\alpha})} + sin(\pi\bar{x})\right] \quad , \quad k_t \neq 0 \tag{4.22}$$

### 4.2. Dinamik Analiz

Dinamik analiz kısmında elastik ve viskoelastik ortama gömülü tek duvarlı karbon nanotüp yapısının, iki duvarlı karbon nanotüp yapısının, çok duvarlı karbon nanotüp yapısının ve basamak kesitli karbon nanotüp yapısının burulma titreşimi ve dalga yayılımı incelenmiştir.

#### 4.2.1. Karbon Nanotüpün Elastik Ortam İçerisindeki Dinamik Davranışı

Bu bölümde karbon nanotüpün elastik ortamın olduğu ve olmadığı durumlardaki dinamik davranışı incelenecektir. Eşitlik (4.23), Bölüm 3'de elde edilen yönetici denkleme elastik ortam etkisinin dahil edilmiş formudur:

$$GI_P\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} = \left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\rho I_P\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2} + \left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)k_t\theta \tag{4.23}$$

burada $k_t$ elastik ortamını sertliğini ve $\theta$ karbon nanotüpün açısal yer değiştirmesini ifade etmektedir. $\theta$, harmonik titreşim kabulü ile Eşitlik (4.24)'deki gibi ifade edilebilir:

$$\theta(x,t) = \psi(x)e^{j\omega t} \tag{4.24}$$

burada $\omega$ açısal hızı ve $j^2 = -1$ ifade etmektedir. Eşitlik (4.24)'ü, Eşitlik (4.23)'de boyutsuz nanotüp uzunluğu $\left(\bar{x} = \frac{x}{L}\right)$ kabulü ile yerine konulduğunda Eşitlik (4.25) elde edilir:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial\bar{x}^2} + \beta^2\psi = 0 \tag{4.25}$$

buradaki boyutsuz parametreler:

$$\beta^2 = \frac{(\Omega^2 - \bar{\kappa})}{\left(1+\frac{\mu}{L^2}\bar{\kappa} - \frac{\mu}{L^2}\Omega^2\right)} \quad , \quad \bar{\kappa} = \frac{k_t L^2}{G I_P} \quad , \quad \Omega^2 = \frac{\omega^2 \rho L^2}{G} \tag{4.26}$$

burada $\bar{\kappa}$ ve $\Omega$ karbon nanotüpün boyutsuz sertlik ve boyutsuz frekans parametresini ifade etmektedir.

- **Ankastre-Ankastre Sınır Şartı**

A-A sınır şartı için Eşitlik (4.26)'deki boyutsuz frekans parametresi Eşitlik (4.27)'daki gibi elde edilir:

$$\left.\begin{matrix} \bar{x}=0 \rightarrow \theta=0 \\ \bar{x}=1 \rightarrow \theta=0 \end{matrix}\right\} \quad \beta = m\pi \quad \rightarrow \quad \Omega = \sqrt{\frac{\beta^2 + \bar{\kappa}\left(1+\frac{\mu}{L^2}\beta^2\right)}{1+\frac{\mu}{L^2}\beta^2}} \tag{4.27}$$

- **Ankastre-Serbest Sınır Şartı**

A-S sınır şartı için Eşitlik (4.26)'daki boyutsuz frekans parametresi Eşitlik (4.28)'deki gibi elde edilir:

$$\left.\begin{matrix} \bar{x}=0 \rightarrow \theta=0 \\ \bar{x}=1 \rightarrow \theta'=0 \end{matrix}\right\} \quad \beta = (2m-1)\frac{\pi}{2} \quad \rightarrow \quad \Omega = \sqrt{\frac{\beta^2 + \bar{\kappa}\left(1+\frac{\mu}{L^2}\beta^2\right)}{1+\frac{\mu}{L^2}\beta^2}} \tag{4.28}$$

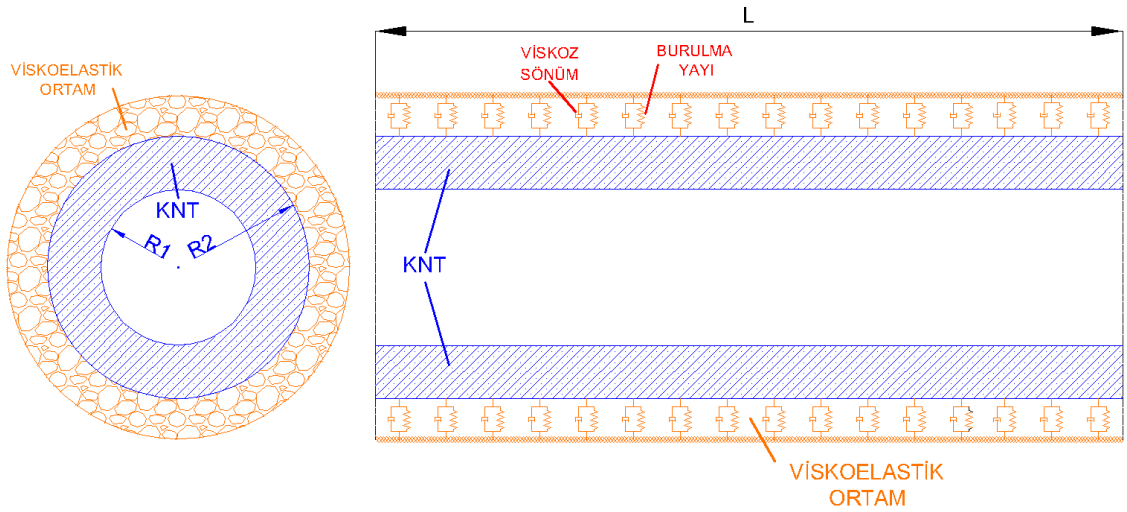
### 4.2.2. Karbon Nanotüpün Viskoelastik Ortam İçerisindeki Davranışı

Mikrotüp olarak modellenen biyolojik dokular veya karbon nanotüplerin içinde çalıştığı ortamlar elastik karakteristiğin yanında sönüm etkisine de sahip olabilmektedir. Viskoelastik ortamlar sahip olduğu sönüm etkisinden dolayı karbon nanotüpün dinamik davranışını değiştirecektir. Viskoelastik ortam Şekil (4.3)'deki şekliyle yay ve sönüm elemanından oluşan sürekli bir ortam olarak modellenmiştir.

Bölüm 3'de elde edilen hareket denklemini tekrar hatırlamak gerekirse:

$$G I_P \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \rho I_P \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) T_e \tag{4.29}$$

Burada $T_e$ tork etkisini ifade etmektedir. Tork etkisi ise viskoelastik ortam sebebiyle oluşan elastik ve sönüm etkisini içermektedir.




Şekil 4.3 Karbon Nanotüpün Viskoelastik Ortam İçerisindeki Modeli

$$T_e = k_t\theta + c_t\frac{\partial\theta}{\partial t} \tag{4.30}$$

Burada $k_t$ ortamın sertliğini ve $c_t$ ise ortamın sönümünü ifade etmektedir. Eşitlik (4.29), Eşitlik (4.30) ile birlikte yeniden düzenlenirse Eşitlik (4.31) elde edilir:

$$GI_P\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} - \rho I_P\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2} + \mu\rho I_P\frac{\partial^4\theta}{\partial x^2\partial t^2} - k_t\theta - c_t\frac{\partial\theta}{\partial t} + \mu k_t\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \mu c_t\frac{\partial^3\theta}{\partial x^2\partial t} = 0 \tag{4.31}$$

Eşitlik (4.31) viskoelastik ortam içerisindeki karbon nanotüpün hareket denklemidir. Açısal yer değiştirme aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\theta(x,t) = \psi(x)\, e^{\lambda t} \tag{4.32}$$

burada $\psi(x)$ açısal yer değiştirmenin genlik fonksiyonunu, $\lambda$ ise karbon nanotüp için karakteristik parametreyi ifade etmektedir. Eşitlik (4.32), Eşitlik (4.31)'de yerine yazılarak boyutsuz nanotüp uzunluğu kabulü ile birlikte $\left(\bar{x} = \frac{x}{L}\right)$ yeniden düzenlenirse:

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar{x}^2}\left[1 + \frac{\mu}{L^2}\frac{\rho I_P\lambda^2L^2}{GI_P} + \frac{\mu}{L^2}\frac{c_t\lambda L^2}{GI_P} + \frac{\mu}{L^2}\frac{k_tL^2}{GI_P}\right] + \theta\left[-\frac{\rho I_P\lambda^2L^2}{GI_P} - \frac{c_t\lambda L^2}{GI_P} - \frac{k_tL^2}{GI_P}\right] = 0 \tag{4.33}$$

elde edilir. Eşitlik (4.33), boyutsuz parametre kabulü ile yeniden düzenlenirse:

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial\bar{x}^2} + \beta^2\theta = 0 \tag{4.34}$$

ve

$$\beta^2 = \frac{-\lambda^2\Omega - \lambda\bar{C} - \bar{K}}{1+\frac{\mu}{L^2}[\lambda^2\Omega^2 + \lambda\bar{C} + \bar{K}]} \tag{4.35}$$

burada aşağıda tanımlandığı şekliyle $\Omega$ frekans parametresi katsayısı, $C$ sönüm parametresi katsayısı, *K* boyutsuz sertlik katsayısıdır.

$$\Omega = \frac{\rho I_P L^2}{G I_P} \quad , \quad \bar{C} = \frac{c_t L^2}{G I_P} \quad , \quad \bar{K} = \frac{k_t L^2}{G I_P} \tag{4.36}$$

Ankastre-Ankastre(A-A) sınır şartı için $\beta = m\pi$ olarak bulunur. Eşitlik (4.36) A-A sınır şartı için düzenlenirse:

$$\left[\left(1 + \beta^2\frac{\mu}{L^2}\right)(\lambda^2\Omega + \lambda\bar{C} + \bar{K})\right] + \beta^2 = 0 \tag{4.37}$$

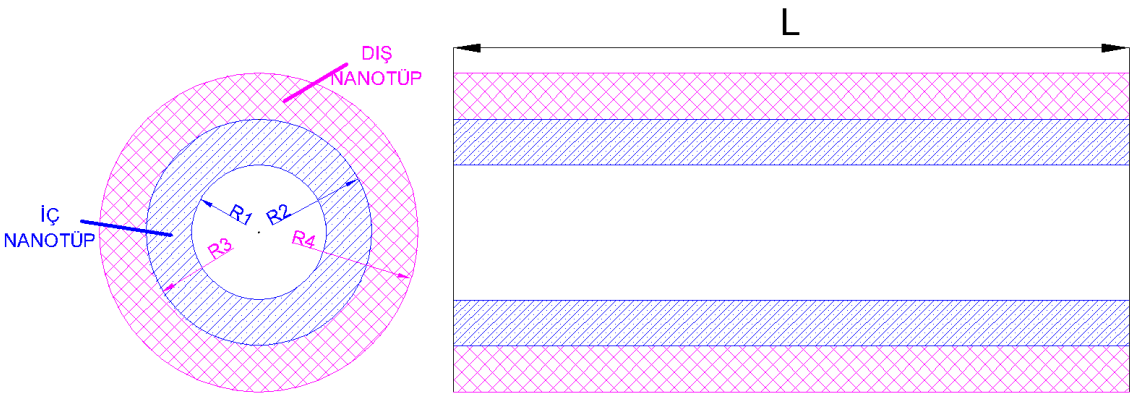
Eşitlik (4.37)'nin çözümü karbon nanotüp için karakteristik değeri($\beta$) verecektir. $\lambda^2\Omega$ Boyutsuz Karakteristik Parametre (BKP) olarak adlandırılır. Kompleks bir sayı olduğundan sanal kısmı Boyutsuz Sönüm Parametresi(BSP), reel sayı kısmı Boyutsuz Frekans Parametresi(BFP) olarak adlandırılır.

### 4.2.3. Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Titreşimi

Çift duvarlı karbon nanotüpler Şekil (4.4)'de görüldüğü üzere iç içe geçmiş farklı çaplara sahip iki karbon nanotüpden oluşmaktadır. Her bir karbon nanotüpdeki açısal deformasyon nanotüpler arasında oluşan van der Waals etkileşimiyle değişir.

Bölüm (3.3)'de elde edilen hareket denklemi hatırlanacak olursa:

$$G_i I_{P_i} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial x^2} = \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \rho_i I_{P_i} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial t^2} - \left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) T_i \tag{4.38}$$




Şekil 4.4 Çift Duvarlı Karbon Nanotüp Modeli

burada $T_i$, van der Waals etkileşiminden dolayı oluşan tork etkisini ifade etmektedir. Karbon nanotüpler arası van der Waals etkileşiminden dolayı oluşan kuvvetin ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Şekil 4.5) [56,81,152]:

$$f_{vdW} = C_{vdW} \Delta s \tag{4.39}$$

burada aşağıda tanımlandığı şekliyle $\Delta s$ açısal yer değiştirmenin yay uzunluğu ve $C_{vdW}$ van der Waals etkileşimi katsayısını ifade eder [164].

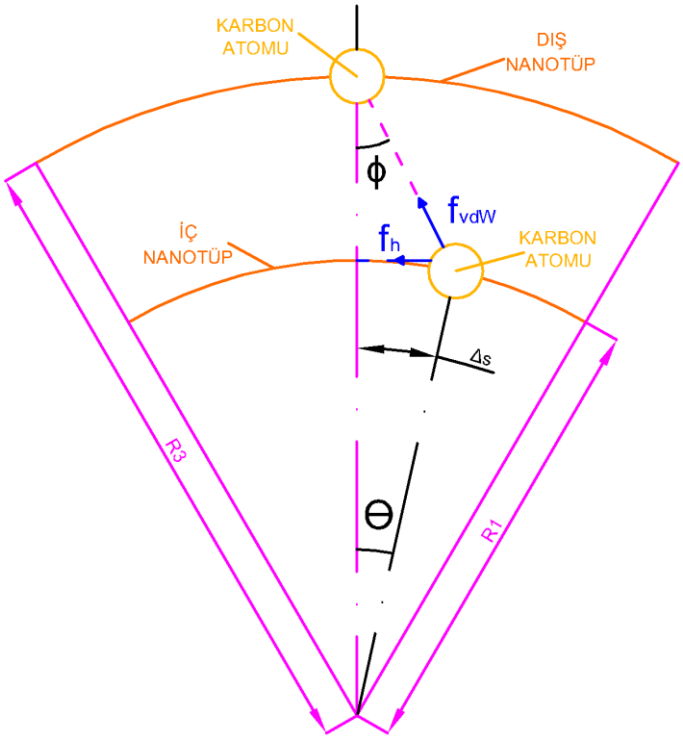
$$\Delta s = R_i \Delta \theta \tag{4.40}$$

$$C_{vdW} = \frac{320(2R_i)}{0.16a^2} \left(\frac{erg}{cm^2}\right) \quad , \quad a = 0.142\, nm \quad , \quad i = 1,2,\dots,N \tag{4.41}$$

van der Waals kuvvetinin yatay bileşeni aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$f_h = f_{vdW} \sin \phi \tag{4.42}$$

burada $\phi$ açısı Şekil (4.5)'de görülmektedir. van der Waals kuvvetinin yatay bileşeni, tork etkisi oluşturmaktadır:




Şekil 4.5 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Yapısındaki van der Waals Etkileşimi

$$T_\theta = C_t \Delta\theta \tag{4.43}$$

burada $C_t$ çevresel van der Waals etkileşim katsayısı olarak tanımlanmıştır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$C_t = \left(C_{vdW}\, {R_i}^2 sin\,\phi\right) \tag{4.44}$$

Görüldüğü üzere $C_t$ ifadesi içerisinde doğrusal olmayan terimler içermektedir. Doğrusal analiz yapabilmek amacıyla $C_t$ değeri (0.0001-0.01)$C_{vdW}$ aralığında kabul edilecektir. Eşitlik (4.38)'deki $T_i$ ifadesi Eşitlik (4.44) göz önüne alınarak tekrar düzenlenirse, çift duvarlı karbon nanotüp için hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$GI_{P_1}\frac{\partial^2\theta_1}{\partial x^2} + C_t(\theta_2-\theta_1) - \mu C_t\left(\frac{\partial^2\theta_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\theta_1}{\partial x^2}\right) = \rho I_{P_1}\frac{\partial^2\theta_1}{\partial t^2} - \mu\rho I_{P_1}\frac{\partial^4\theta_1}{\partial x^2\partial t^2} \tag{4.45}$$

$$GI_{P_2}\frac{\partial^2\theta_2}{\partial x^2} + C_t(\theta_1-\theta_2) - \mu C_t\left(\frac{\partial^2\theta_1}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\theta_2}{\partial x^2}\right) = \rho I_{P_2}\frac{\partial^2\theta_2}{\partial t^2} - \mu\rho I_{P_2}\frac{\partial^4\theta_2}{\partial x^2\partial t^2} \tag{4.46}$$

Harmonik titreşim kabulü ile açısal deformasyon, Eşitlik (4.47)'deki gibi ifade edilir:

$$\theta(x,t) = \psi(x)e^{j\omega t} \tag{4.47}$$

burada $\omega$ açısal frekansı ifade etmektedir. Ankastre-Ankastre(A-A) sınır şartlarındaki analitik çözümü bulmak için $\psi(x)$ Eşitlik (18)'deki gibi ifade edilir:

$$\psi(x) = \psi_i \sin(\beta x) \tag{4.48}$$

burada $\psi_i$, *i.* nanotüpün genliğini ve $\beta = m\pi$ (m:dalga sayısı)'nı ifade etmektedir. Eşitlik (4.48), Eşitlik (4.45) ve Eşitlik (4.46)'da boyutsuz nanotüp uzunluğu $\left(\bar{x} = \frac{x}{L}\right)$ kabulü ile yerine yazılırsa, Eşitlik (4.49) ve Eşitlik (4.50)'deki boyutsuz hareket denklemleri elde edilir:

$$\left(-\frac{\mu}{L^2}\Omega^2 + \frac{\mu}{L^2}\alpha_1 + 1\right)\frac{\partial^2\theta_1}{\partial\bar{x}^2} + (\Omega^2 - \alpha_1)\theta_1 + \alpha_1\theta_2 - -\frac{\mu}{L^2}\alpha_1\frac{\partial^2\theta_2}{\partial\bar{x}^2} = 0 \tag{4.49}$$

$$\left(-\frac{\mu}{L^2}\Omega^2 + \frac{\mu}{L^2}\alpha_2 + 1\right)\frac{\partial^2\theta_2}{\partial\bar{x}^2} + (\Omega^2 - \alpha_2)\theta_2 + \alpha_2\theta_1 - -\frac{\mu}{L^2}\alpha_2\frac{\partial^2\theta_1}{\partial\bar{x}^2} = 0 \tag{4.50}$$

ilgili terimler Eşitlik (4.51)'de tanımlanmıştır:

$$\Omega^2 = \frac{\rho\omega^2L^2}{G} \quad , \quad \alpha_i = \frac{C_tL^2}{GI_{P_i}} \quad , \quad (i = 1,2) \tag{4.51}$$

burada $\Omega$ boyutsuz frekans parametresini ve $\alpha_i$ boyutsuz sertlik parametresini ifade etmektedir. Eşitlik (4.48), Eşitlik (4.49) ve (4.50)'de yerine yazılırsa Eşitlik (4.52)'deki öz-değer denklemi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} \Omega^2 - \alpha_1 - \left(-\frac{\mu}{L^2}\Omega^2 + \frac{\mu}{L^2}\alpha_1 + 1\right)\beta^2 & \left(\alpha_1 + \frac{\mu}{L^2}\alpha_1\beta^2\right) \\ \left(\alpha_2 + \frac{\mu}{L^2}\alpha_2\beta^2\right) & \Omega^2 - \alpha_2 - \left(-\frac{\mu}{L^2}\Omega^2 + \frac{\mu}{L^2}\alpha_2 + 1\right)\beta^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\psi_1 \\ \psi_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 \\ 0\end{bmatrix} \tag{4.52}$$

Katsayılar matrisinin determinantı sıfıra eşitlenirse, Eşitlik (4.53)'ü verir:

$$P_1{}^2\Omega^4 - P_1(P_2 + P_3)\Omega^2 + (P_2P_3 - P_4P_5) = 0 \tag{4.53}$$

ilgili terimler Eşitlik (4.54)-(4.58)'de belirtilmiştir:

$$P_1 = 1 + \frac{\mu}{L^2}\beta^2 \tag{4.54}$$

$$P_2 = \left[\alpha_1 + \left(1 + \frac{\mu}{L^2}\alpha_1\right)\beta^2\right] \tag{4.55}$$

$$P_3 = \left[\alpha_2 + \left(1 + \frac{\mu}{L^2}\alpha_2\right)\beta^2\right] \tag{4.56}$$

$$P_4 = \left[\alpha_1 + \frac{\mu}{L^2}\alpha_1\beta^2\right] \tag{4.57}$$

$$P_5 = \left[\alpha_2 + \frac{\mu}{L^2}\alpha_2\beta^2\right] \tag{4.58}$$

Eşitlik (4.53)'ün kökleri, boyutsuz frekans parametreleri olarak Eşitlik (4.59) ve Eşitlik (4.60)'daki gibi elde edilir:

$$\Omega_{1m}{}^2 = \frac{P_1(P_2+P_3)+\sqrt{\left(P_1(P_2+P_3)\right)^2-4P_1{}^2(P_2P_3-P_4P_5)}}{2P_1{}^2} \tag{4.59}$$

$$\Omega_{2m}{}^2 = \frac{P_1(P_2+P_3)-\sqrt{\left(P_1(P_2+P_3)\right)^2-4P_1{}^2(P_2P_3-P_4P_5)}}{2P_1{}^2} \tag{4.60}$$

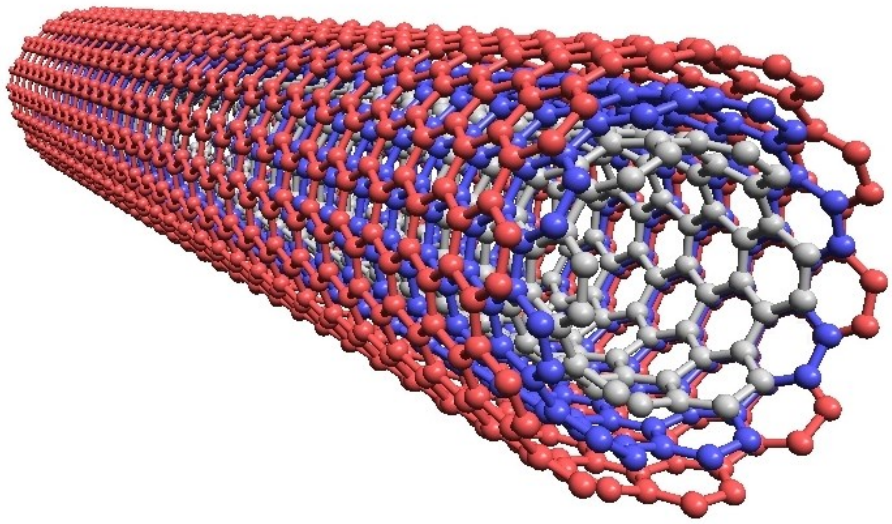
burada $\Omega_{1m}$ küçük rezonans frekansını, $\Omega_{2m}$ büyük rezonans frekansını ifade etmektedir. Herhangi bir dalga sayısı için iki adet frekans bulunmaktadır. Boyutsuz frekans parametresi(BFP) Eşitlik (4.52)'de yerine yazılarak Eşitlik (4.61)'deki şekliyle genlik oranı bulunabilir:

$$\frac{\psi_2}{\psi_1} = \frac{\Omega^2-\alpha_1-\left(-\frac{\mu}{L^2}\Omega^2+\frac{\mu}{L^2}\alpha_1+1\right)\beta^2}{-\left(\alpha_1+\frac{\mu}{L^2}\alpha_1\beta^2\right)} \tag{4.61}$$

Eşitlik (4.61)'de görüldüğü üzere genlik oranı pozitif veya negatif olabilir. Pozitif genlik oranı nanotüplerin aynı yönde hareket ettiğini, negatif genlik oranı nanotüplerin zıt yönde hareket ettiğini göstermektedir.

### 4.2.4. Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerde Burulma Dalga Yayılımı

Çok duvarlı karbon nanotüpler Şekil (4.6)'da görüldüğü üzere iç içe geçmiş farklı çaplara sahip karbon nanotüplerden oluşmaktadır. Her bir karbon nanotüpteki açısal deformasyon nanotüpler arasında oluşan van der Waals etkileşimiyle değişir. N adet karbon nanotüpten oluşan çok duvarlı karbon nanotüp için hareket denklemini ifade etmek gerekirse:



Şekil 4.6 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Atomik Kafes Yapısı Modeli

$$\left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)T_1 = -GI_{P_1}\frac{\partial^2\theta_1}{\partial x^2} + \left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\rho I_{P_1}\frac{\partial^2\theta_1}{\partial t^2} \tag{4.62}$$

$$\left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)T_2 = -GI_{P_2}\frac{\partial^2\theta_2}{\partial x^2} + \left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\rho I_{P_2}\frac{\partial^2\theta_2}{\partial t^2} \tag{4.63}$$

$$\vdots$$

$$\left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)T_i = -GI_{P_i}\frac{\partial^2\theta_i}{\partial x^2} + \left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\rho I_{P_i}\frac{\partial^2\theta_i}{\partial t^2} \tag{4.64}$$

$$\vdots$$

$$\left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)T_N = -GI_{P_N}\frac{\partial^2\theta_N}{\partial x^2} + \left(1-\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\rho I_{P_N}\frac{\partial^2\theta_N}{\partial t^2} \tag{4.65}$$

Burada $\theta_i$ (i = 1,2,. . . ,N) *i.* nanotüpün açısal deformasyonunu, $I_{Pi}$ *i.* nanotüpün polar atalet momentini, alt indis 1, 2, 3, …, N ise nanotüp sıralamasında içten dışa doğru kaçıncı olduğunu ifade etmektedir. $T_i$, van der Waals etkilişimden dolayı oluşan tork etkisini ifade etmektedir. Karbon nanotüpler arası van der Waals etkileşiminden

dolayı oluşan kuvvetin ve tork etkisinin ifadesi Eşitlik (4.39)-(4.44)'de elde edilmiştir (Şekil 4.7).

Eşitlik (4.62-4.65)'daki $T_i$ ifadesi Eşitlik (4.44) göz önüne alınarak tekrar düzenlenirse, N adet nanotüp için hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılır:

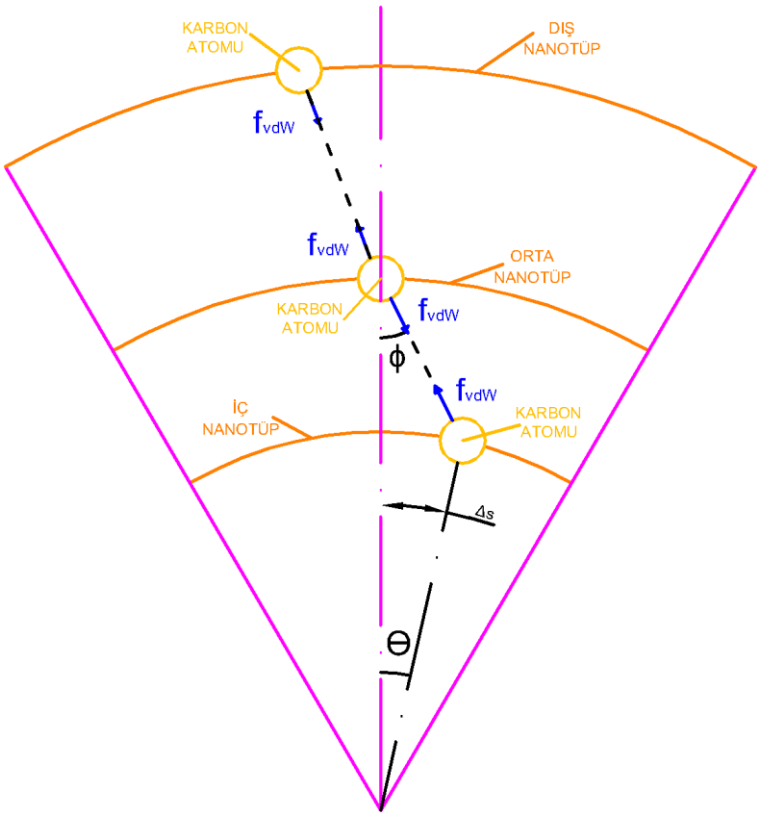
$$C_{t_1}(\theta_2-\theta_1)-\mu C_{t_1}\left(\frac{\partial^2\theta_2}{\partial x^2}-\frac{\partial^2\theta_1}{\partial x^2}\right)=-GI_{P_1}\frac{\partial^2\theta_1}{\partial x^2}+\rho I_{P_1}\frac{\partial^2\theta_1}{\partial t^2}-\mu\rho I_{P_1}\frac{\partial^4\theta_1}{\partial x^2\partial t^2} \quad (4.66)$$

$$C_{t_i}\left(\theta_{(i-1)}-2\theta_i+\theta_{(i+1)}\right)-\mu C_t\left(\frac{\partial^2\theta_{\theta_{(i-1)}}}{\partial x^2}-2\frac{\partial^2\theta_i}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta_{\theta_{(i+1)}}}{\partial x^2}\right)=-GI_{P_i}\frac{\partial^2\theta_i}{\partial x^2}+$$

$$\rho I_{P_i}\frac{\partial^2\theta_i}{\partial t^2}-\mu\rho I_{P_i}\frac{\partial^4\theta_i}{\partial x^2\partial t^2} \quad (4.67)$$

$$C_{t_N}\left(\theta_{(N-1)}-\theta_N\right)-\mu C_{t_N}\left(\frac{\partial^2\theta_{(N-1)}}{\partial x^2}-\frac{\partial^2\theta_N}{\partial x^2}\right)=-GI_{P_N}\frac{\partial^2\theta_N}{\partial x^2}+\rho I_{P_N}\frac{\partial^2\theta_N}{\partial t^2}-$$

$$\mu\rho I_{P_N}\frac{\partial^4\theta_N}{\partial x^2\partial t^2} \quad (4.68)$$




Şekil 4.7 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Yapısındaki van der Waals Etkileşimi

Burulmalı dalga yayılımı için çok duvarlı karbon nanotüplerde her bir nanotüpün açısal yer değiştirmesi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\theta_i(x,t) = \psi_i \, e^{j(\omega t - kx)} \tag{4.69}$$

burada $\omega$ burulma dalga yayılımı frekansı, $k$ çevresel dalga sayısını ve $j^2$=-1'i ifade etmektedir. Eşitlik (4.66)-(4.68), N adet nanotüp için matris formunda ifade edilirse:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdots\cdots & P_{1i} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \cdots\cdots & P_{2i} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ P_{i1} & P_{i2} & P_{i3} & \cdots\cdots & P_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ . \\ . \\ . \\ . \\ \psi_i \end{bmatrix} = 0 \tag{4.70}$$

burada $\psi_i$ *i.* nanotüpün açısal yer değiştirme genliğini ifade etmektedir. Matris elemanları aşağıda ifade edildiği şekildedir:

$$\begin{aligned} P_{11} &= -k^2 G I_{P_1} - (\mu k^2 + 1)\left(C_{t_1} - \rho I_{P_1} \omega^2\right) \\ P_{12} &= C_{t_1}(\mu k^2 + 1) \\ P_{13} &= P_{14} = \cdots = P_{1i} = 0 \end{aligned} \tag{4.71}$$

$$\begin{aligned} P_{i(i-1)} &= P_{i(i+1)} = C_{t_i}(\mu k^2 + 1) \\ P_{ii} &= -k^2 G I_{P_i} - (\mu k^2 + 1)\left(2C_{t_i} - \rho I_{P_i} \omega^2\right) \\ P_{i1} &= \cdots = P_{i(i-3)} = P_{i(i-2)} = P_{i(i+2)} = P_{i(i+3)} = \cdots = P_{iN} = 0 \end{aligned} \tag{4.72}$$

$$\begin{aligned} P_{NN} &= -k^2 G I_{P_N} - (\mu k^2 + 1)\left(C_{t_N} - \rho I_{P_N} \omega^2\right) \\ P_{(N-1)N} &= C_{t_{(N-1)}}(\mu k^2 + 1) \\ P_{N1} &= P_{N2} = P_{N(N-2)} \ldots = 0 \end{aligned} \tag{4.73}$$

Eşitlik (4.70) bir özdeğer problemidir ve katsayılar matrisinin determinantının "sıfır" olması gerekir. Determinant denklemi çözüldüğü takdirde $N$ adet nanotüp için $\omega$ burulma dalga yayılımı frekansı bulunur.

Dalgalar belirli frekans değerlerinde yayılıma başlar veya durur. Bu frekanslar kesme ve kaçma frekansları olarak tanımlanmaktadır. Her iki frekans da aşağıda

belirtilen limit şartları göz önüne alınarak çok duvarlı karbon nanotüp için belirlenmiştir.

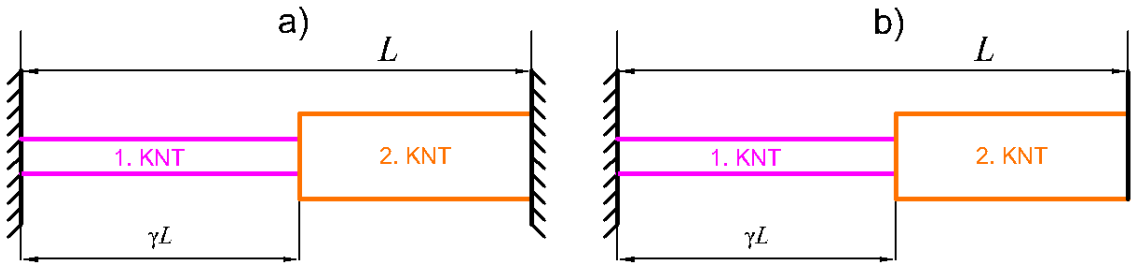
$$k \to 0 \quad , \quad \omega = \omega_{kesme}$$
$$k \to \infty \quad , \quad \omega = \omega_{kaçma} \tag{4.74}$$

Eşitlik (4.70)'ya göre N adet dalga yayılımı frekansı bulunur. Her bir frekans değeri için N adet genlik değeri bulunabilir. Ayrıca Eşitlik (4.70), homojen denklem sistemi olduğundan sonsuz sayıda genlik değeri belirlenebilmektedir. Eğer ilk nanotüpün genlik değeri "1" olarak kabul edilirse, diğer nanotüplerin genlik değerleri izafi olarak birinci nanotüpün genlik değerine göre belirlenebilir.

### 4.2.5. Basamak Kesitli Karbon Nanotüp Yapılarının Burulma Titreşimi

Basamak kesitli karbon nanotüp yapısı Şekil (4.8)'de görüldüğü üzere farklı çaplara sahip iki veya daha fazla karbon nanotüpün birleştirilmesiyle oluşur. Farklı çaplardaki karbon nanotüplerin torku farklı oranlarda iletmesi, nano boyuttaki dişli kutusu benzeri yapıların tasarımında bu tür yapılarından faydalanılabileceğini göstermektedir. Bölüm (3.3)'de elde edilen hareketin yönetici denklemini hatırlamak gerekirse**:**

$$G_i I_{P_i} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial x^2} = \rho_i I_{P_i} \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial t^2} - \mu \rho_i I_{P_i} \frac{\partial^4 \theta_i}{\partial x^2 \partial t^2} \tag{4.75}$$




Şekil 4.8 Basamak Kesitli Karbon Nanotüp Yapısı a)Ankastre-Ankastre b)Ankastre-Serbest Sınır Şartları

Burulma titreşimi için her bir nanotüpün açısal yer değiştirmesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\theta_i(\bar{x},t) = \psi_i(\bar{x})\, e^{j\omega t} \tag{4.76}$$

burada $\omega$ burulma titreşim frekansını, $\psi_i(\bar{x})$ ise açısal yer değiştirme için genlik fonksiyonunu ve $j^2$=-*1*'i ifade etmektedir. Eğer Eşitlik (4.75) zamana göre türevler ve boyutsuz nanotüp uzunluğu parametresine $\left(\bar{x} = \frac{x}{L}\right)$ göre yeniden düzenlenirse:

$$\frac{\partial^2 \theta_i}{\partial x^2} + {\beta_i}^2 \theta_i = 0 \tag{4.77}$$

$${\beta_i}^2 = \frac{{\Omega_i}^2}{1-\frac{\mu}{L^2}{\Omega_i}^2} \quad ve \quad {\Omega_i}^2 = \frac{\rho_i \omega^2 L^2}{G_i} \tag{4.78}$$

burada $\beta_i$ karakteristik parametreyi, $\Omega_i$ boyutsuz frekans parametresini(BFP) ifade etmektedir. Eşitlik (4.77)'deki diferansiyel denklemin çözümü 1. ve 2. karbon nanotüp için aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\psi_1(\bar{x}) = K_1 \cos(\beta_1 \bar{x}) + K_2 \sin(\beta_1 \bar{x}) \tag{4.79}$$

$$\psi_2(\bar{x}) = K_3 \cos(\beta_2 \bar{x}) + K_4 \sin(\beta_2 \bar{x}) \tag{4.80}$$

Ankastre-Ankastre sınır şartları:

$$\begin{aligned}
&\theta_1(0,t) = 0,\\
&\theta_1(\gamma,t) = \theta_2(\gamma,t),\\
&G_1 I_{P_1} \frac{\partial \theta_1(\gamma,t)}{\partial x} + \mu\rho_1 I_{P_1} \frac{\partial^3 \theta_1(\gamma,t)}{\partial x\, \partial t^2} = G_2 I_{P_2} \frac{\partial \theta_2(\gamma,t)}{\partial x} + \mu\rho_2 I_{P_2} \frac{\partial^3 \theta_2(\gamma,t)}{\partial x\, \partial t^2},\\
&\theta_2(1,t) = 0
\end{aligned} \tag{4.81}$$

Ankastre-Serbest sınır şartları:

$$\begin{aligned}
&\theta_1(0,t) = 0,\\
&\theta_1(\gamma,t) = \theta_2(\gamma,t),\\
&G_1 I_{P_1} \frac{\partial \theta_1(\gamma,t)}{\partial x} + \mu\rho_1 I_{P_1} \frac{\partial^3 \theta_1(\gamma,t)}{\partial x\, \partial t^2} = G_2 I_{P_2} \frac{\partial \theta_2(\gamma,t)}{\partial x} + \mu\rho_2 I_{P_2} \frac{\partial^3 \theta_2(\gamma,t)}{\partial x\, \partial t^2},\\
&G_2 I_{P_2} \frac{\partial \theta_2(1,t)}{\partial x} + \mu\rho_2 I_{P_2} \frac{\partial^3 \theta_2(1,t)}{\partial x\, \partial t^2} = 0
\end{aligned} \tag{4.82}$$

Görüldüğü üzere $\bar{x} = 0$'daki ankastre sınır şartından dolayı $K_1$ katsayısı sıfır olmaktadır ($K_1 = 0$). Ankastre-Ankastre ve Ankastre-Serbest sınır şartları matris formunda ifade edilirse:

$$\begin{bmatrix} CC_{11} & CC_{12} & CC_{13} \\ CC_{21} & CC_{22} & CC_{23} \\ CC_{31} & CC_{32} & CC_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{bmatrix} = 0 \tag{4.83}$$

burada

$$\begin{aligned} &CC_{11} = \sin(\beta_1\gamma)\ , \quad CC_{12} = -\cos(\beta_2\gamma)\ , \quad CC_{13} = -\sin(\beta_2\gamma)\ , \\ &CC_{21} = \beta_1\cos(\beta_1\gamma)\ , \quad CC_{22} = \beta_2\sin(\beta_2\gamma)\ , \quad CC_{23} = -\beta_2\cos(\beta_2\gamma)\ , \\ &CC_{31} = 0\ ,\ CC_{32} = \cos(\beta_2)\ ,\ CC_{33} = \sin(\beta_2)\ , \end{aligned} \tag{4.84}$$

ve Ankastre-Serbest sınır şartları:

$$\begin{bmatrix} CF_{11} & CF_{12} & CF_{13} \\ CF_{21} & CF_{22} & CF_{23} \\ CF_{31} & CF_{32} & CF_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{bmatrix} = 0 \tag{4.85}$$

burada

$$\begin{aligned} &CF_{11} = \sin(\beta_1\gamma)\ , \quad CF_{12} = -\cos(\beta_2\gamma)\ , \quad CF_{13} = -\sin(\beta_2\gamma)\ , \\ &CF_{21} = \beta_1\cos(\beta_1\gamma)\ , \quad CF_{22} = \beta_2\sin(\beta_2\gamma)\ , \quad CF_{23} = -\beta_2\cos(\beta_2\gamma)\ , \\ &CF_{31} = 0\ ,\ CF_{32} = -\beta_2\sin(\beta_2)\ ,\ CF_{33} = \beta_2\cos(\beta_2)\ , \end{aligned} \tag{4.86}$$

Aşikar çözümün olabilmesi için, Eşitlik (4.73) ve (4.85)'deki katsayı matrisleri determinantının sıfıra eşit olması gerekir. Determinant denklemleri karakteristik parametrelere $(\beta_1, \beta_2)$ göre çözülürse, boyutsuz frekans parametreleri Eşitlik (4.78) kullanılarak bulunabilir.

$K_2$, $K_3$ ve $K_4$ katsayıları her bir BFP için $K_2$ katsayısına göre bulunabilir. $K_2$ katsayısı "1" olarak kabul edilirse $K_3$ ve $K_4$ katsayıları da elde edilir. Daha sonra genlik oranları bu katsayılar kullanılarak bulunur.

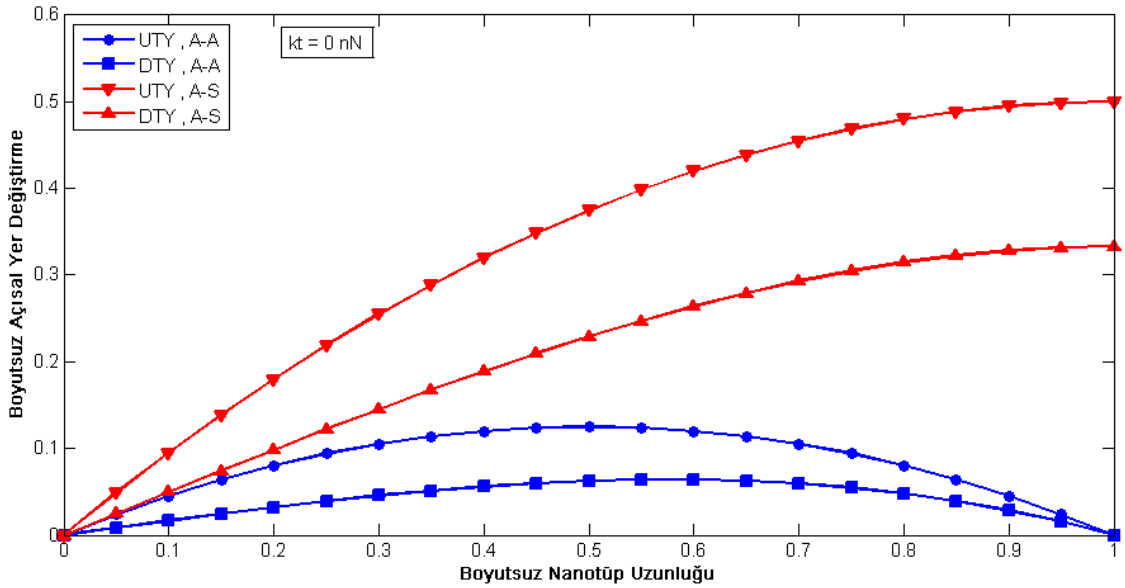
# BÖLÜM 5

# SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

## 5.1. Statik Analiz

### 5.1.1. Karbon Nanotüpün Elastik Ortam İçerisindeki Davranışı

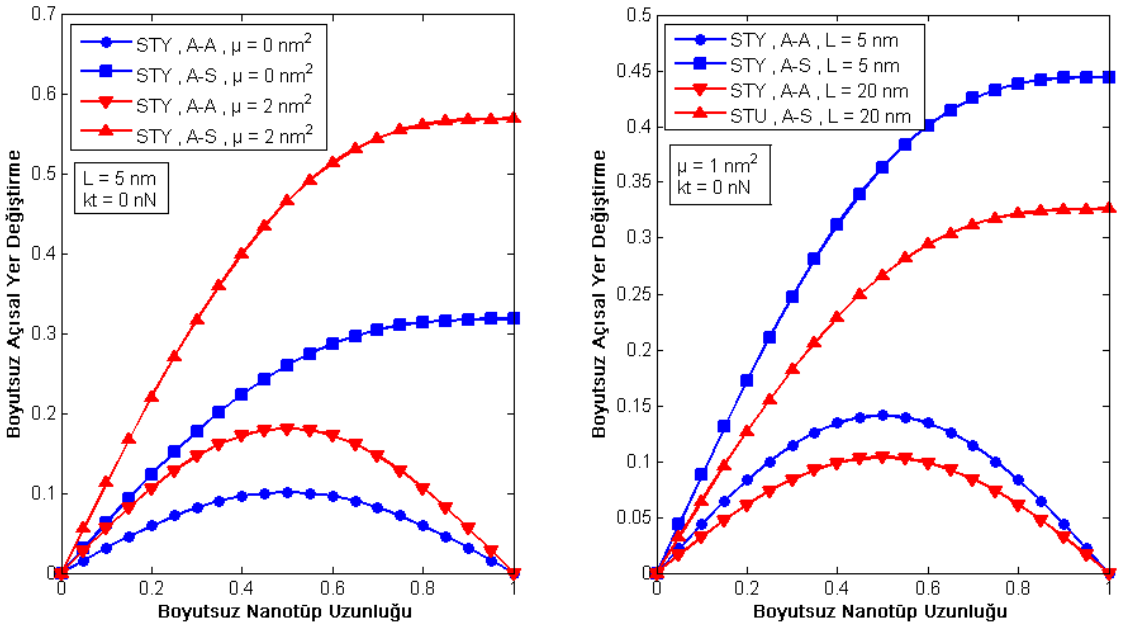
Boyutsuz açısal yer değiştirmenin denklemleri statik analiz kısmında elde edilmişti. Bu bölümde, boyusuz açısal yer değiştirmenin (BAYD) elastik ortamın sertliği, nanotüp boyu, yerel olmayan parametre ve nanotüp iç çapı ile değişimi incelenecektir. Uniform Tork Yükü (UTY), Doğrusal Tork Yükü (DTY) ve Sinüsodial Tork Yükü (STY) durumları göz önüne alınacaktır.




Şekil 5.1 BAYD'nin Nanotüp Boyunca Değişimi

Şekil (5.1)'de, elastik ortamın olmadığı UTY ve DTY durumu için BAYD'nin değişimi görülmektedir. Yerel ve yerel olmayan BAYD değerleri, Bölüm (4.1.1)'de belirtildiği üzere aynıdır. STY durumundaki BAYD değerleri DTY durumuna göre her iki sınır şartı için de daha yüksektir.

Şekil (5.2)'de, BAYD'nin farklı $L$, $\mu$ ve $k_t$=0 değerleri için değişimi görülmektedir. UTY ve DTY durumunun aksine STY durumunda yerel ve yerel olmayan BAYD değerleri birbirinden farklıdır (Bknz: Eşitlik (4.19)-(4.22)). Yerel olmayan BAYD değerleri yerel olmayan elastisiteden kaynaklanan yumuşama etkisi sebebiyle yerel sonuçlara göre daha yüksektir. BAYD değerleri daha kısa nanotüp uzunlukları için daha yüksektir.

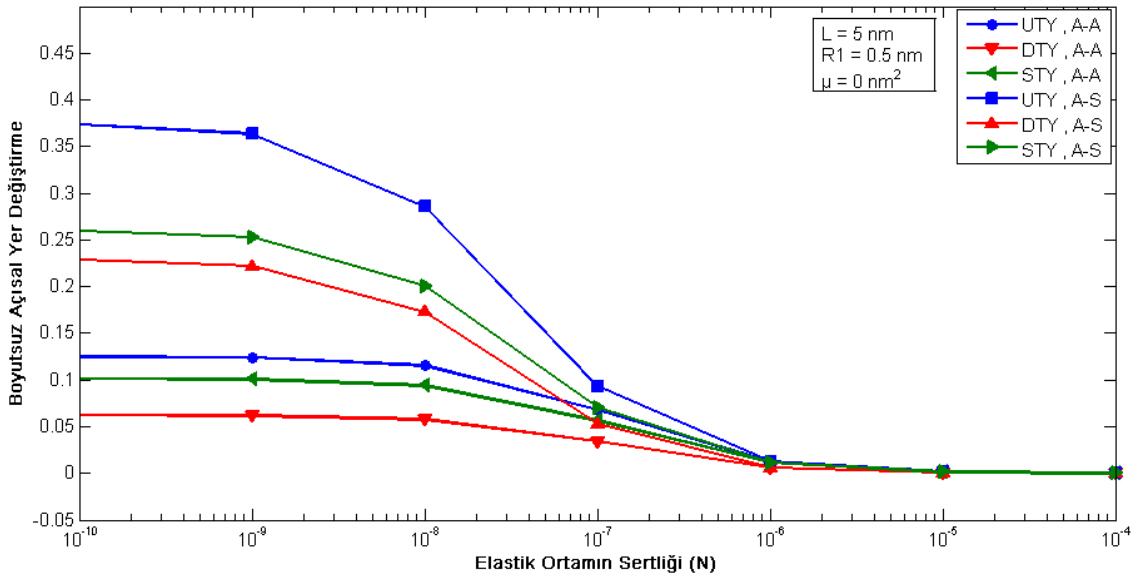



Şekil 5.2 BAYD'nin Farklı $\mu$ ve $L$ Değerlerinde Değişimi

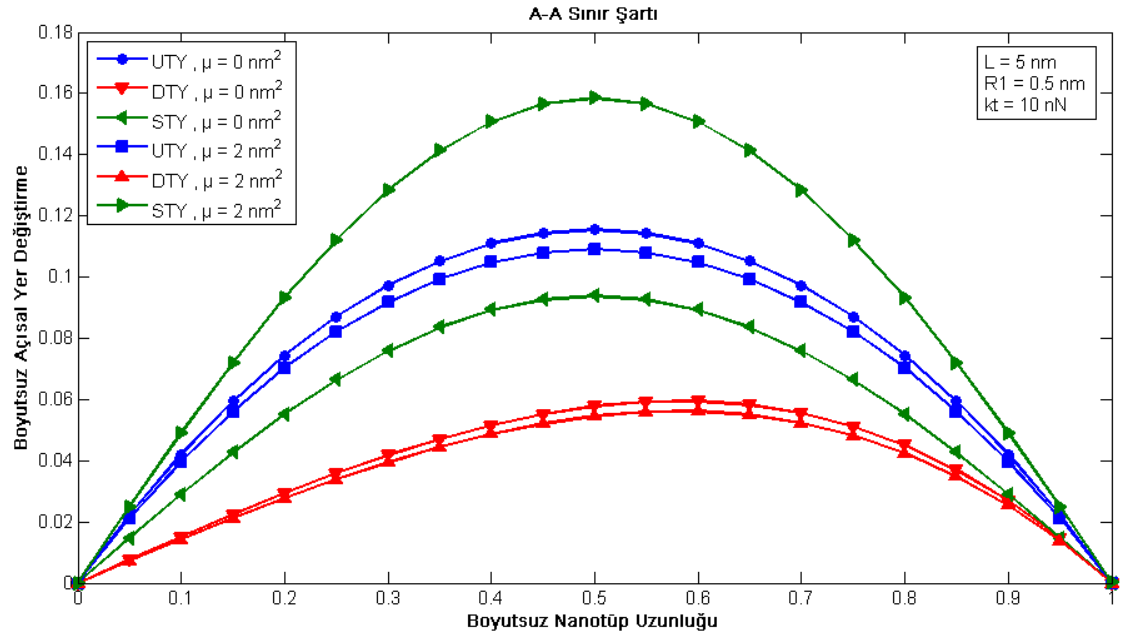
Şekil (5.3)'de elastik ortamın yerel teoriye göre BAYD'ye olan etkisi görülmektedir. Sertlik, $10^{-9}$-$10^{-6}$ N değerleri arasında etkisini göstermektedir. 1 nN'dan daha küçük değerler için hiçbir etki gözlenmemektedir. 1000 nN'dan daha büyük olduğunda ise elastik ortam nanotüpün burulma davranışını tamamıyla kısıtlamaktadır. BAYD, elastik ortamın olduğu durumda olmadığı duruma göre daha küçüktür.

Şekil (5.4) ve Şekil (5.5)'de BAYD'nin yerel olmayan parametre ile A-A ve A-S sınır şartları için görülmektedir. UTY ve DTY için yerel olmayan BAYD değerleri yerel

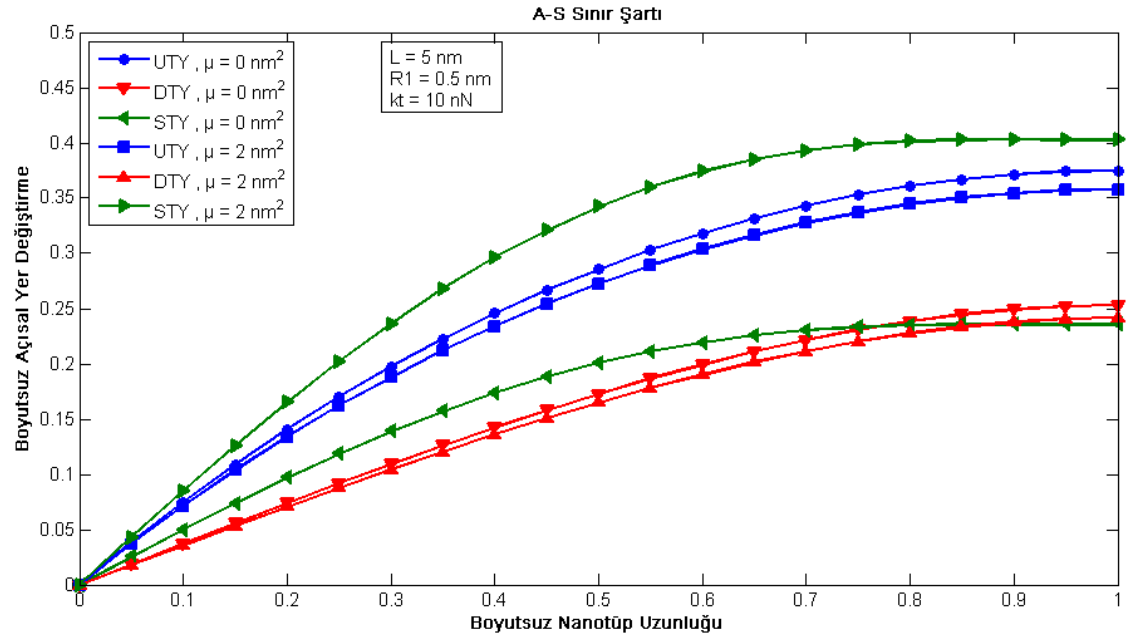
olanlardan daha küçüktür. Tam tersi durum ise STY için geçerlidir. Yerel ve yerel olmayan BAYD değerleri arasındaki en büyük fark STY altında gerçekleşmektedir.



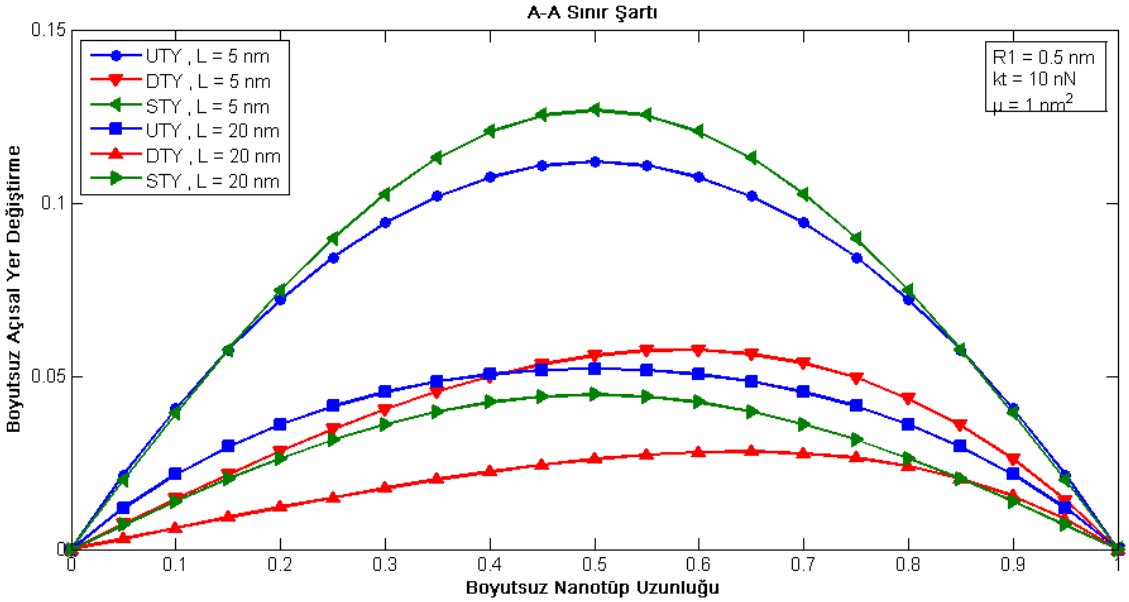

Şekil 5.3 BAYD'nin Elastik Ortamın Sertliği ile Değişimi



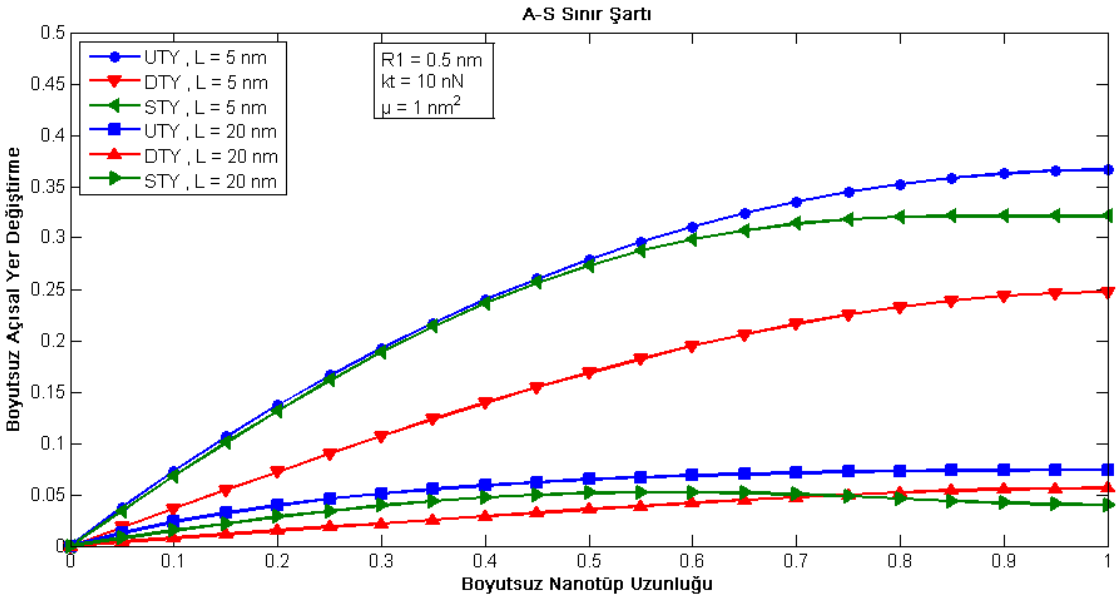

Şekil 5.4 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $\mu$ ile A-A Sınır Şartında Değişimi




Şekil 5.5 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $\mu$ ile A-S Sınır Şartında Değişimi

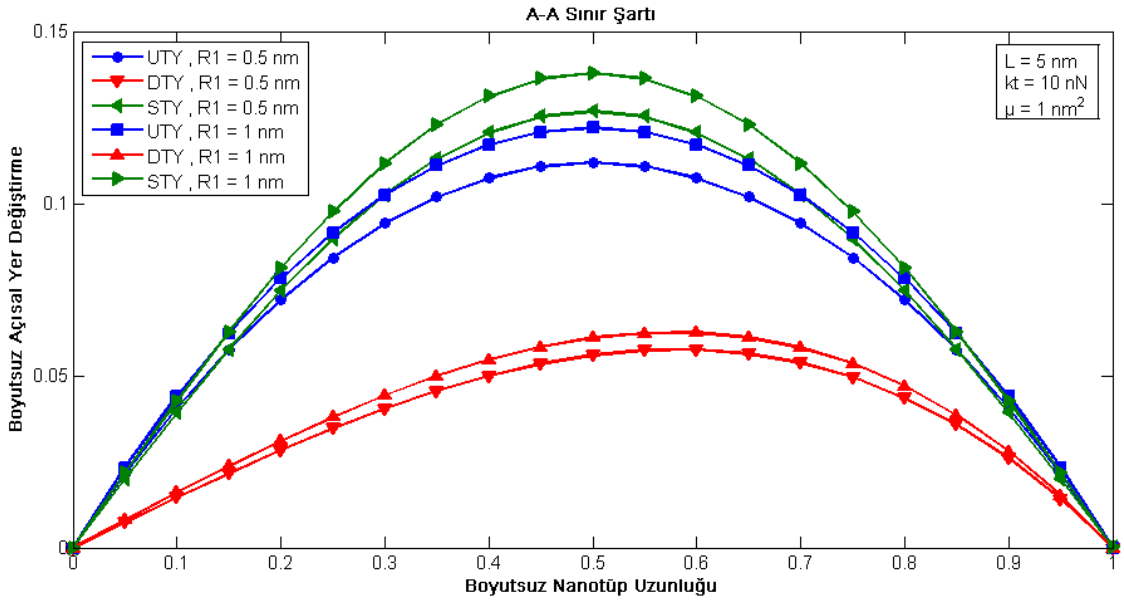



Şekil 5.6 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $L$ ile A-A Sınır Şartında Değişimi

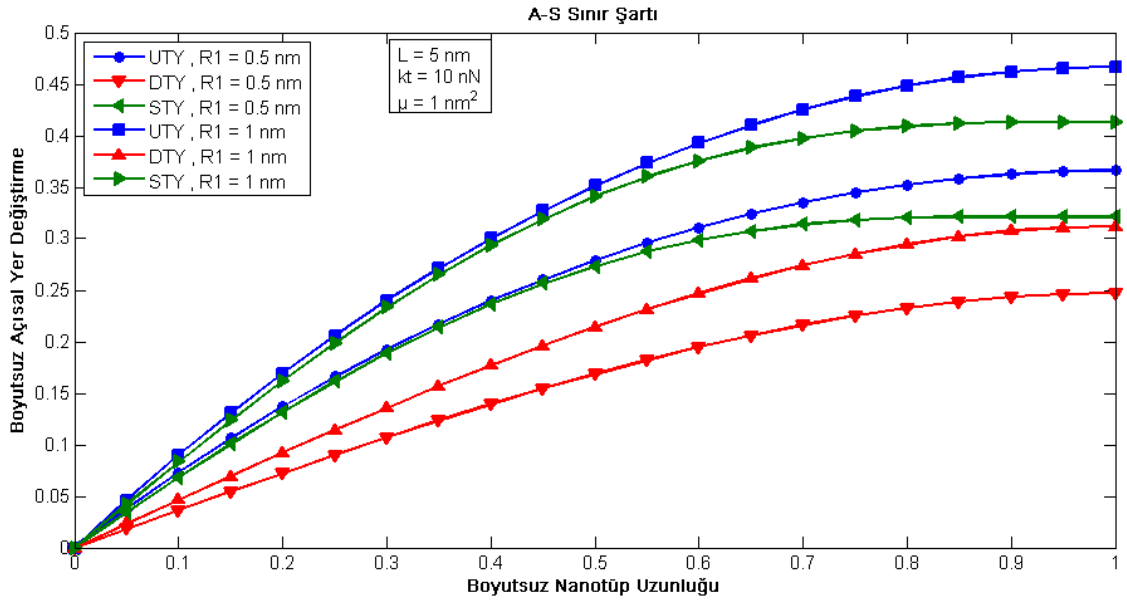



Şekil 5.7 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $L$ ile A-S Sınır Şartında Değişimi

Şekil (5.6) ve Şekil (5.7)'de nanotüp boyunun BAYD'ye olan etkisi A-A ve A-S sınır şartları için görülmektedir. BAYD, daha kısa nanotüp boylarında daha yüksek değerlerdedir. Buna sebep olan, elastik ortamın gösterdiği dirençtir.




Şekil 5.8 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $R_1$ ile A-A Sınır Şartında Değişimi




Şekil 5.9 BAYD'nin Nanotüp Uzunluğu Boyunca $R_1$ ile A-S Sınır Şartında Değişimi

Son olarak, Şekil (5.8) ve Şekil (5.9)'da BAYD'nin nanotüp iç çapı ile A-A ve A-S sınır şartları için değişimi görülmektedir. Nanotüp iç çapı büyüdükçe BAYD değerleri artmaktadır.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar genel olarak ele alınırsa:

- BAYD, UTY ve DTY durumlarında yerel ve yerel olmayan sonuçları aynıdır. Ancak elastik ortam yok iken STY altında yerel olmayan sonuçlar yerel olanlardan daha yüksektir
- Elastik ortam, yerel ve yerel olmayan BAYD değerlerini azaltmaktadır.
- BAYD, daha kısa boylarda ve daha büyük nanotüp iç yarıçap değerlerinde daha yüksektir.

## 5.2. Dinamik Analiz

### 5.2.1. Karbon Nanotüpün Elastik Ortam İçerisindeki Davranışı

Bu bölümde, daha önceden dinamik analizi yapılan karbon nanotüp Boyutsuz Frekans Parametresinin (BFP) elastik ortamın sertliği, mod sayısı, nanotüp boyu, yerel olmayan parametre ve nanotüp iç çapı ile değişimi incelenecektir.

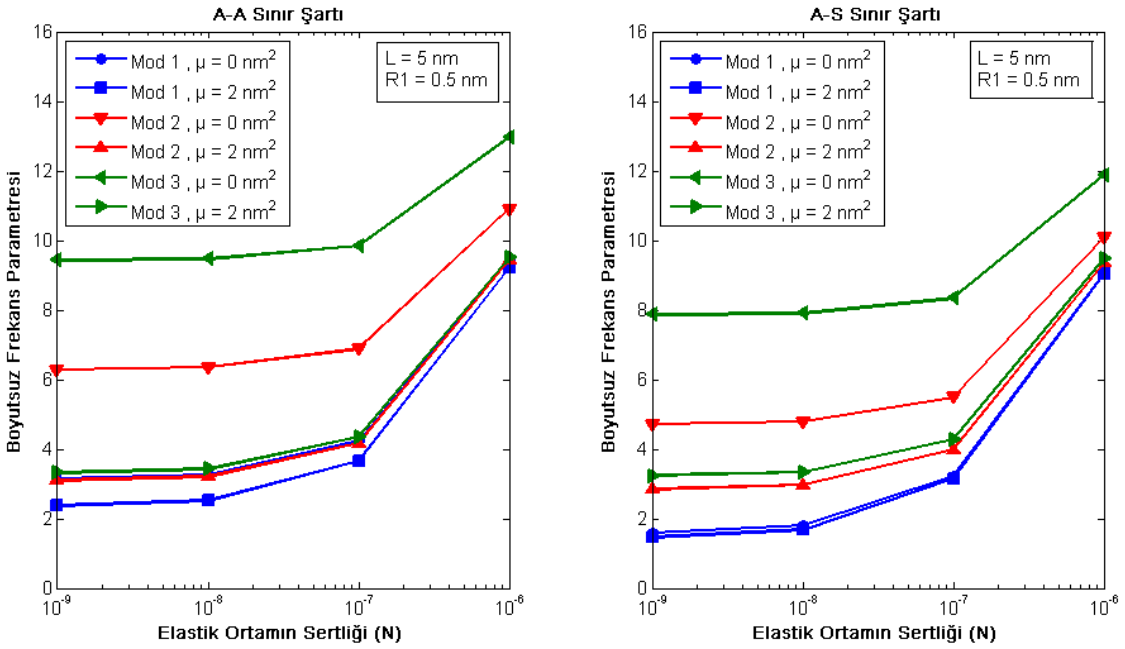
Şekil (5.10)'da BFP'nin elastik ortamın sertliği ve yerel olmayan parametre ile değişimi A-A ve A-S sınır şartları için görülmektedir. BFP, $10^{-8}$ ve $10^{-6}$ N sertlik

aralığında artmaktadır. Yerel olmayan etki, dalga boyunun kısalması sebebi ile yüksek modlarda daha etkin olmaktadır

Yerel olmayan etkiyi daha net görebilmek için frekans parametresi oranı (FPO) kullanılabilir:

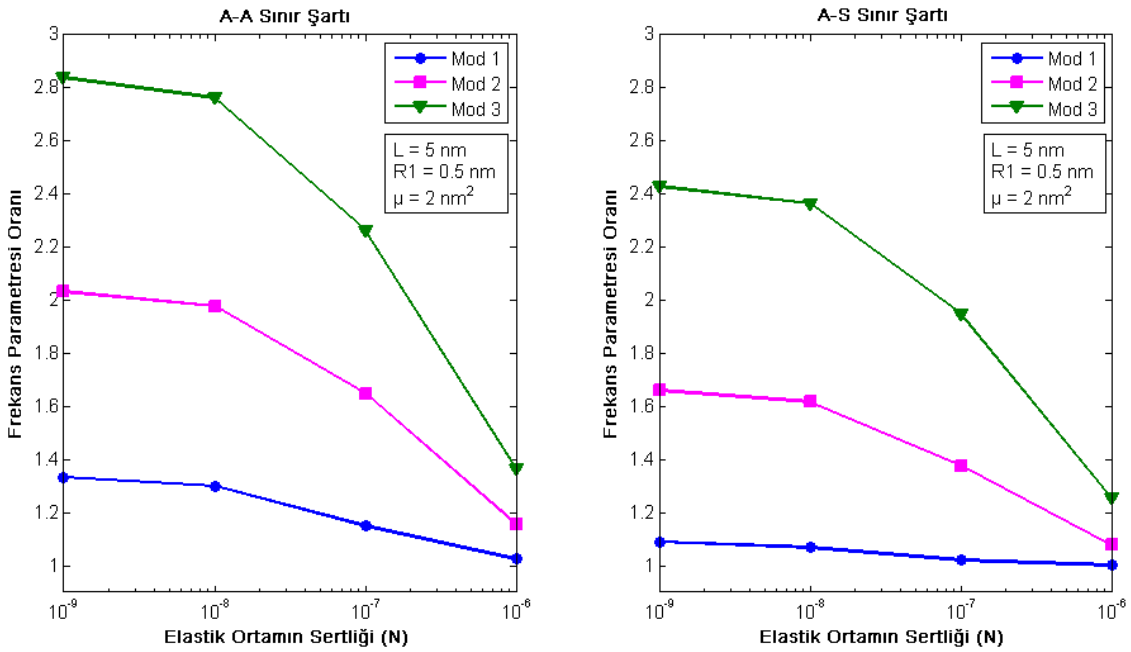
$$Frekans\ Oranı = \frac{Yerel\ Teori\ ile\ Hesaplanan\ Doğal\ Frekans}{Yerel\ Olmayan\ Teori\ ile\ Hesaplanan\ Doğal\ Frekans} \tag{5.1}$$

Şekil (5.11)'de FPO'nun elastik ortamın sertliği ve yerel olmayan parametre ile değişimi görülmektedir. Frekans oranı, sertliğin artması ile azalmaktadır. Bu azalma yüksek modlarda daha fazla görülmektedir.

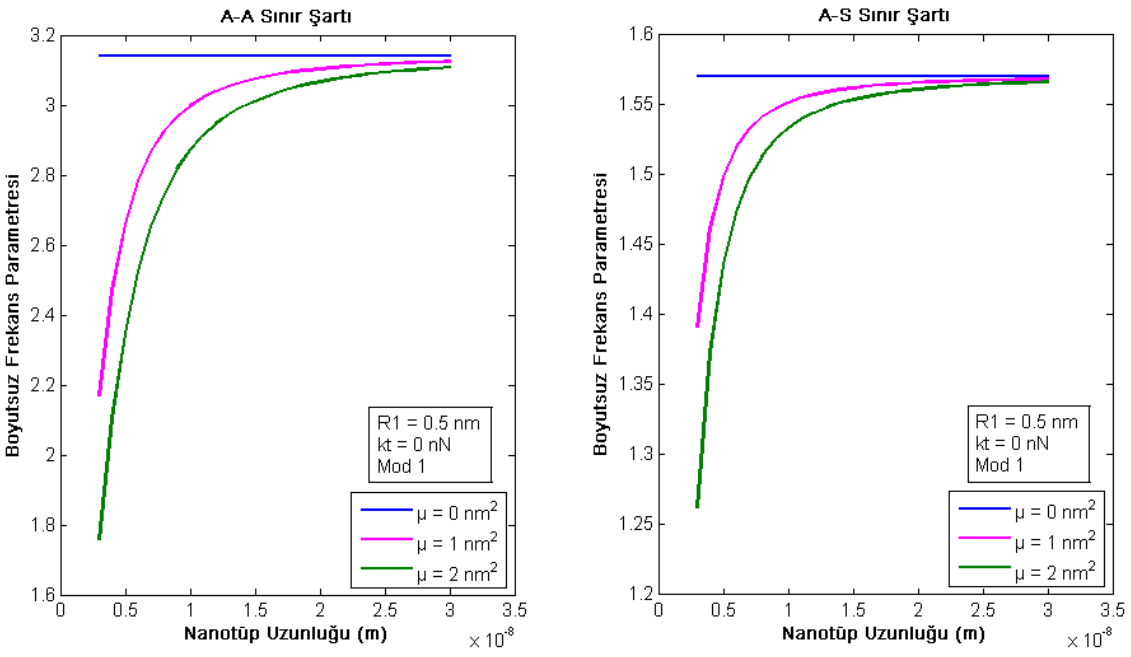



Şekil 5.10 BFP'nin Elastik Ortamın Sertliği ve $\mu$ ile Değişimi

Şekil (5.12)'de BFP'nin nanotüp uzunluğu ve yerel olmayan parametre ile değişimi görülmektedir. BFP, artan nanotüp boyu ile birlikte yerel frekans değerlerine yaklaşmaktadır. Belli bir değerden sonra yerel olmayan etki kaybolmaktadır.

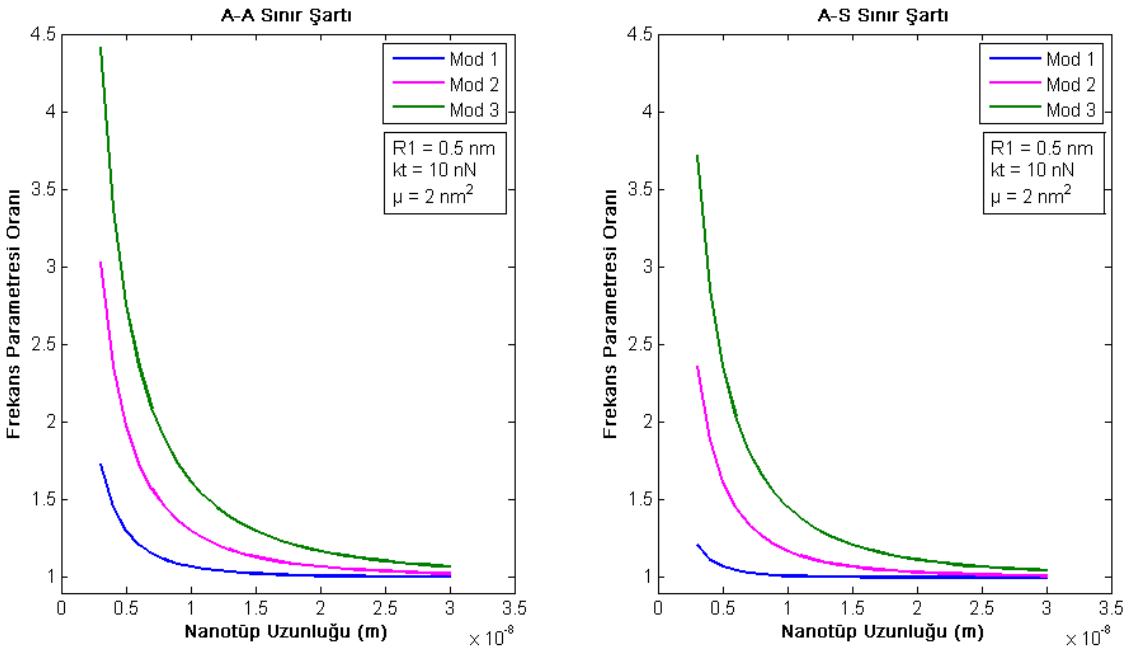



Şekil 5.11 FPO'nun Elastik Ortamın Sertliği ile Değişimi

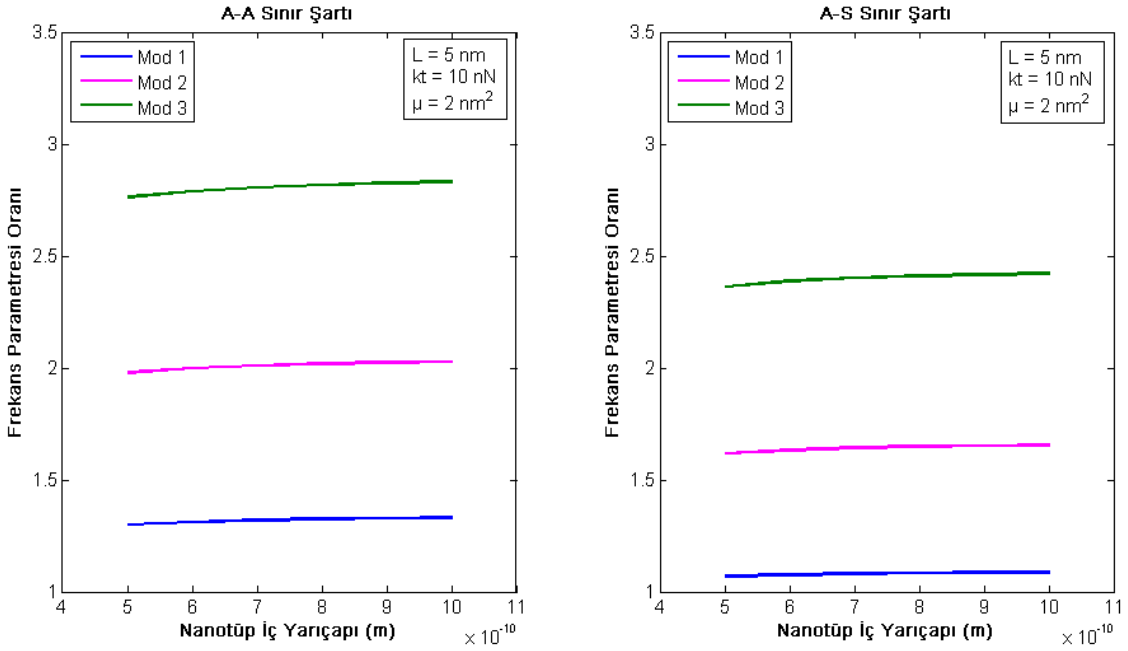



Şekil 5.12 BFP'nin Nanotüp Boyu ve $\mu$ ile Değişimi

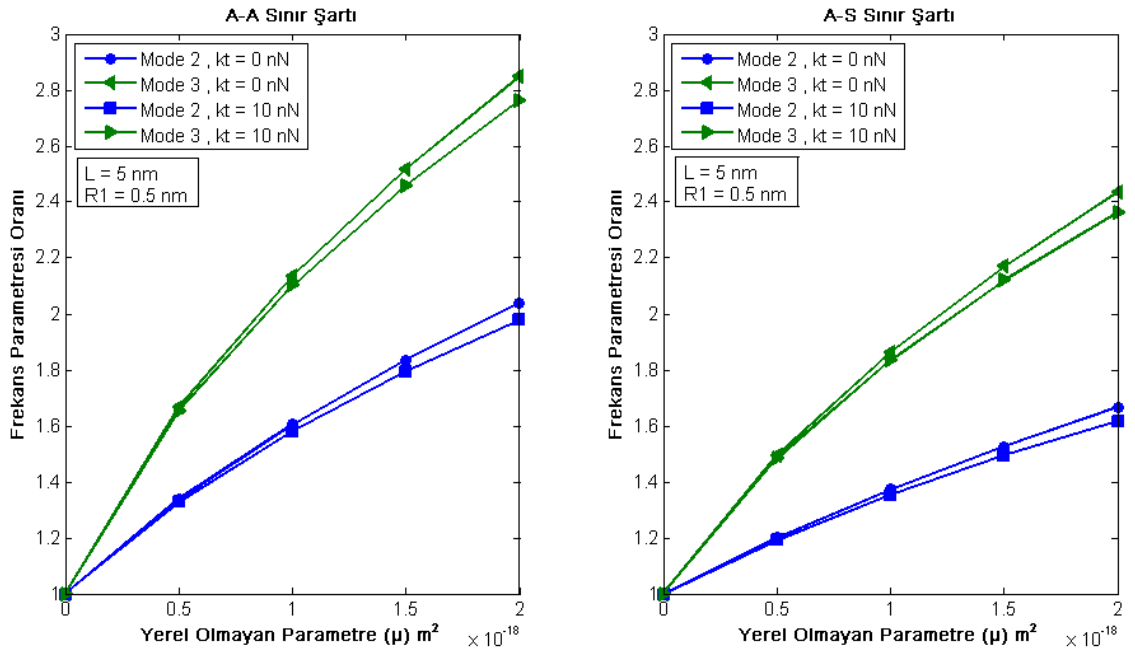
Şekil (5.13)'de FPO'nun nanotüp uzunluğu ve mod sayısı ile A-A ve A-S sınır şartları için değişimi görülmektedir. Şekil (5.12) ile benzer olarak FPO değeri belirli bir değere yaklaşmaktadır. Yüksek modlardaki yaklaşma daha geç olmaktadır.




Şekil 5.13 FPO'nun Nanotüp Boyu ile Değişimi




Şekil 5.14 FPO'nun Nanotüp İç Yarıçapı ile Değişimi




Şekil 5.15 FPO'nun Yeel Olmayan Parametre ($\mu$) ve Elastik Ortamın Sertliği ile Değişimi

Şekil (5.14)'de FPO'nın nanotüp iç çapı ve mod sayısı ile A-A ve A-S sınır şartları için değişimi görülmektedir. Bütün frekans oranları artan mod sayısı ile artmaktadır. Nanotüp iç yarıçapı ile olan değişimi çok az olmaklar birlikte artan karakterdedir.

Şekil (5.15)'de FPO'nun yerel olmayan parametre ile değişimi görülmektedir. Frekans parametresi oranı yerel olmayan parametrenin artmasıyla artmaktadır. Yerel olmayan etki elastik olmayan ortamda ve daha yüksek modlarda daha etkindir.

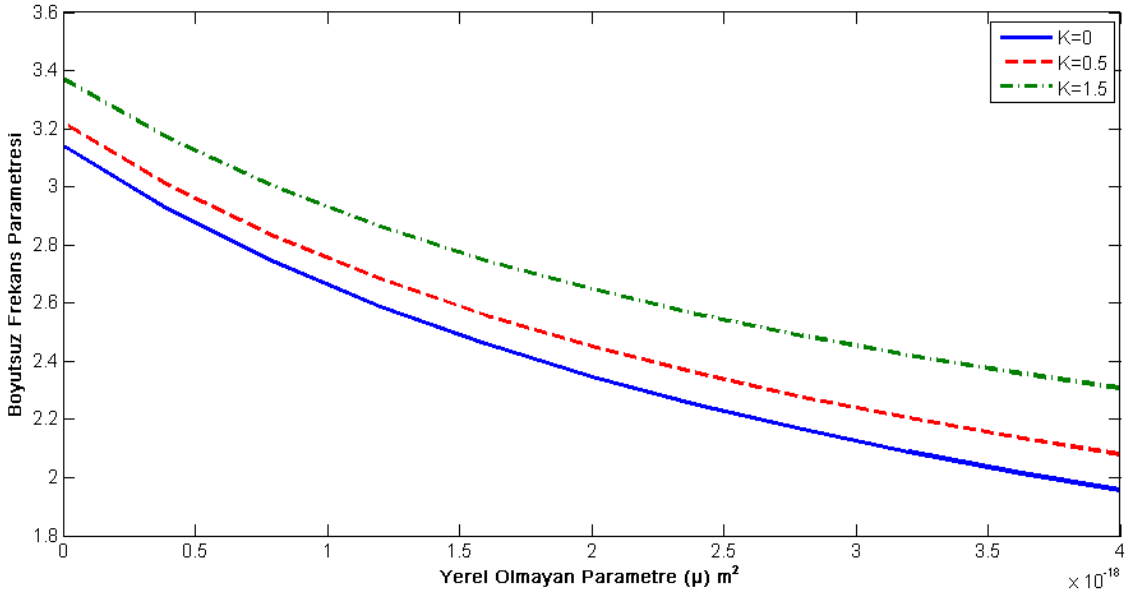
Yapılan çalışmada elde edilen sonuçları özetlemek gerekirse:

- BFP, elastik ortamın sertliğinin artması ile artmaktadır.
- Yerel ve yerel olmayan frekans değerleri artan elastik ortam sertliği ile azalmaktadır.
- FPO nerdeyse nanotüp iç yarıçapından etkilenmemektedir.
- FPO artan yerel olmayan parametre ile artmaktadır.

### 5.2.2. Karbon Nanotüpün Viskoelastik Ortam İçerisindeki Davranışı

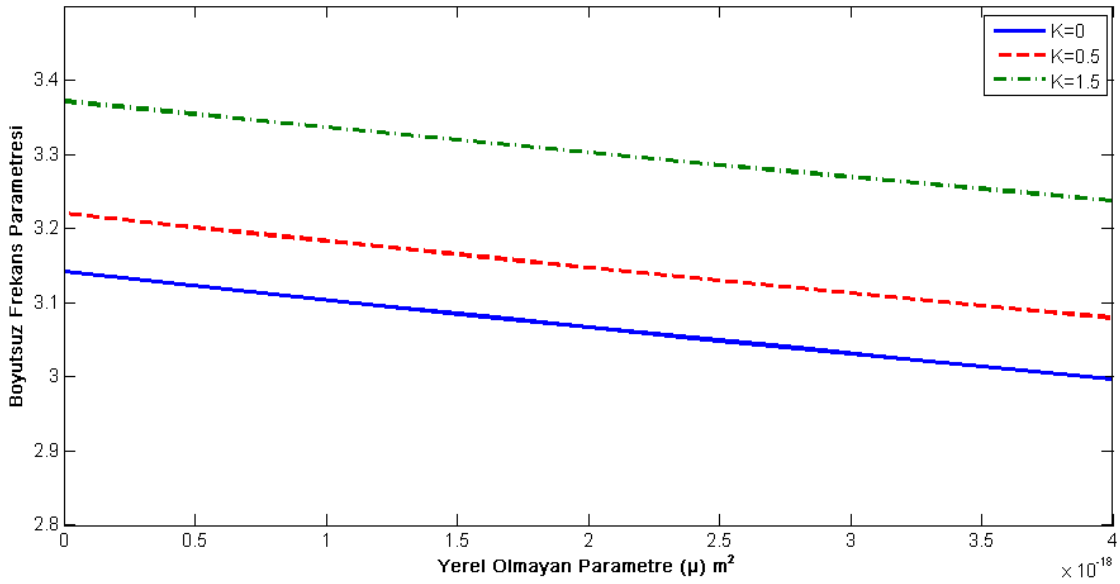
Bu bölümde viskoelastik ortam içerisindeki karbon nanotüp yapısının burulma titreşim frekansı farklı sönüm, sertlik, yerel olmayan parametre ve nanotüp uzunluk değerlerinde incelenmiştir.

Şekil (5.16)-(5.18)'de BFP'nin farklı sertlik parametreleri($\overline{K}$) ve nanotüp uzunluğu($L$) için yerel olmayan parametre ile değişimi görülmektedir. BFP artan yerel olmayan parametre azalmaktadır. Sertlik parametresinin artmasıyla BFP'de artmakta ve artan nanotüp uzunluğu yerel olmayan etkiyi azalmaktadır.

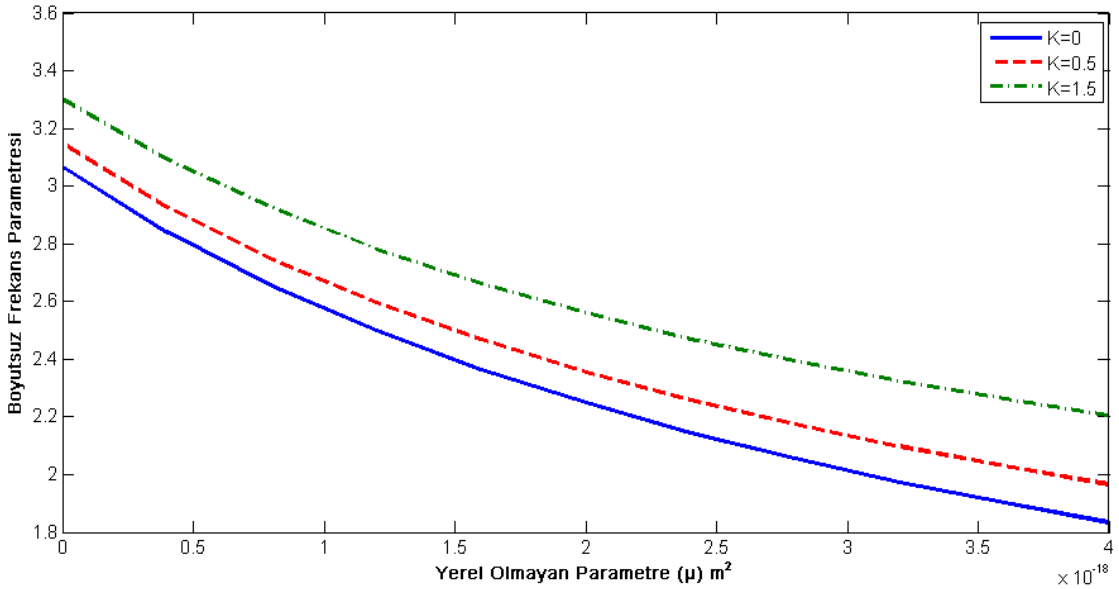



Şekil 5.16 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=5nm, $\bar{C} = 0$)

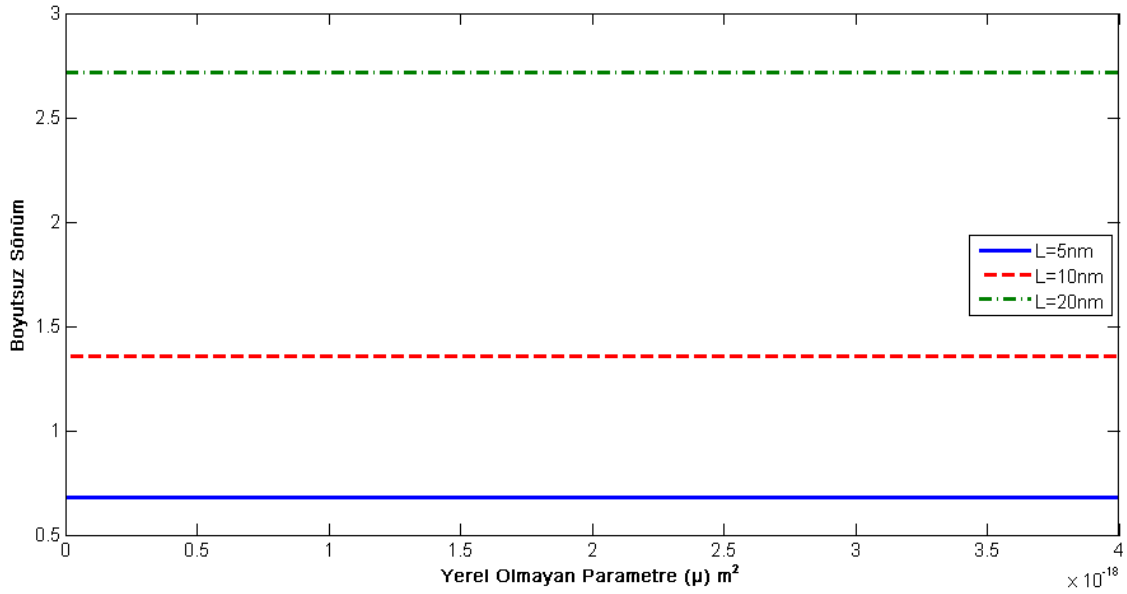
Şekil (5.19)'da BSP'nin yerel olmayan parametre ile değişimi görülmektedir. BSP yerel olmayan parametre ile değişmemekte, artan nanotüp uzunluğu ile artmaktadır. Şekil (5.20-5.21)'de frekans değerinin farklı boyutsuz sertlik ve sönüm parametreleri ve nanotüp uzunluğu($L$) ile değişimi görülmektedir. Frekans artan nanotüp uzunluğu ve boyutsuz sönüm ile azalmakta, artan boyutsuz sönüm ile artmaktadır.



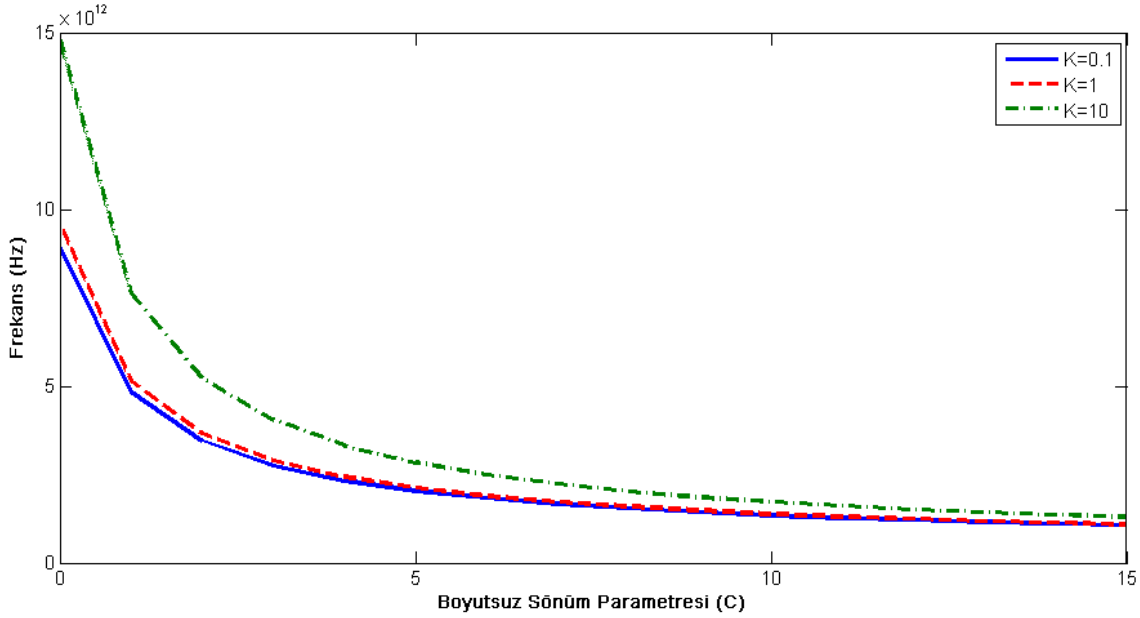

Şekil 5.17 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=20nm, $\bar{C} = 0$)



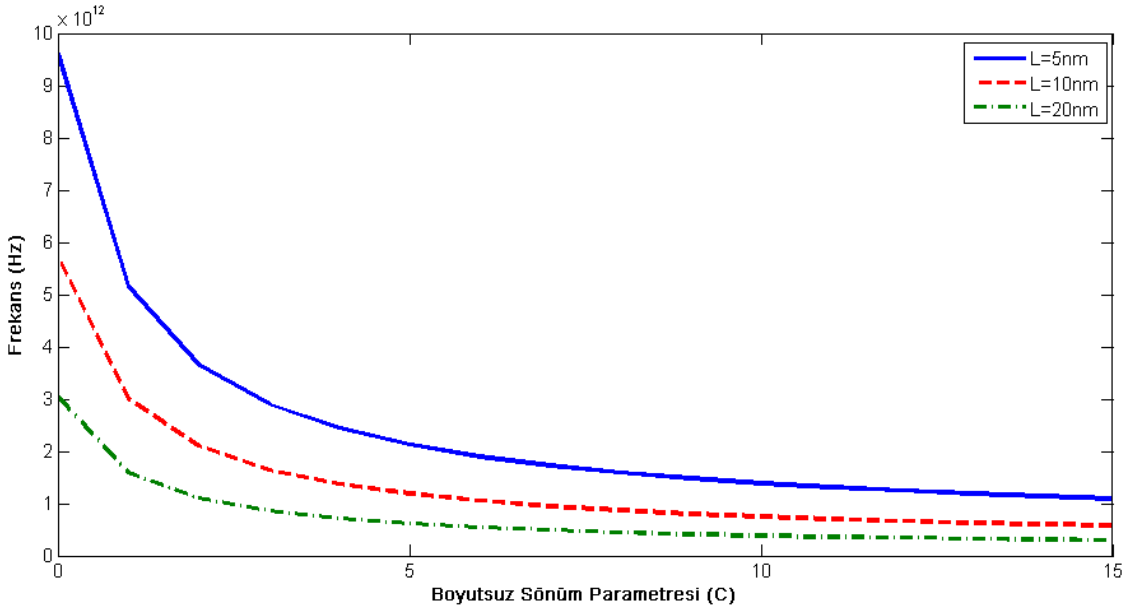

Şekil 5.18 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=5nm, $\bar{C} = 0.678$)




Şekil 5.19 Boyutsuz Sönümün Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($\overline{K} = 1$)




Şekil 5.20 Frekansın Boyutsuz Sönüm Parametresi ve Boyutsuz Sertlik Parametresi ile Değişimi ($\mu$=2nm$^2$ , $L$=5nm)




Şekil 5.21 Frekansın Boyutsuz Sönüm Parametresi ve Nanotüp Uzunluğu ile Değişimi ($\mu$=2nm$^2$ , $\bar{K} = 1$)

Burada karbon nanotüplerin viskoelasitk ortam içerisindeki serbest burulma titreşimi davranışı yerel olmayan elastisiste teorisi kullanılarak incelenmiştir. Frekans, artan yerel olmayan parametre, boyutsuz sönüm ve nanotüp uzunluğu ile azalmakta, artan sertlik parametresi ile artmaktadır.

### 5.2.3. Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Burulma Titreşimi

Çift duvarlı karbon nanotüpün doğal frekansları Eşitlik (4.59) ve (4.60)'daki boyutsuz frekans parametresi kullanılarak aşağıdaki gibi bulunur:

$$f_{im} = \frac{1}{2\pi 10^{12}}\sqrt{\frac{K_t\Omega^2}{M_t L^2}} \ (THz) \quad , \quad (i = 1,2) \tag{5.2}$$

Tablo (5.1)'de, çift duvarlı karbon nanotüp doğal frekanslarının nanotüp boyu ve yerel olmayan parametre ile değişimi görülmektedir. Her bir dalga sayısı için iki frekans değeri elde edilmiştir. Artan yerel olmayan parametre($\mu$) ve nanotüp boyu($L$) ile frekans değerleri azalmaktadır. Bu durumun en önemli sebebi artan yerel olmayan parametre ve nanotüp boyu ile sertliğin azalmasıdır.

Tablo 5.1 Çift Duvarlı Karbon Nanotüp İçin Doğal Frekanslar (THz) ($C_t$=0.0001$C_{vdW}$)

| Nanotüp Uzunluğu | | μ = 0 ($nm^2$) | μ = 0.5 ($nm^2$) | μ = 1 ($nm^2$) | μ = 1.5 ($nm^2$) | μ = 2 ($nm^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 nm | $f_{11}$ | 1.061 | 1.015 | 0.977 | 0.945 | 0.918 |
| | $f_{12}$ | 1.068 | 1.022 | 0.985 | 0.955 | 0.928 |
| | $f_{21}$ | 1.501 | 1.298 | 1.184 | 1.108 | 1.051 |
| | $f_{22}$ | 1.503 | 1.302 | 1.189 | 1.114 | 1.058 |
| 10 nm | $f_{11}$ | 0.531 | 0.524 | 0.518 | 0.513 | 0.507 |
| | $f_{12}$ | 0.544 | 0.538 | 0.533 | 0.527 | 0.522 |
| | $f_{21}$ | 0.751 | 0.717 | 0.691 | 0.668 | 0.649 |
| | $f_{22}$ | 0.755 | 0.723 | 0.697 | 0.675 | 0.656 |
| 20 nm | $f_{11}$ | 0.265 | 0.265 | 0.264 | 0.263 | 0.262 |
| | $f_{12}$ | 0.289 | 0.289 | 0.288 | 0.288 | 0.287 |
| | $f_{21}$ | 0.375 | 0.371 | 0.367 | 0.363 | 0.359 |
| | $f_{22}$ | 0.385 | 0.380 | 0.377 | 0.373 | 0.369 |
| 30 nm | $f_{11}$ | 0.177 | 0.177 | 0.176 | 0.176 | 0.176 |
| | $f_{12}$ | 0.209 | 0.209 | 0.208 | 0.208 | 0.208 |
| | $f_{21}$ | 0.250 | 0.249 | 0.248 | 0.246 | 0.245 |
| | $f_{22}$ | 0.264 | 0.263 | 0.261 | 0.260 | 0.259 |
| 50 nm | $f_{11}$ | 0.106 | 0.106 | 0.106 | 0.106 | 0.106 |
| | $f_{12}$ | 0.146 | 0.146 | 0.146 | 0.146 | 0.146 |
| | $f_{21}$ | 0.150 | 0.150 | 0.150 | 0.149 | 0.149 |
| | $f_{22}$ | 0.170 | 0.170 | 0.170 | 0.170 | 0.169 |

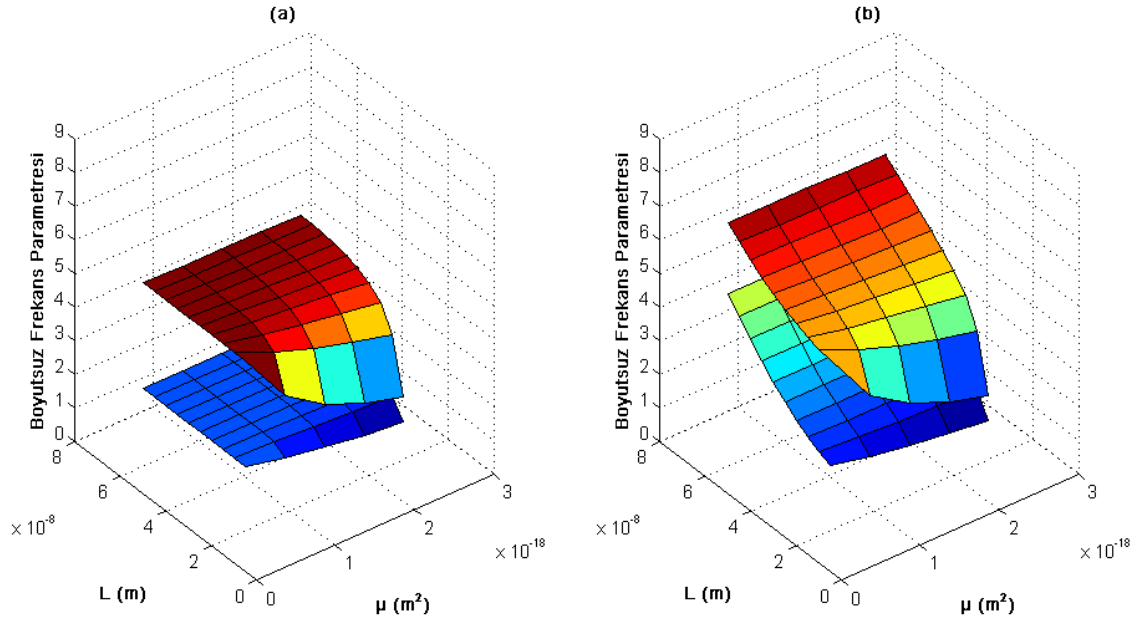
Tablo (5.1)'de, çift duvarlı karbon nanotüp doğal frekanslarının van der Waals etkileşim katsayısı ve yerel olmayan parametre ile değişimi görülmektedir. Tüm frekans değerleri artan yerel olmayan parametre($\mu$) ile azalmaktadır. $f_{1m}$ ve $f_{2m}$ *değerleri* $C_t$ değeri sıfıra yaklaştıkça birbirlerine yaklaşmaktadırlar. Küçük rezonans frekansı, van der Waals etkileşiminden fazla etkilenmezken büyük rezonans frekansı artan vdW katsayısı ile birlikte artmaktadır. Dikkat çekici bir durum olarak $C_t$ değeri $10^{-2}C_{vdW}$ değerinden küçük olduğu takdirde frekans sıralaması $f_{11}<f_{12}<f_{21}<f_{22}$ şeklinde iken $10^{-}$

$^2C_{vdW}$ değerinden büyük olduğu durumda sıralama $f_{11}< f_{21}< f_{12}< f_{22}$ şeklinde olmaktadır. Mod değişimleri Tablo (5.2)'de "*" ile belirtilmiştir.

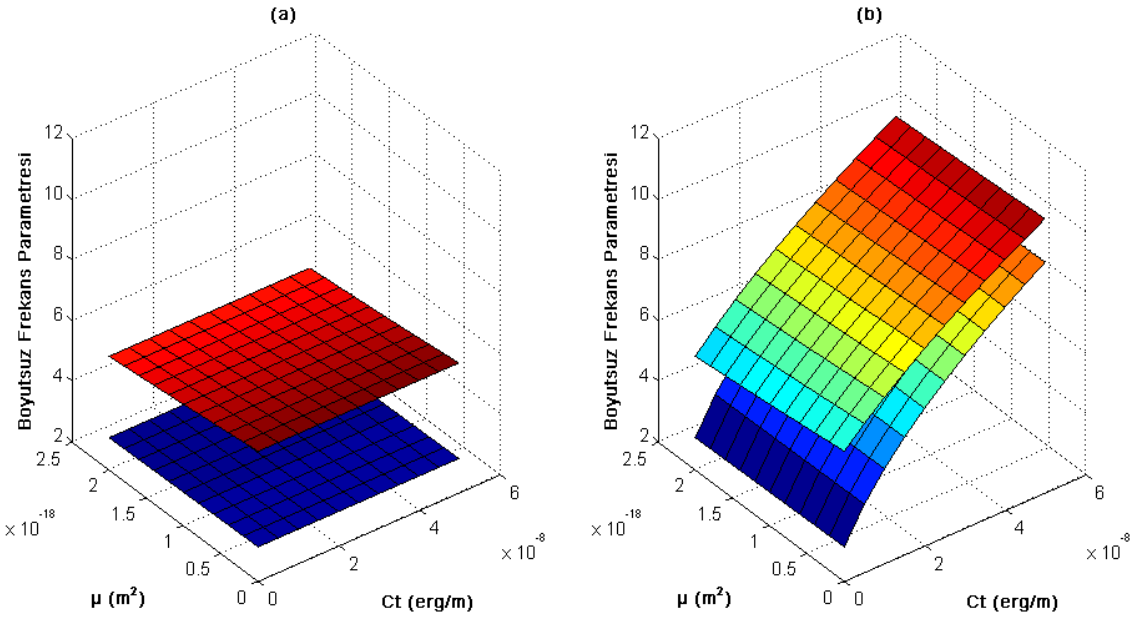
Tablo 5.2 Çift Duvarlı Karbon Nanotüp İçin Doğal Frekanslar (THz) ($L$=10nm)

| van der Waals Etkileşimi | | μ = 0 ($nm^2$) | μ = 0.5 ($nm^2$) | μ = 1 ($nm^2$) | μ = 1.5 ($nm^2$) | μ = 2 ($nm^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.0001 $C_{vdW}$ | $f_{11}$ | 0.531 | 0.524 | 0.518 | 0.513 | 0.507 |
| | $f_{12}$ | 0.544 | 0.538 | 0.533 | 0.527 | 0.522 |
| | $f_{21}$ | 0.751 | 0.717 | 0.691 | 0.668 | 0.649 |
| | $f_{22}$ | 0.755 | 0.723 | 0.697 | 0.675 | 0.656 |
| 0.001 $C_{vdW}$ | $f_{11}$ | 0.531 | 0.524 | 0.518 | 0.513 | 0.507 |
| | $f_{12}$ | 0.634 | 0.631 | 0.627 | 0.624 | 0.621 |
| | $f_{21}$ | 0.751 | 0.717 | 0.691 | 0.668 | 0.649 |
| | $f_{22}$ | 0.795 | 0.768 | 0.746 | 0.729 | 0.714 |
| 0.01 $C_{vdW}$ | $f_{11}$ | 0.531 | 0.524 | 0.518 | 0.513 | 0.507 |
| | $f_{12}$ | 0.975* | 0.974* | 0.973* | 0.972* | 0.972* |
| | $f_{21}$ | 0.751* | 0.717* | 0.691* | 0.668* | 0.649* |
| | $f_{22}$ | 1.034 | 1.022 | 1.013 | 1.006 | 1.001 |
| 0.1 $C_{vdW}$ | $f_{11}$ | 0.531 | 0.524 | 0.518 | 0.513 | 0.507 |
| | $f_{12}$ | 1.699* | 1.699* | 1.698* | 1.698* | 1.698* |
| | $f_{21}$ | 0.751* | 0.717* | 0.691* | 0.668* | 0.649* |
| | $f_{22}$ | 1.711 | 1.708 | 1.706 | 1.705 | 1.704 |

Şekil (5.22)'de, BFP'nin nanotüp boyu ve yerel olmayan parametre ile değişimi görülmektedir. Her bir dalga sayısı için iki frekans bulunmuştur. Küçük rezonans frekansları Şekil (5.22a)'da, büyük rezonans frekansları Şekil (5.22b)'de görülmektedir. BFP, büyük rezonans frekansında artan nanotüp uzunluğu ile artmaktadır. Nanotüp boyunun küçük rezonans frekansı üzerinde oldukça küçük bir etkisi vardır ancak yerel olmayan parametre sadece kısa nanotüp uzunluklarında etkin olmaktadır. Küçük rezonans frekansı artan nanotüp boyu ile belli bir değere yaklaşmaktayken büyük rezonans frekansı artış göstermektedir.



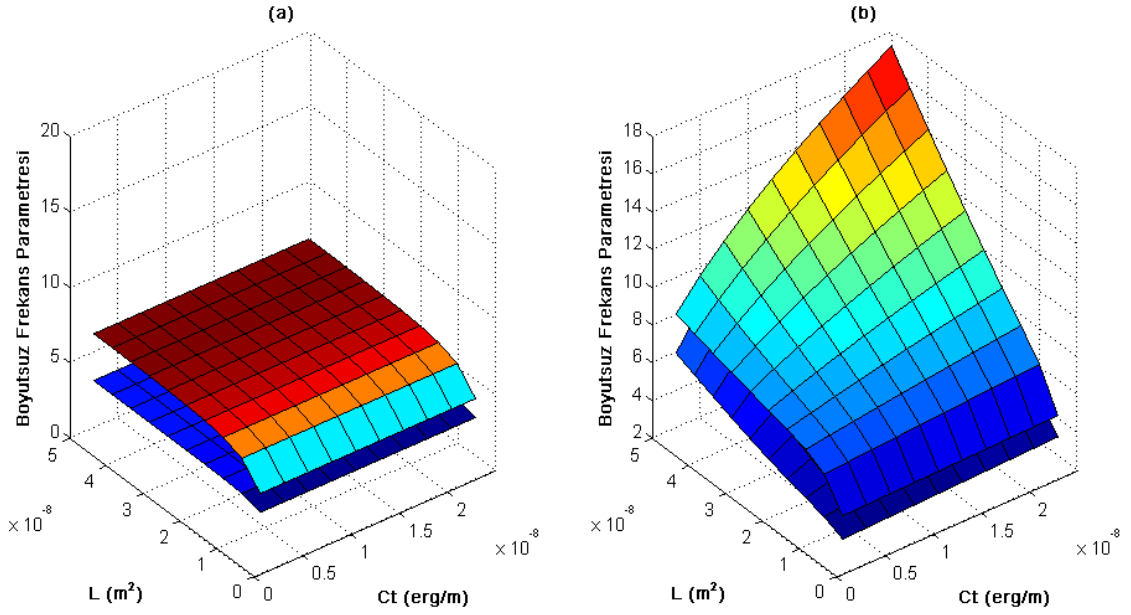

Şekil 5.22 (a) Küçük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu (b) Büyük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu ($C_t$=0.0001$C_{vdW}$)




Şekil 5.23 (a) Küçük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu (b) Büyük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu ($L$=20 nm)

Şekil (5.23)'de BFP'nin yerel olmayan parametre ve van der Waals etkileşim katsayısı ile değişimi görülmektedir. BFP, büyük rezonans frekansında artan van der

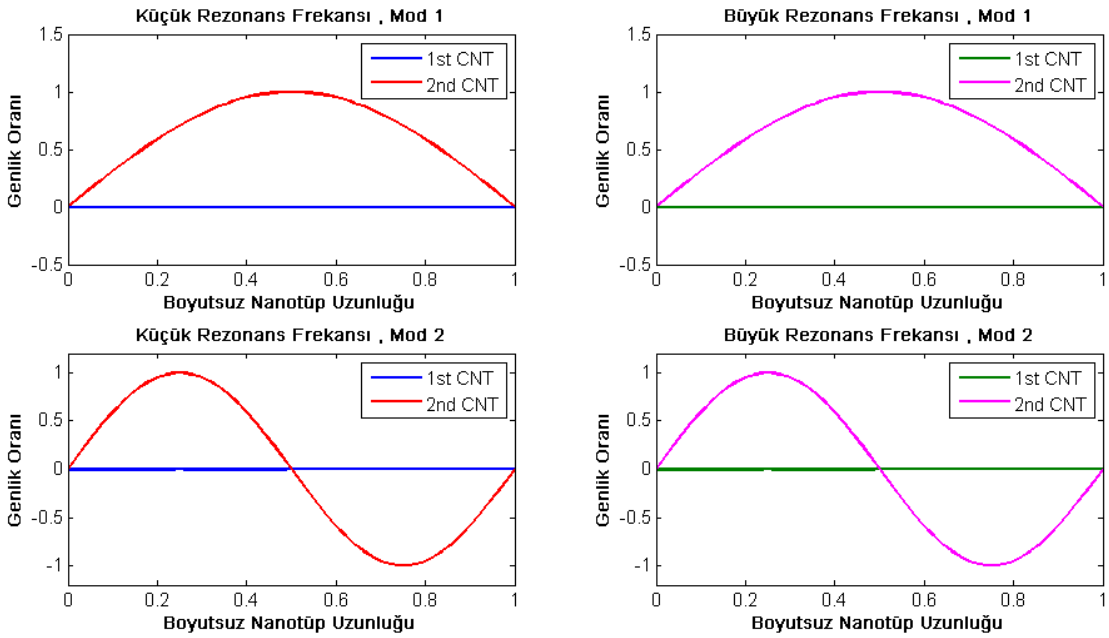
Waals etkileşim katsayısı ile artmaktadır. Yerel olmayan parametrenin etkisi ikinci modda birinci moda göre daha belirgindir.



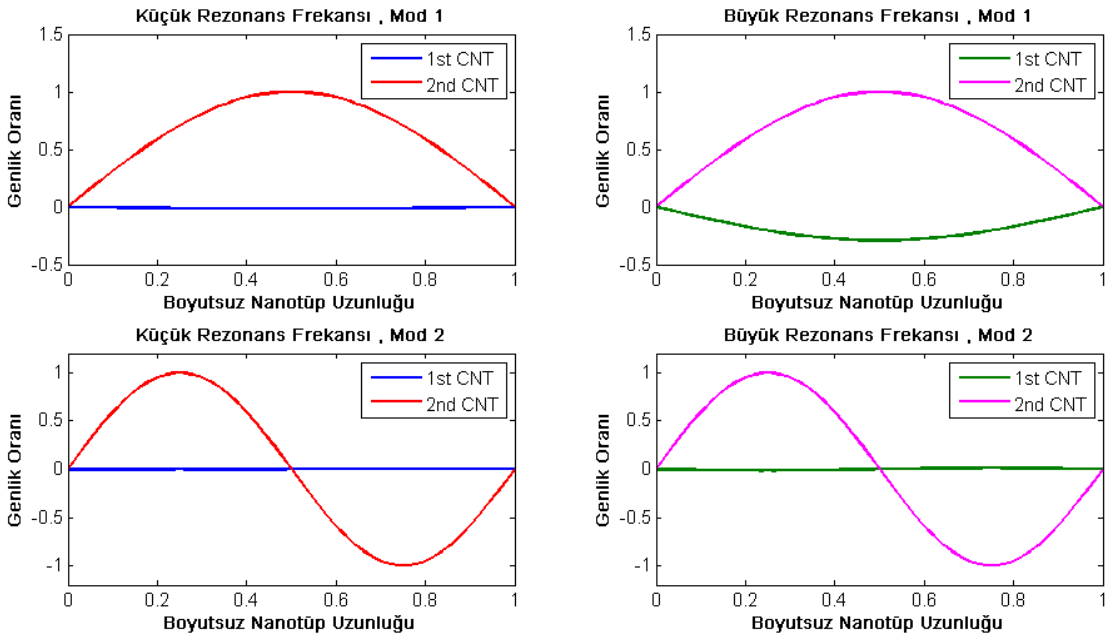

Şekil 5.24 (a) Küçük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu (b) Büyük Rezonans Frekansının Birinci ve İkinci Modu ($\mu$=1 nm$^2$)

Şekil (5.24)'de BFP'nin nanotüp uzunluğu ve van der Waals etkileşim katsayısı ile değişimi görülmektedir. BFP, büyük rezonans frekansında artan nanotüp uzunluğu ile artmaktadır. Ayrıca van der Waals etkileşim katsayısı daha uzun nanotüplerde daha etkin olmaktadır. Küçük rezonans frekansı kısa nanotüp uzunluklarında değişim göstermektedir.

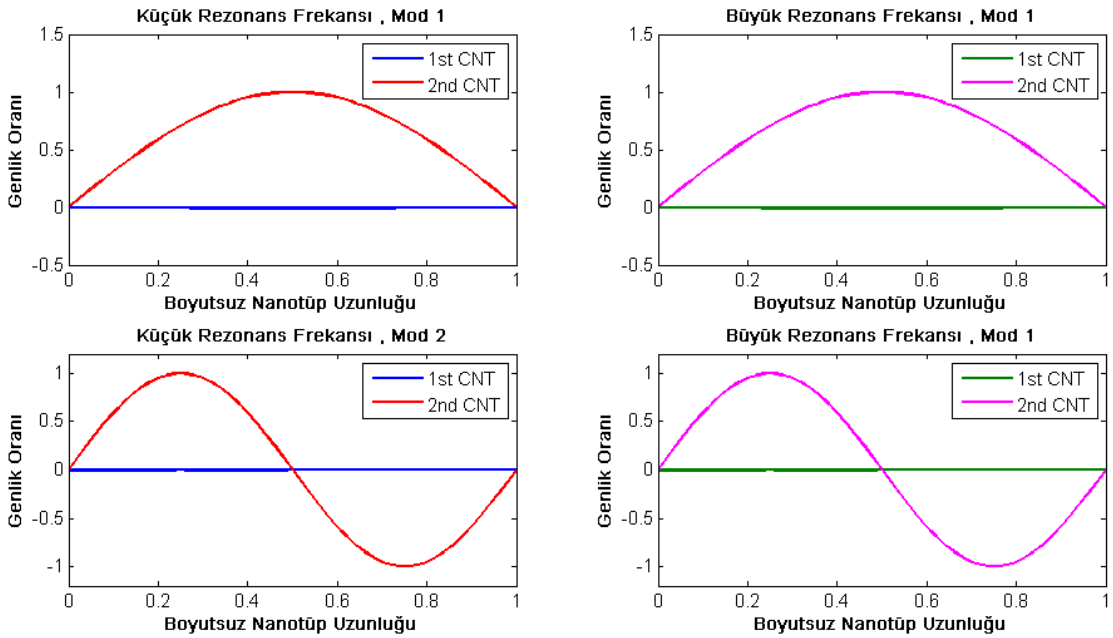
Şekil (5.25-5.29)'da çift duvarlı karbon nanotüpün mod şekilleri görülmektedir. Küçük rezonans frekansındaki mod şekilleri nanotüp boyu, yerel olmayan parametre ve van der Waals etkileşim katsayısı değişiminden çok az etkilenmektedir. Ancak büyük rezonans frekansındaki mod şekilleri nanotüp uzunluğu ve van der Waals etkileşim katsayısı tarafından büyük ölçüde etkilenmektedir. Açısal yer değiştirme artan nanotüp boyu ile artmaktadır. Görece küçük van der Waals etkileşim katsayısı değerlerinde iç ve dış nanotüpler zıt yönde dönmektedir. Etkileşim katsayısının kritik değerinden daha büyük değerlerde iç ve dış nanotüpler aynı yönde dönmektedir.



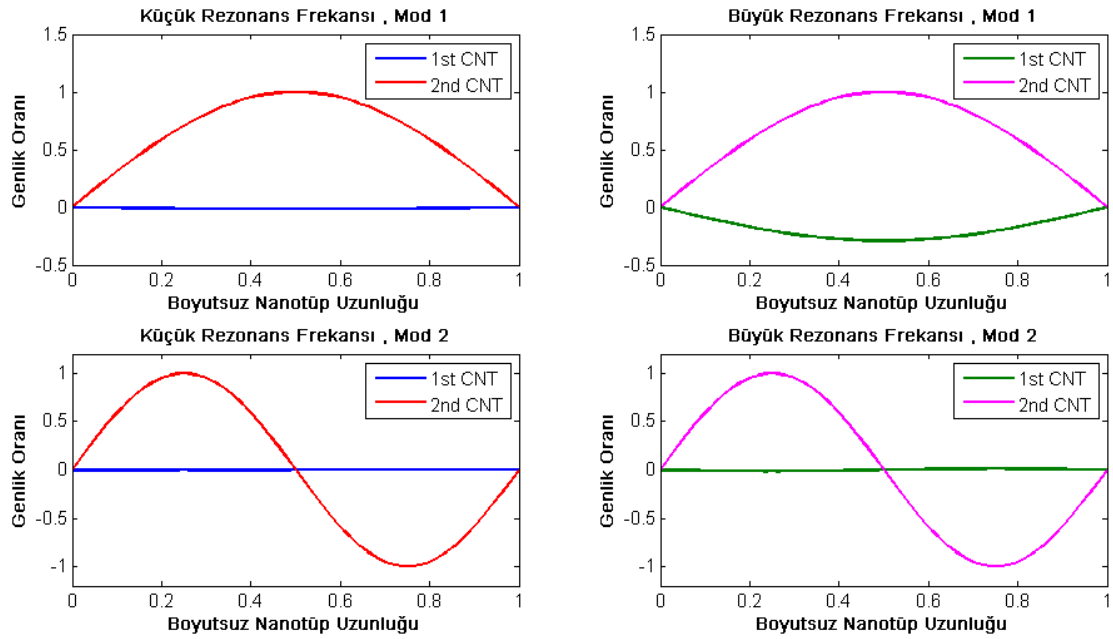

Şekil 5.25 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpün Mod Şekilleri ($L$=5 nm, $\mu$=0 nm$^2$, $C_t$=0.0001$C_{vdW}$ erg/m)



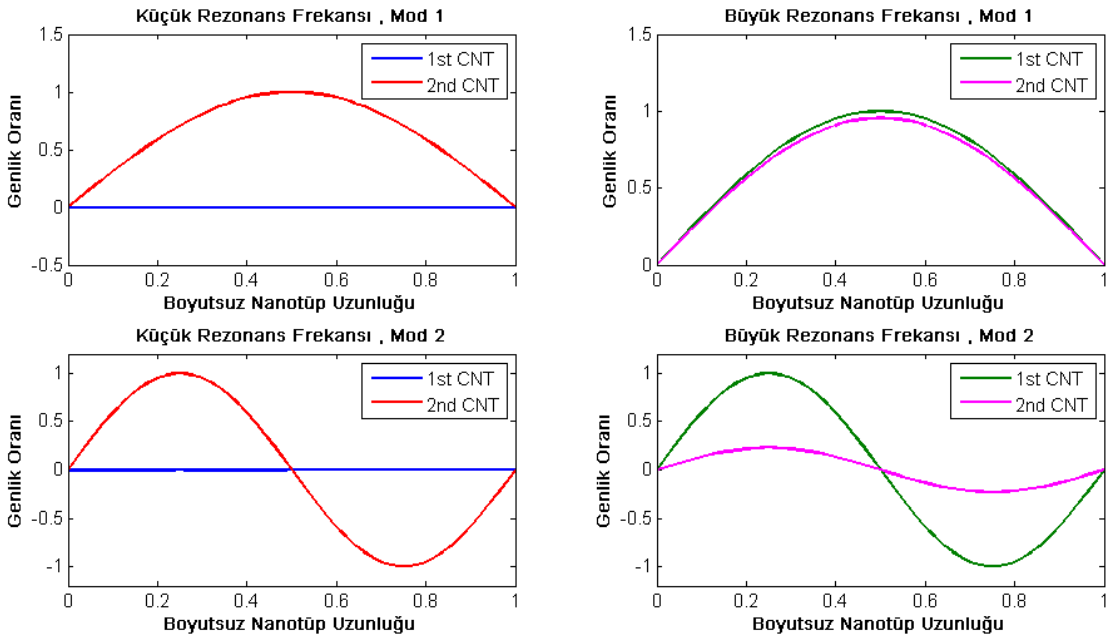

Şekil 5.26 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpün Mod Şekilleri ($L$=5 nm, $\mu$=2 nm$^2$, $C_t$=0.0001$C_{vdW}$ erg/m)




Şekil 5.27 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpün Mod Şekilleri ($L$=50 nm, $\mu$=2 nm$^2$, $C_t$=0.0001C erg/m)

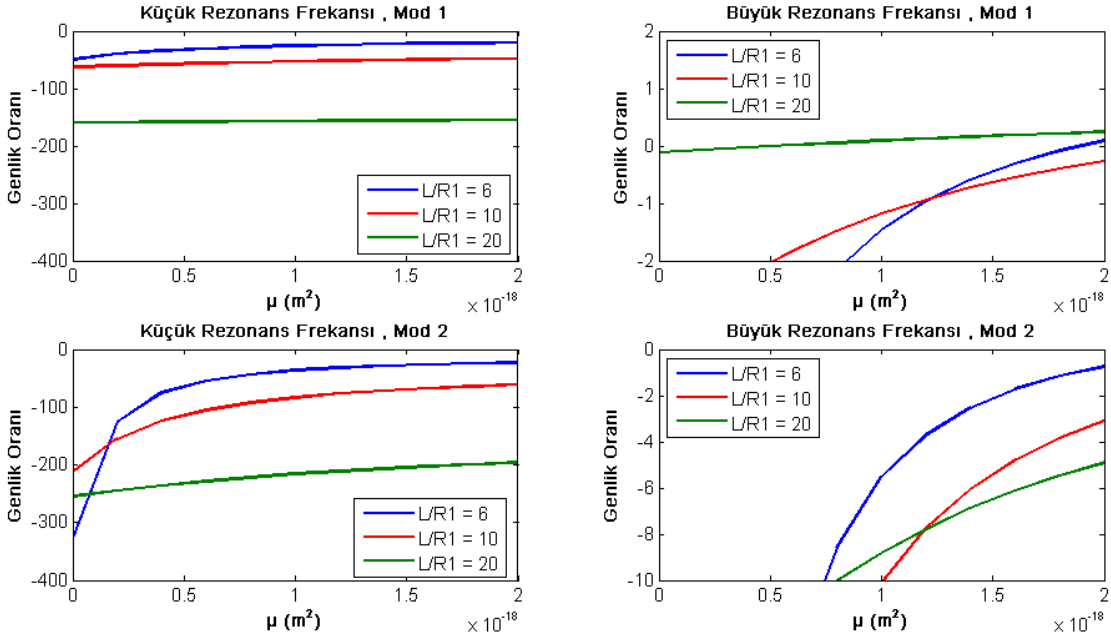



Şekil 5.28 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpün Mod Şekilleri (L=5 nm, $\mu$=2 nm$^2$, $C_t$= 0.01$C_{vdW}$ erg/m)

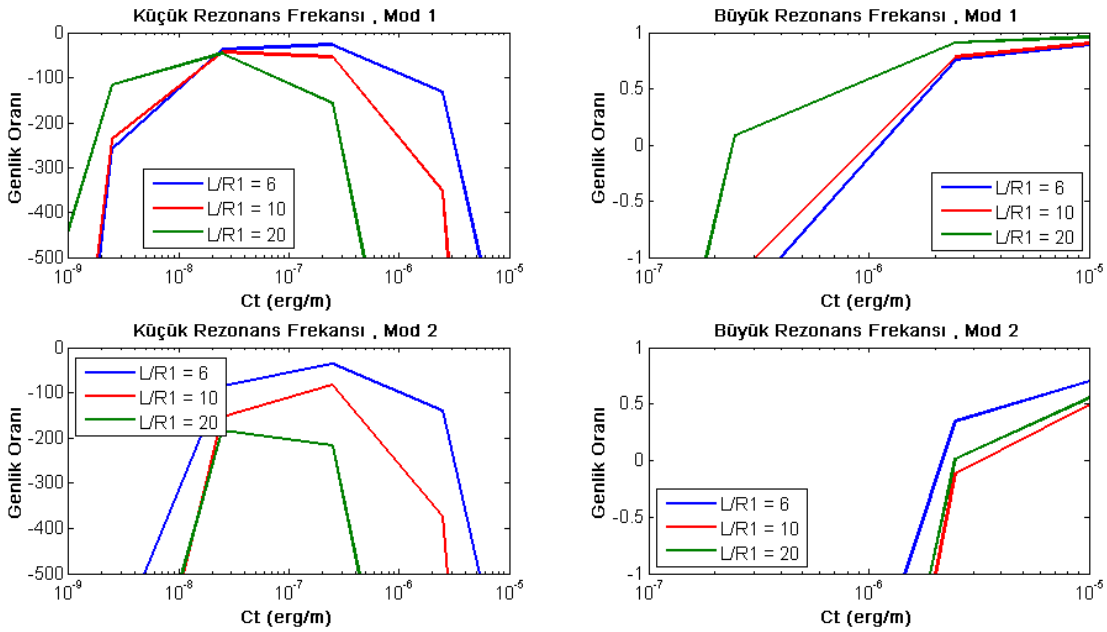



Şekil 5.29 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpün Mod Şekilleri ($L$=50 nm, $\mu$=2 nm$^2$, $C_t$=0.01$C_{vdW}$ erg/m)

van der Waals etkileşimi($C_t$) ve yerel olmayan parametrenin genlik oranlarına olan etkisi Şekil (5.30) ve (5.31)'de görülmektedir. Nanotüpler genellikle zıt yönlerde hareket etseler de $C_t$'nin bazı değerleri için aynı yönde hareket ettikleri de görülmektedir.




Şekil 5.30 Genlik Oranının $\mu$ ile Değişimi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$ erg/m)



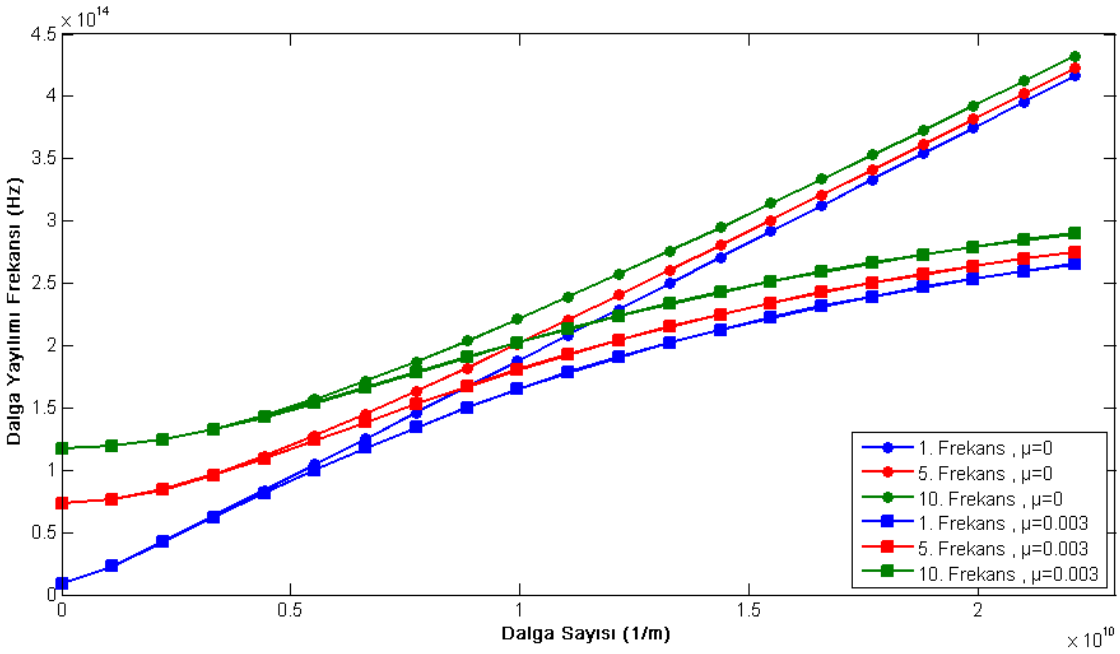

Şekil 5.31 Genlik Oranının $C_t$ ile Değişimi ($\mu$=1 nm$^2$)

Yapılan analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

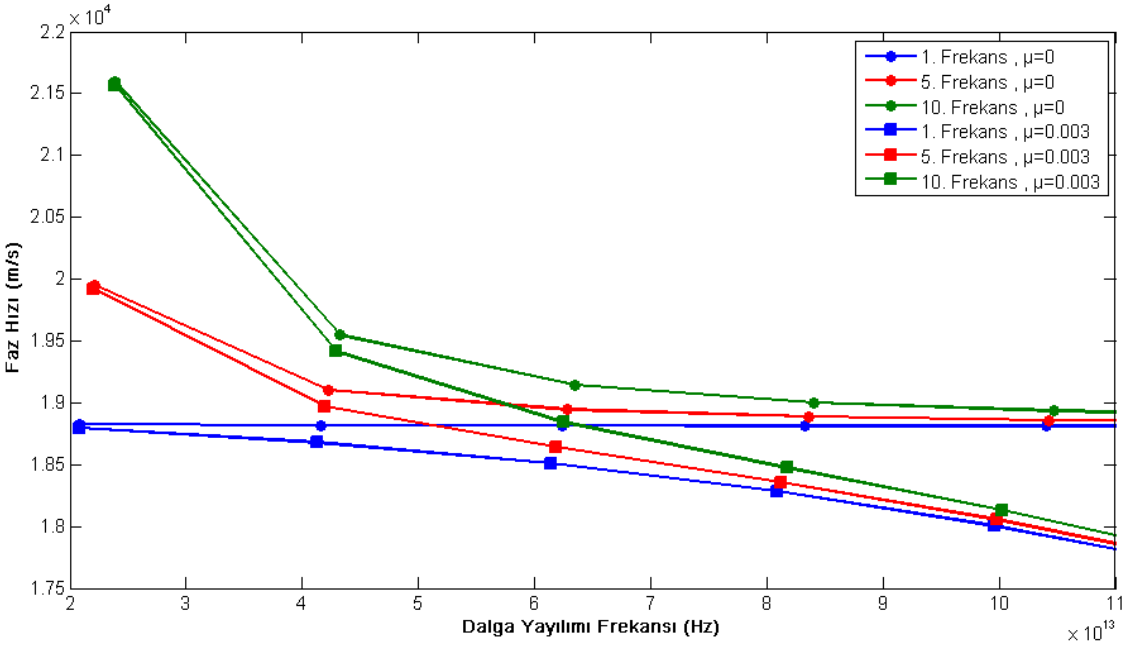
- BFP, nanotüp uzunluğundan küçük rezonans frekansında etkilenmezken büyük rezonans frekansında artan nanotüp uzunluğu ile artmaktadır.
- Yerel olmayan parametre BFP'yi küçük ve büyük rezonans frekansında azaltmaktadır.
- van der Waals etkileşim katsayısı BFP'yi büyük rezonans frekansında artırırken küçük rezonans frekansında etkilememektedir.
- Çift duvarlı karbon nanotüpün mod şekilleri büyük nanotüp uzunluğu ve yerel olmayan parametre değerleri için zıt yönde iken van der Waals etkileşim katsayısının büyük değerleri için aynı yöndedir.

### 5.2.4. Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerde Burulma Dalga Yayılımı

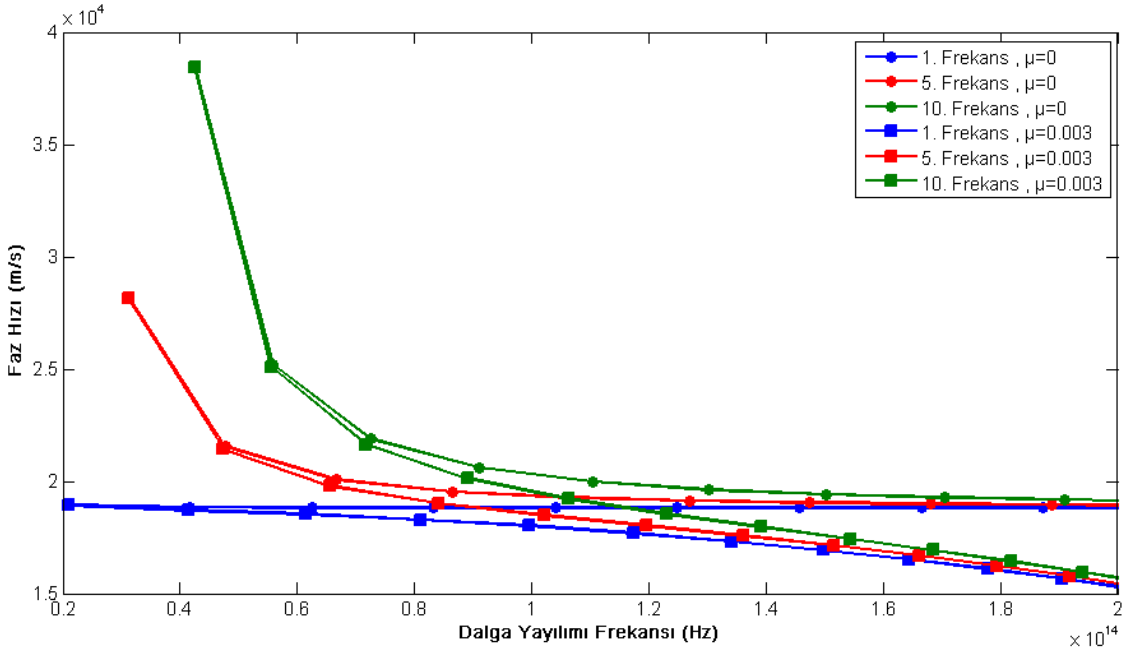
Bu bölümde dalga yayılımı frekansı, faz hızı ve genlik oranının yerel olmayan parametre ve van der Waals etkileşimi ile değişimi incelenmiştir. Sonuçlar rasgele seçilen birinci, beşinci ve onuncu nanotüpler için Şekil (5.32-5.35)'de görülmektedir.



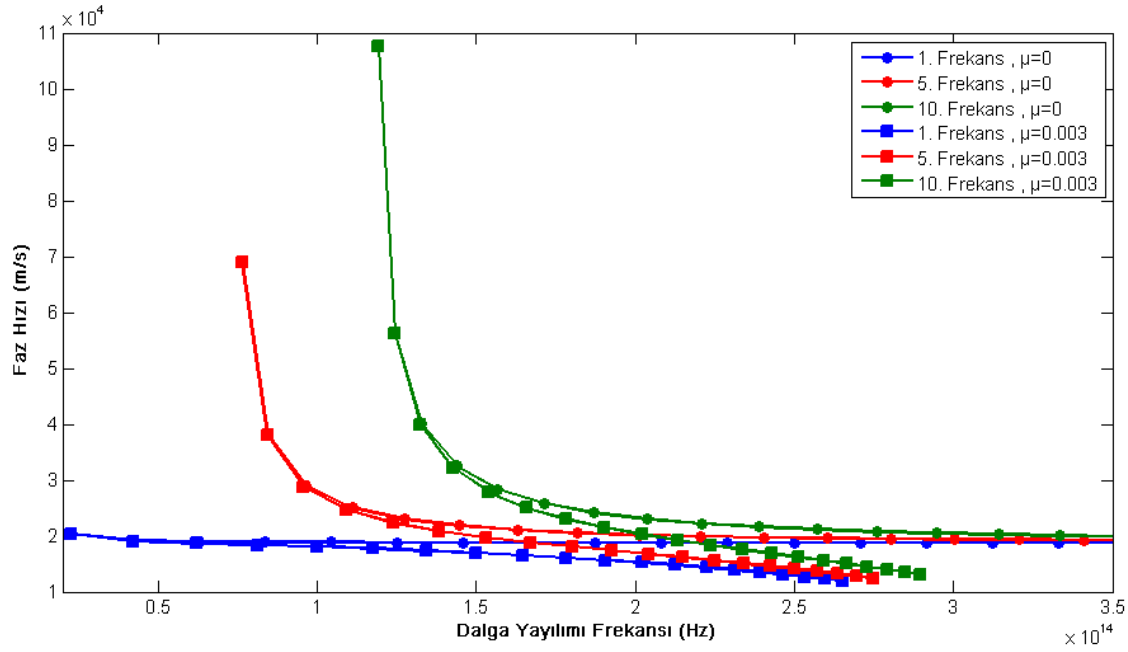

Şekil 5.32 Burulma Dalga Yayılımı Frekansına Yerel Olmayan Teori Etkisi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$)




Şekil 5.33 Faz Hızının Dalga Yayılım Frekansına Göre Değişimi ($C_t$=0.0001$C_{vdW}$)



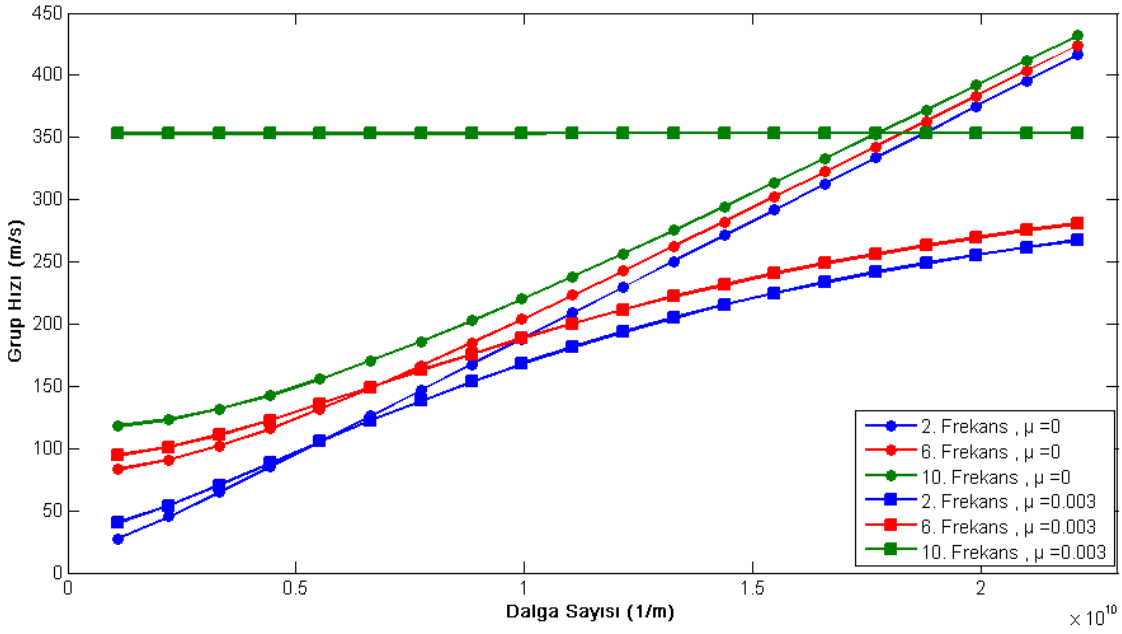

Şekil 5.34 Faz Hızının Dalga Yayılım Frekansına Göre Değişimi ($C_t$=0.001$C_{vdW}$)




Şekil 5.35 Faz Hızının Dalga Yayılım Frekansına Göre Değişimi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$)

Yerel olmayan etki dalga yayılımı frekansını ve faz hızını azaltmaktadır. Daha büyük sıradaki frekanslar dalga sayısı($k$)'nın çok küçük değerlerinde yayınım sıfırdan farklı değerlerde başlamaktadır. Küçük ve büyük sıradaki frekanslar yerel ve yerel olmayan teori için artan dalga sayısı ile birbirlerine yaklaşmaktadırlar. Yerel ve yerel olmayan teori arasındaki fark artan dalga sayısı ile azalmaktadır. Bu durum yapılan diğer çalışmalarda da belirtilmiştir [80,81]. Uzun mesafe etkileşimi kısa dalga boylarında daha etkindir. Yerel teori faz hızları artan frekans ile sabit bir değere yakınsarken, yerel olmayan teori faz hızları azalmaktadır.

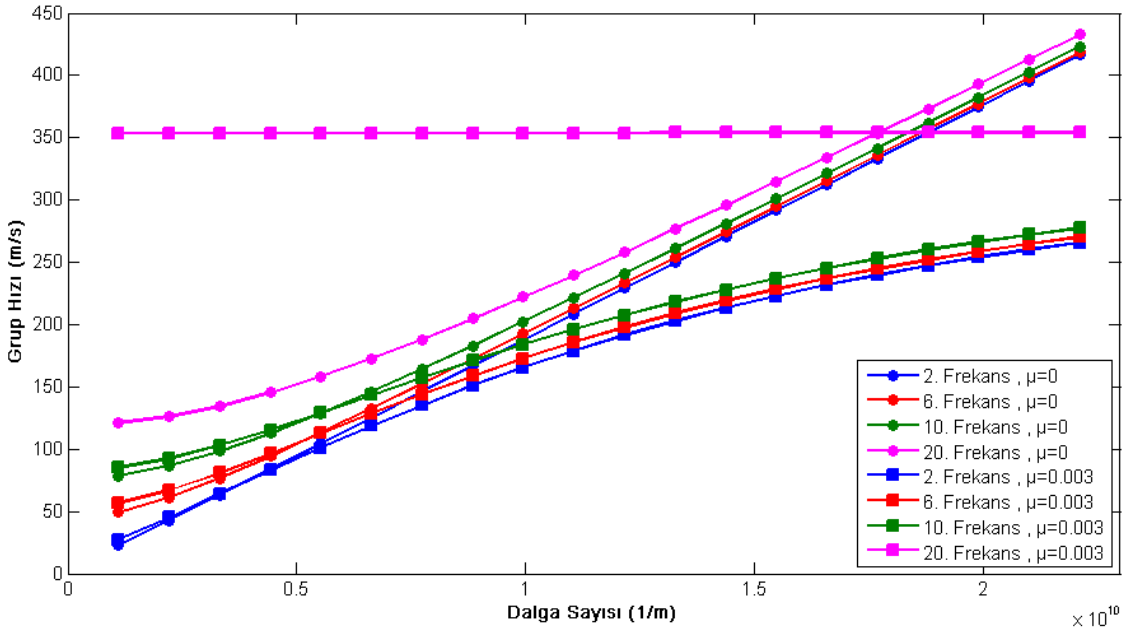
van der Waals etkileşimi dalga yayılımı üzerinde oldukça etkilidir. 0.001-0.01$C_{vdW}$ değerleri arasında frekans ve faz hızı neredeyse 4 kat artmaktadır. Etkileşim katsayısının artması yerel olmayan etkiyi azaltmaktadır. Bu nedenle van der Waals etkileşim katsayısı 0.01$C_{vdW}$ değerinden büyük seçilmemelidir.



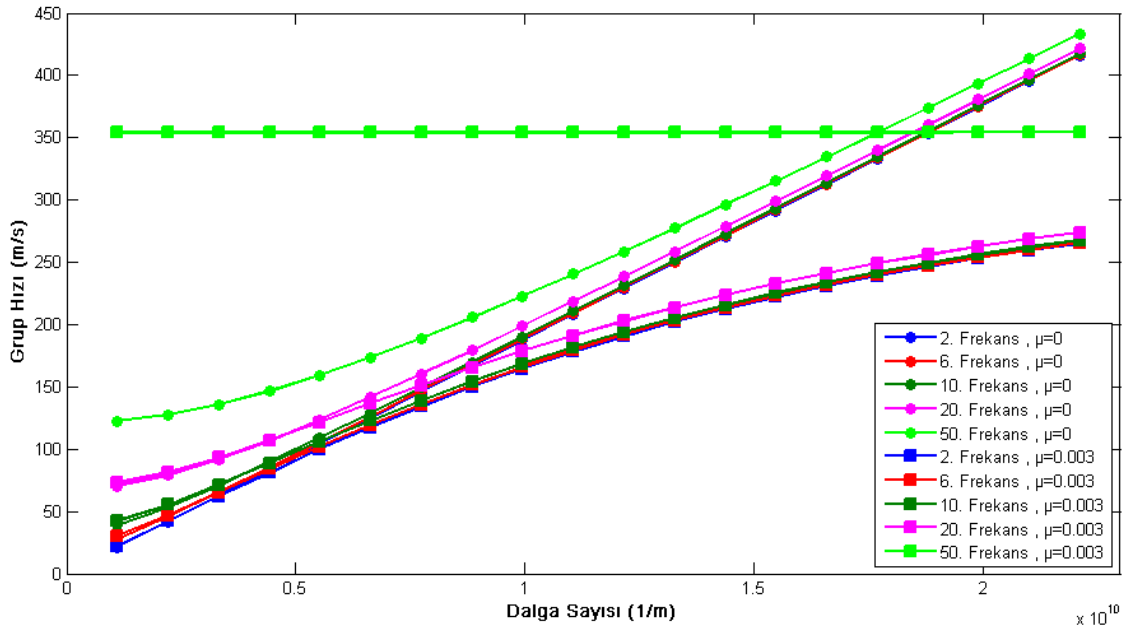

Şekil 5.36 Grup Hızının 10 Duvarlı Nanotüp için Dalga Sayısı ile Değişimi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$)

Grup hızları 50 duvarlı nanotüp için hesaplanmış ve rasgele seçilmiş ikinci, altıncı, onuncu yirminci ve ellinci nanotüpler için gösterilmiştir. Yerel ve yerel olmayan grup hızları artan dalga sayısı ile artmaktadır. Yerel teorinin aksine yerel olmayan teori sonuçları doğrusal olamayarak artmakta ve limit grup hızına yaklaşmaktadır. Limit grup

hızı nanotüp sayısından bağımsız olarak sabittir ve 10,20 ve 50 duvarlı nanotüp için yaklaşık olarak 350 m/s'dir.




Şekil 5.37 Grup Hızının 20 Duvarlı Nanotüp için Dalga Sayısı ile Değişimi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$)



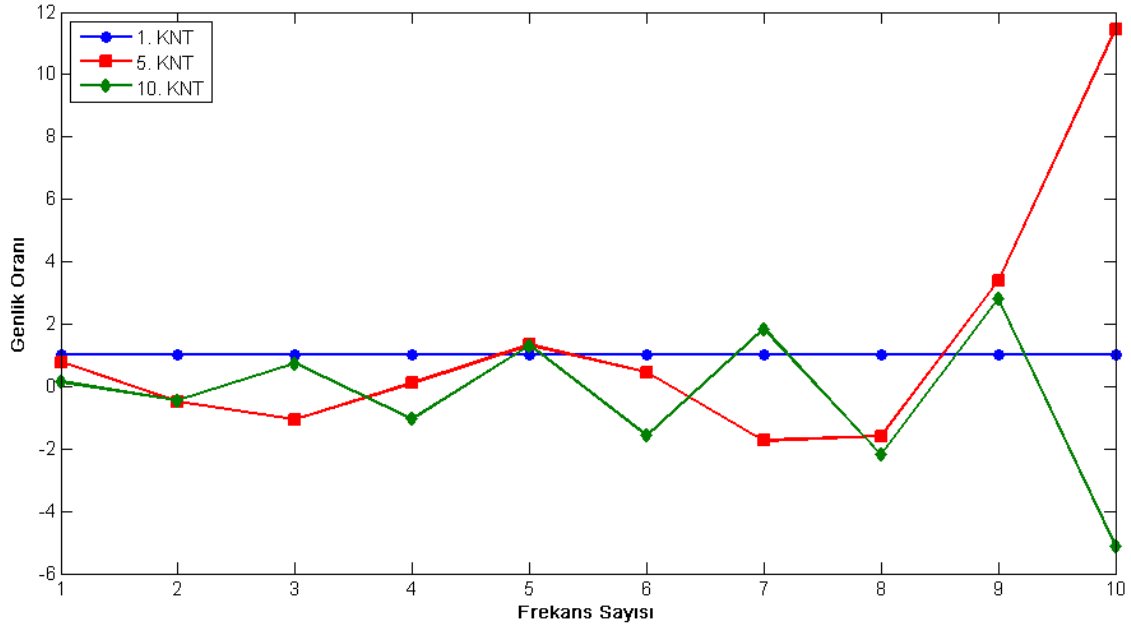

Şekil 5.38 Grup Hızının 50 Duvarlı Nanotüp için Dalga Sayısı ile Değişimi ($C_t$=0.01$C_{vdW}$)

Tablo 5.3 Çeştili Rezonans Frekanslarında Karbon Nanotüplerin Genlik Oranları ($k=\pi/2a$ , $C_t=0.01C_{vdW}$)

| | Frekans Sıra No | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1. Frekans | | 5. Frekans | | 10. Frekans | |
| KNT Sıra No | $\mu$=0 $nm^2$ | $\mu$=0.003 $nm^2$ | $\mu$=0 $nm^2$ | $\mu$=0.003 $nm^2$ | $\mu$=0 $nm^2$ | $\mu$=0.003 $nm^2$ |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0,9761 | 0,9761 | -0,6954 | -0,6954 | -3,3222 | -3,3222 |
| 3 | 0,9301 | 0,9301 | -1,2668 | -1,2668 | 6,0448 | 6,0448 |
| 4 | 0,8634 | 0,8634 | 0,1608 | 0,1608 | -8,9046 | -8,9046 |
| 5 | 0,7779 | 0,7779 | 1,3383 | 1,3383 | 11,4529 | 11,4529 |
| 6 | 0,6754 | 0,6754 | 0,4542 | 0,4542 | -13,1646 | -13,1646 |
| 7 | 0,5585 | 0,5585 | -1,1247 | -1,1247 | 13,5594 | 13,5594 |
| 8 | 0,4296 | 0,4296 | -0,9919 | -0,9919 | -12,3247 | -12,3247 |
| 9 | 0,2916 | 0,2916 | 0,6444 | 0,6444 | 9,4168 | 9,4168 |
| 10 | 0,1473 | 0,1473 | 1,3071 | 1,3071 | -5,1132 | -5,1132 |

Genlik oranları 10 duvarlı nanotüpten oluşan çok duvarlı karbon nanotüp yapısı için hesaplanmıştır. Tablo (5.3) ve Şekil (5.39)'da genlik oranının değişimi görülebilir. Yerel olmayan teori ve van der Waals etkileşimini genlik oranı üzerinde bir etkisi yoktur. Sadece, rezonans frekansının bazı değerleri için karbon nanotüpler 1. nanotüpün dönme yönüne göre aynı yönde dönerken bazı değerlerinde zıt yönde dönmektedirler.

Çok duvarlı karbon nanotüpün kesme ve kaçma frekansları farklı van der Waals katsayılarında Tablo (5.4)'de görülmektedir. Her iki frekans artan frekans sayısı ve van der Waals katsayısı ile artmaktadır. van der Waals etkileşimi kesme frekansının artışında daha etkilidir. Ayrıca kaçma frekansının limit değeri artan van der Waals etkileşimi katsayısının artması ile artmaktadır.




Şekil 5.39 Genlik Oranının Farklı Nanotüpler için Frekans Sayısı ile Değişimi ($k=\pi/2a$ , $\mu=0.003\text{nm}^2$ , $C_t=0.0001C_{vdW}$)

Tablo 5.4 Çeştili van der Waals Etkileşimi Değerlerinde Çok Duvarlı Karbon Nanotüpün Kesme ve Kaçma Frekansları ($\mu=0.003\text{nm}^2$)

| | $C_t=0.0001C_{vdW}$ | | $C_t=0.001C_{vdW}$ | | $C_t=0.01C_{vdW}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Frekans Sıra No | Kesme Frekansı (THz) | Kaçma Frekansı (THz) | Kesme Frekansı (THz) | Kaçma Frekansı (THz) | Kesme Frekansı (THz) | Kaçma Frekansı (THz) |
| 1 | 0.871 | 343.183 | 2.755 | 343.193 | 8.714 | 343.292 |
| 2 | 2.615 | 343.191 | 8.270 | 343.281 | 26.152 | 344.176 |
| 3 | 4.301 | 343.208 | 13.601 | 343.451 | 43.013 | 345.866 |
| 4 | 5.890 | 343.232 | 18.628 | 343.687 | 58.909 | 348.201 |
| 5 | 7.348 | 343.260 | 23.239 | 343.967 | 73.488 | 350.962 |
| 6 | 8.642 | 343.290 | 27.330 | 344.268 | 86.427 | 353.897 |
| 7 | 9.744 | 343.320 | 30.815 | 344.562 | 97.446 | 356.748 |
| 8 | 10.631 | 343.346 | 33.621 | 344.824 | 106.319 | 359.273 |
| 9 | 11.291 | 343.367 | 35.707 | 345.034 | 112.915 | 361.280 |
| 10 | 11.733 | 343.382 | 37.104 | 345.181 | 117.334 | 362.686 |

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçları özetlemek gerekirse: Yerel elastisite teorisinin sonuçları klasik teoriye göre daha tutarlıdır. van der Waals etkileşiminin dalga yayılımı üstünde önemli etkisi vardır. Grup hızları nanotüp sayısından bağımsız olarak sabit bir değere yaklaşmaktadırlar. Genlik oranı değerlerinden anlaşıldığına göre bazı karbon nanotüpler aynı yönde dönerlerken bazıları bunlara zıt yönde dönmektedirler. Çok duvarlı karbon nanotüp için kesme frekansları artan van der Waals etkileşimi ile birlikte artmakta ve kaçma frekansları yerel olmayan etki ile limit değere yaklaşmaktadır.

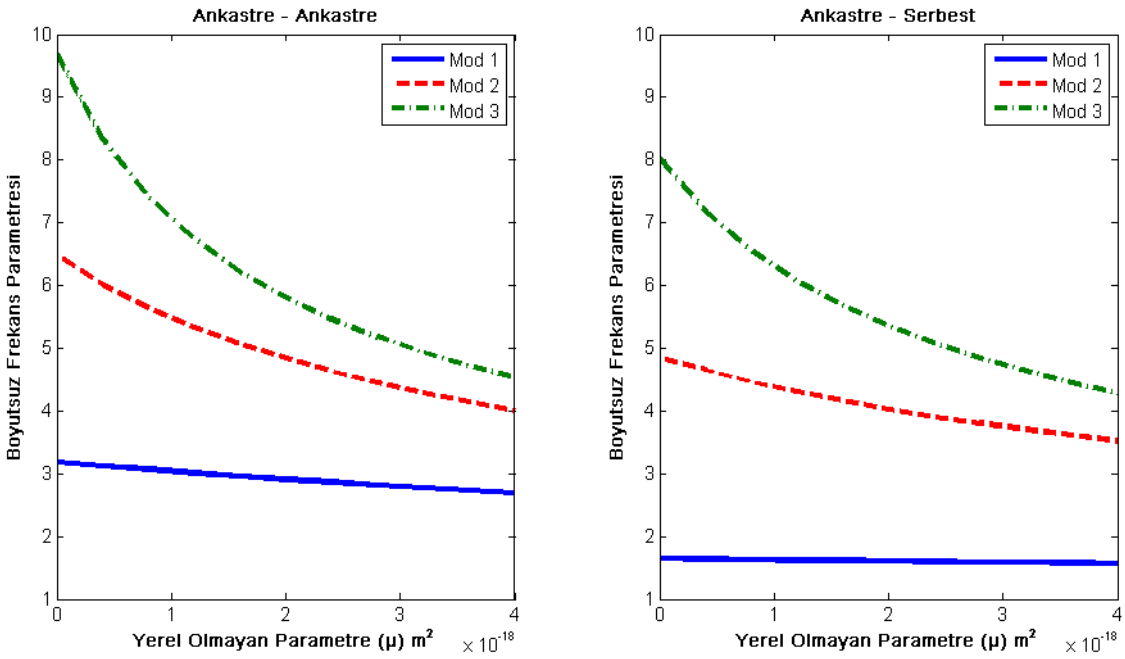
### 5.2.5. Basamak Kesitli Karbon Nanotüplerin Burulma Titreşimi

Bu bölümde basamak kesitli karbon nanotüplerin burulma titreşimi yerel olmayan parametre, karakteristik parametre, nanotüp uzunluğu gibi parametrelerin etkisiyle Ankastre-Ankastre ve Ankastre-Serbest sınır şartlarında farklı mod sayılarında değişimi incelenmiştir.

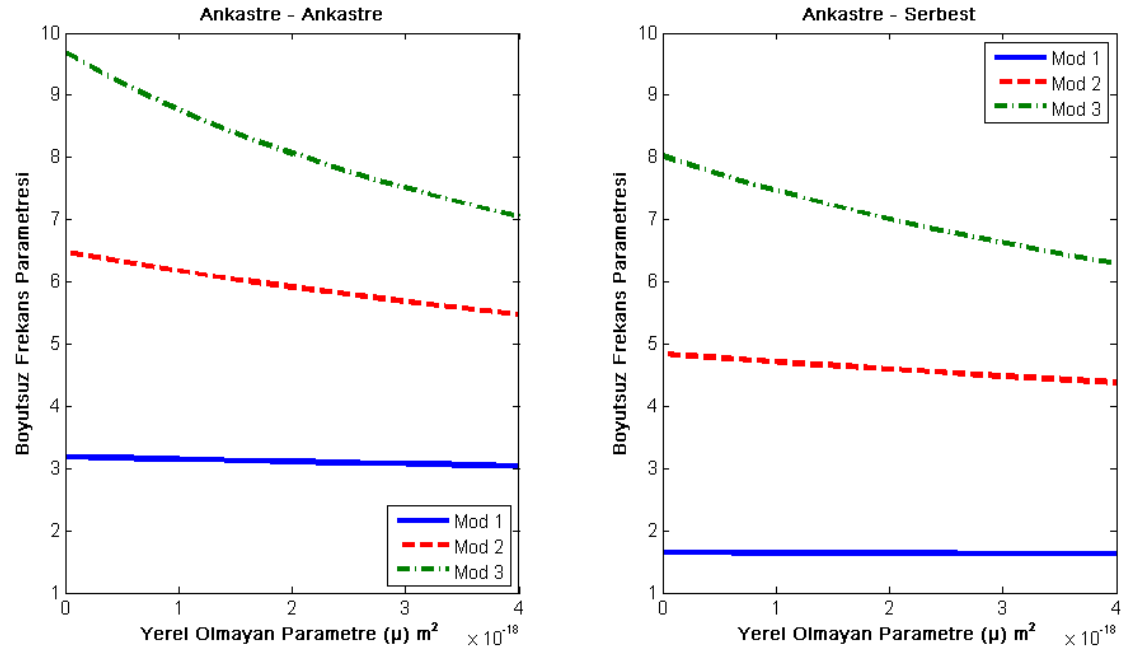
Şekil (5.40)-(5.43)'de basamak kesitli karbon nanotüp yapısı için boyutsuz burulma frekans parametresine yerel olmayan parametrenin etkisi görülmektedir. Yerel olmayan parametre BFP'ni azaltmaktadır. Azalma davranışı büyük mod sayılarında daha belirgin görülmektedir. Nanotüp uzunluğu yerel olmayan etkiyi azaltmaktadır. Birleşme noktası Ankastre-Serbest sınır şartında BFP'yi az da olsa azaltmaktadır. Büyük mod sayılarında bu durum daha bariz görülmektedir. Ankastre-Ankastre sınır şartında birleşme noktası tam ortada ($\bar{x} = 0.5$) olduğunda BFP değeri en yüksek değerine ulaşır.

Karakteristik parametre ($\beta$) artan yerel olmayan parametre ile artmaktadır. Nanotüp uzunluğu karakteristik parametre için yerel olmayan etkiyi azaltmaktadır. Birleşme noktası karakteristik parametreyi Ankastre-Ankastre ve Ankastre-Serbest sınır şartlarında azaltmaktadır. Bu etki artan mod sayılarında daha açık görülmektedir (Şekil (5.44)-(5.47)).

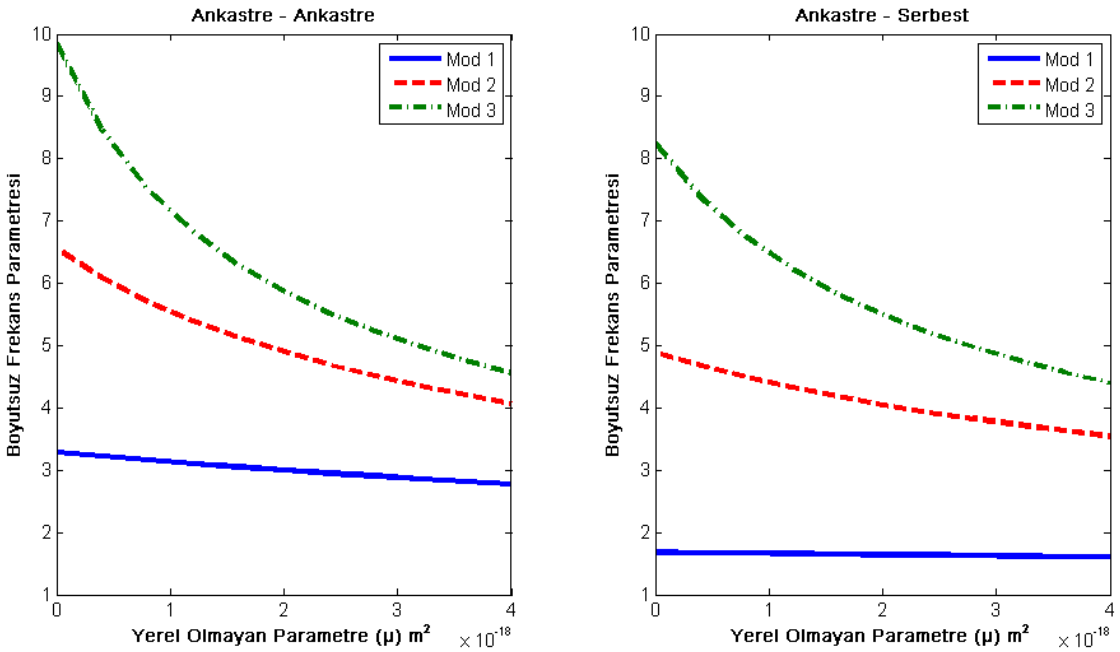
Birleştirilmiş karbon nanotüp yapısı için mod şekilleri Şekil (5.48)-(5.51)'de farklı durumlar için görülmektedir. Yerel olmayan etki genlik oranını artırmakta ve bu etki kısa nanotüp uzunluklarında daha belirgin olmaktadır. Birleşme noktası, Ankastre-Serbest sınır şartında genlik oranını artırmaktadır. Farklı olarak Ankastre-Ankastre sınır şartında genlik oranı birleştirilmiş yapının orta noktasında ($\bar{x} = 0.5$) en yüksek değerine ulaşmaktadır.



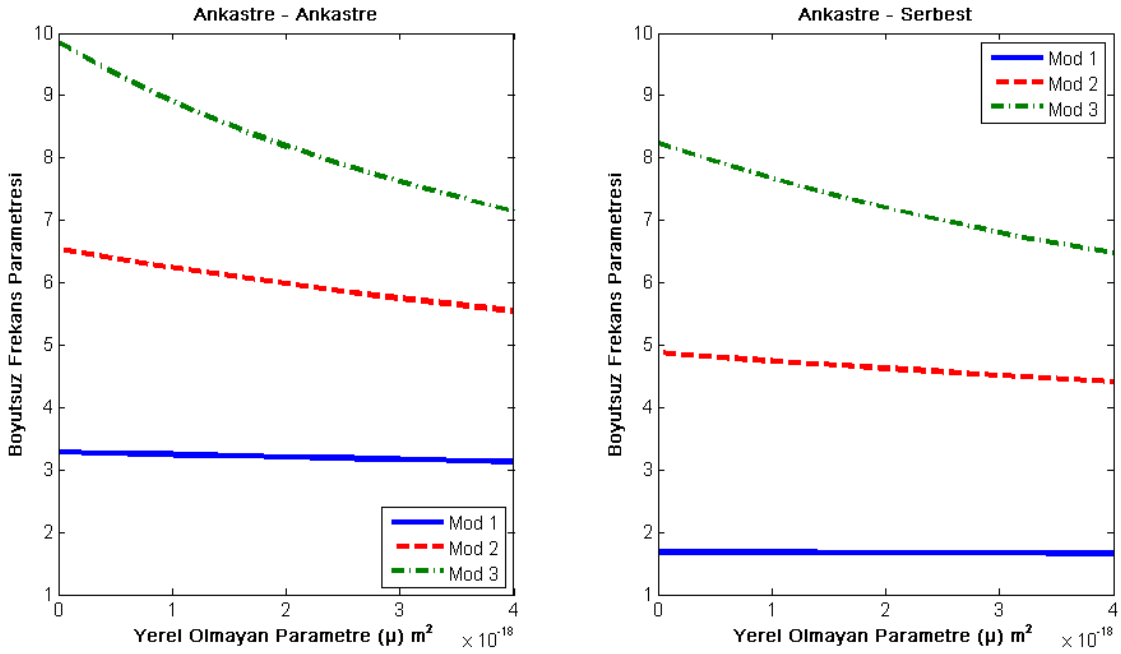

Şekil 5.40 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=10nm , $\gamma$=0.46)



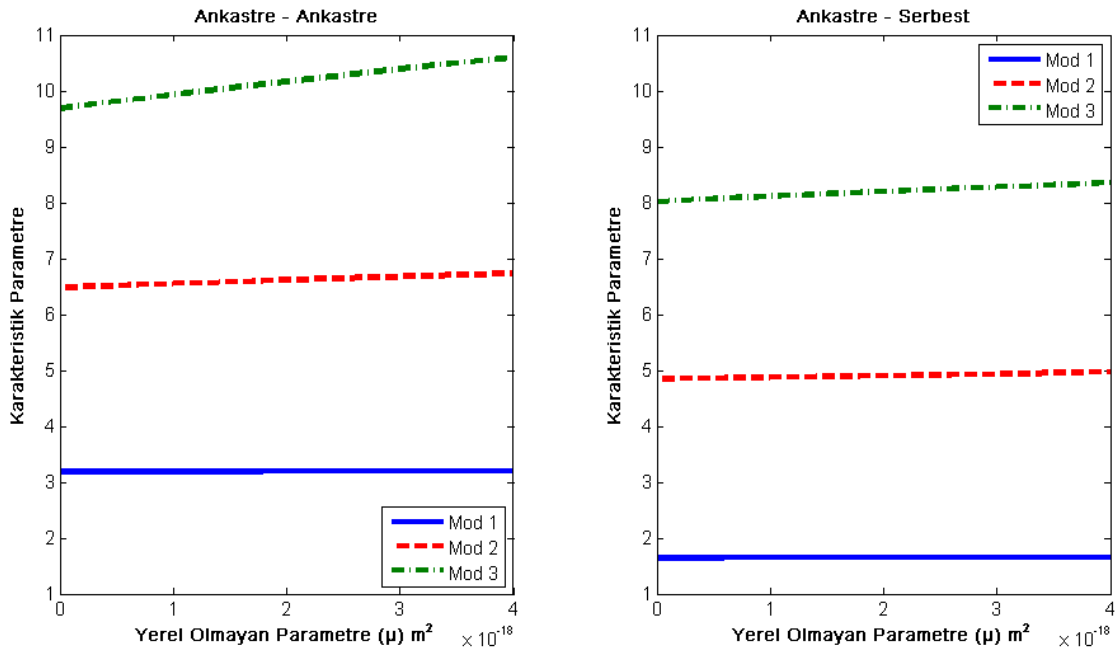

Şekil 5.41 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=20nm , $\gamma$=0.46)



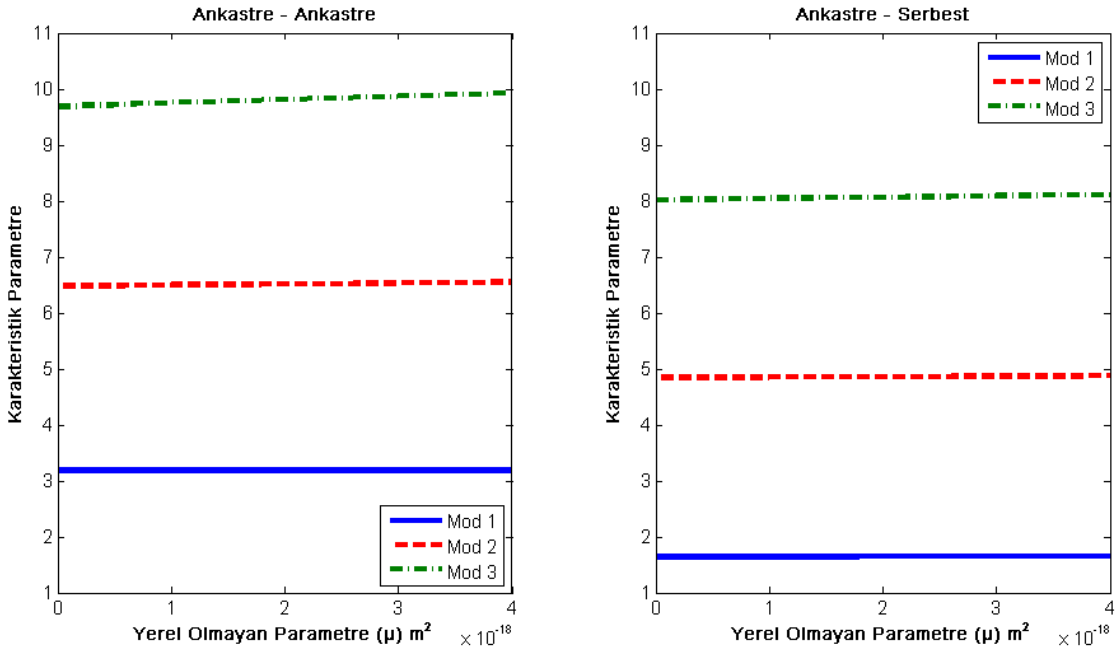

Şekil 5.42 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=10nm , $\gamma$=0.67)



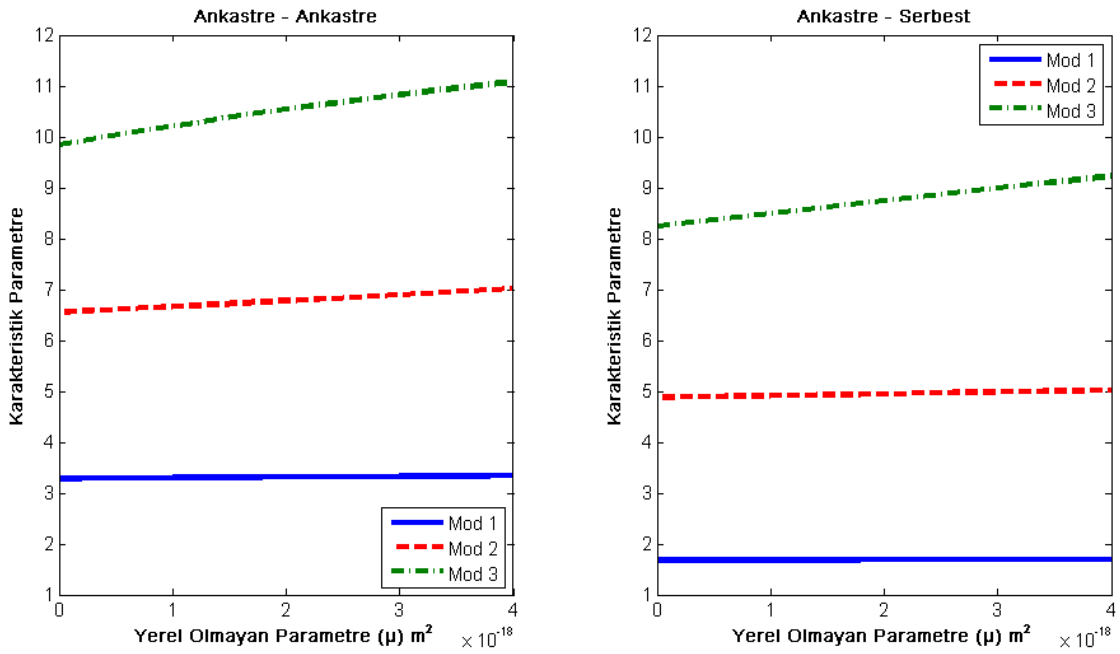

Şekil 5.43 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=20nm , $\gamma$=0.67)



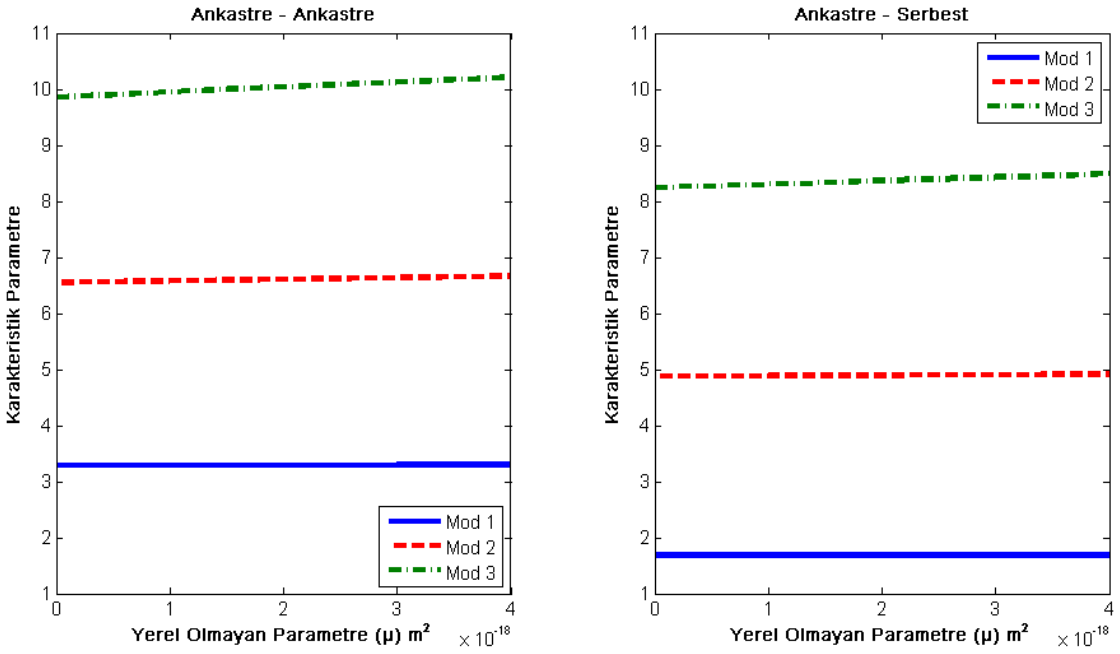

Şekil 5.44 Karakteristik Parametrenin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=10nm , $\gamma$=0.46)



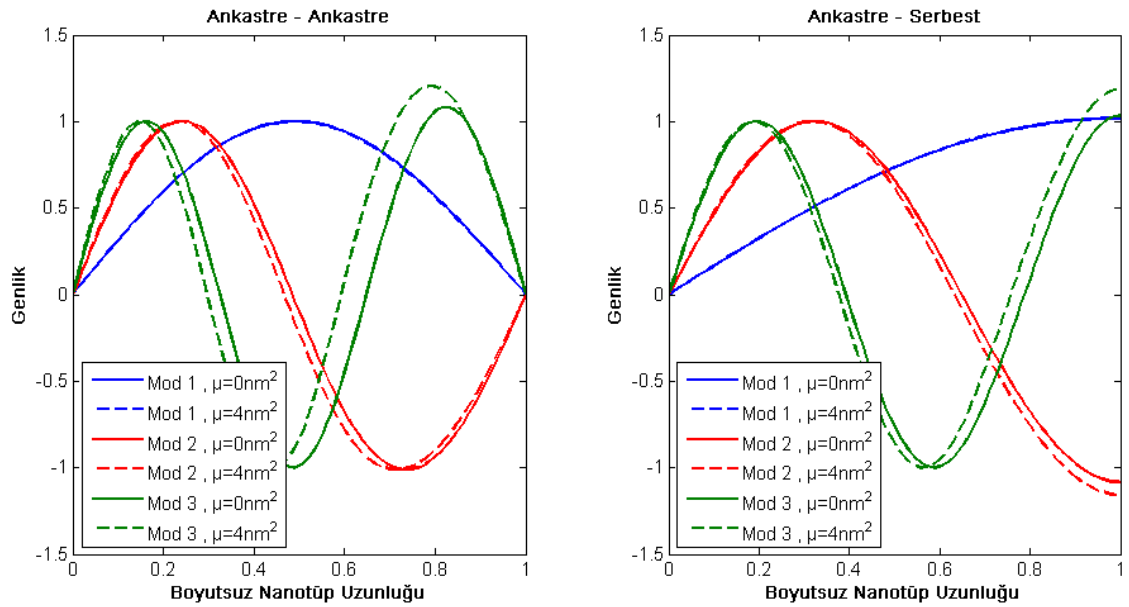

Şekil 5.45 Karakteristik Parametrenin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=20nm , $\gamma$=0.46)



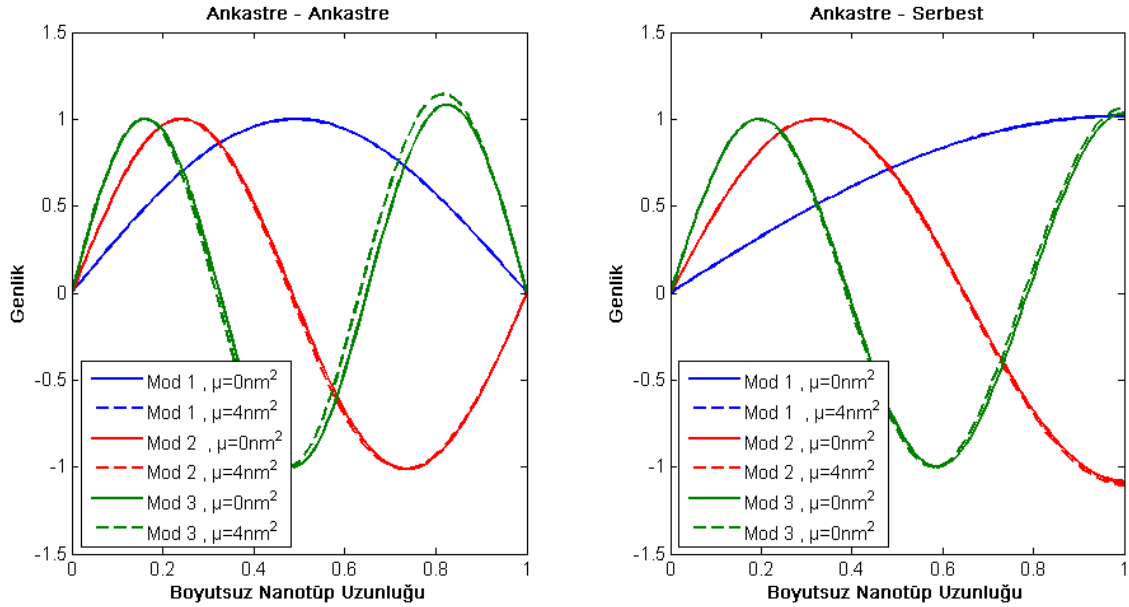

Şekil 5.46 Karakteristik Parametrenin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=10nm , $\gamma$=0.67)



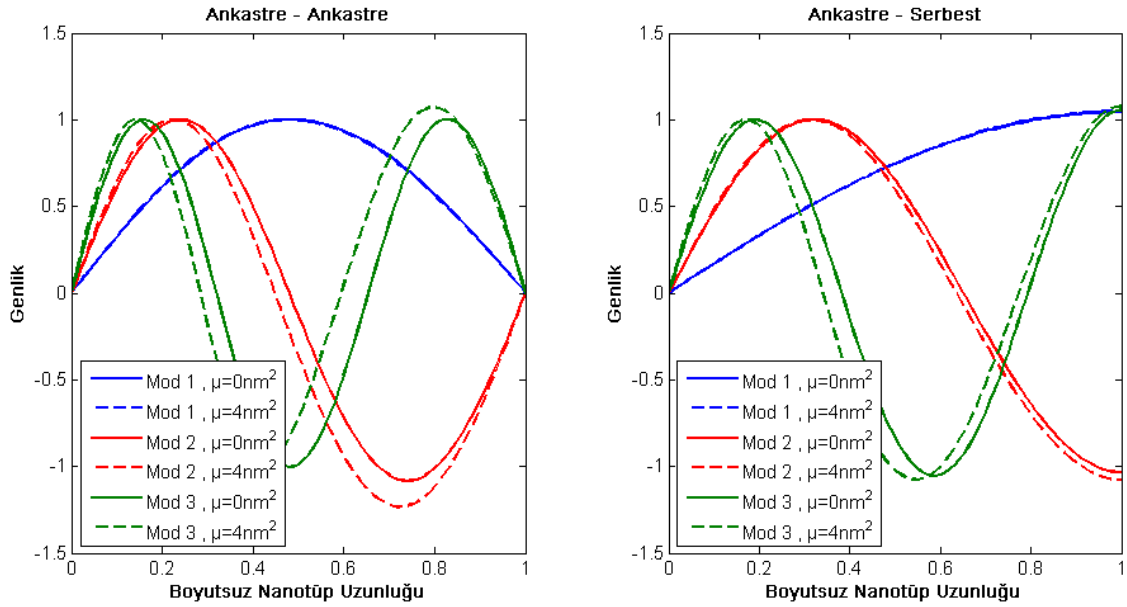

Şekil 5.47 Karakteristik Parametrenin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=20nm , $\gamma$=0.67)



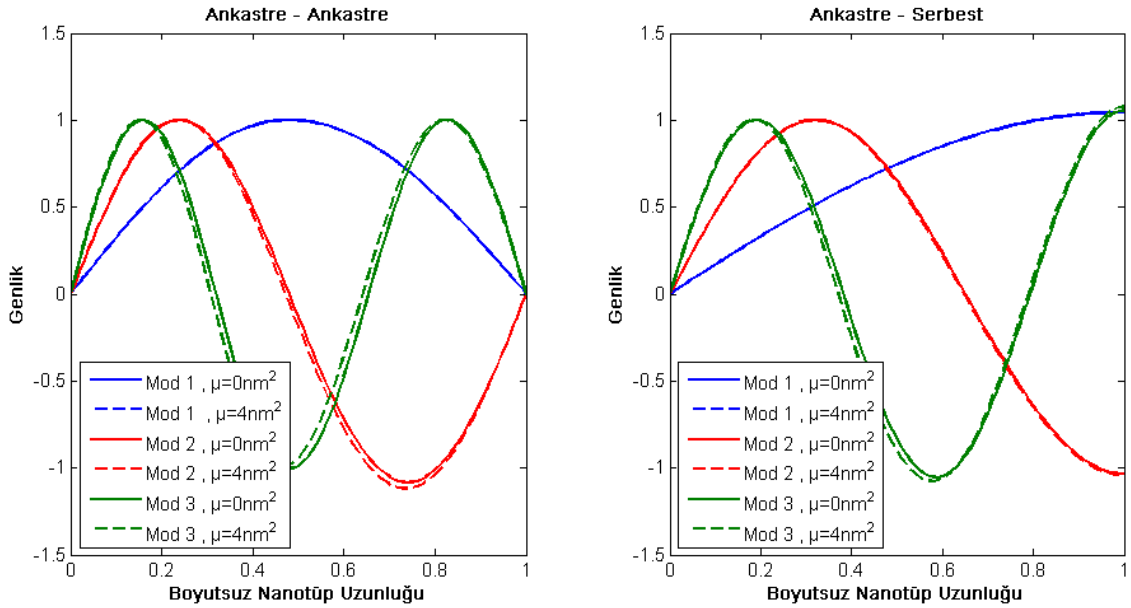

Şekil 5.48 Birleştirilmiş Karbon Nanotüp Yapısının Mod Şekilleri ($L$=10nm , $\gamma$=0.46)




Şekil 5.49 Birleştirilmiş Karbon Nanotüp Yapısının Mod Şekilleri ($L$=20nm , $\gamma$=0.46)

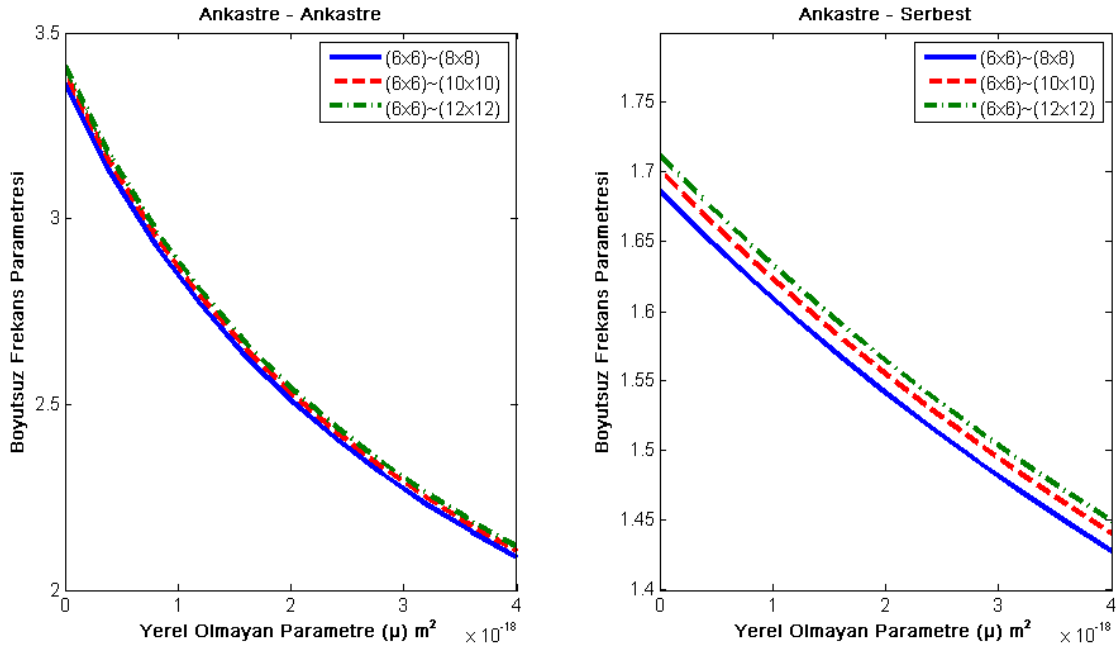



Şekil 5.50 Birleştirilmiş Karbon Nanotüp Yapısının Mod Şekilleri ($L$=10nm , $\gamma$=0.67)

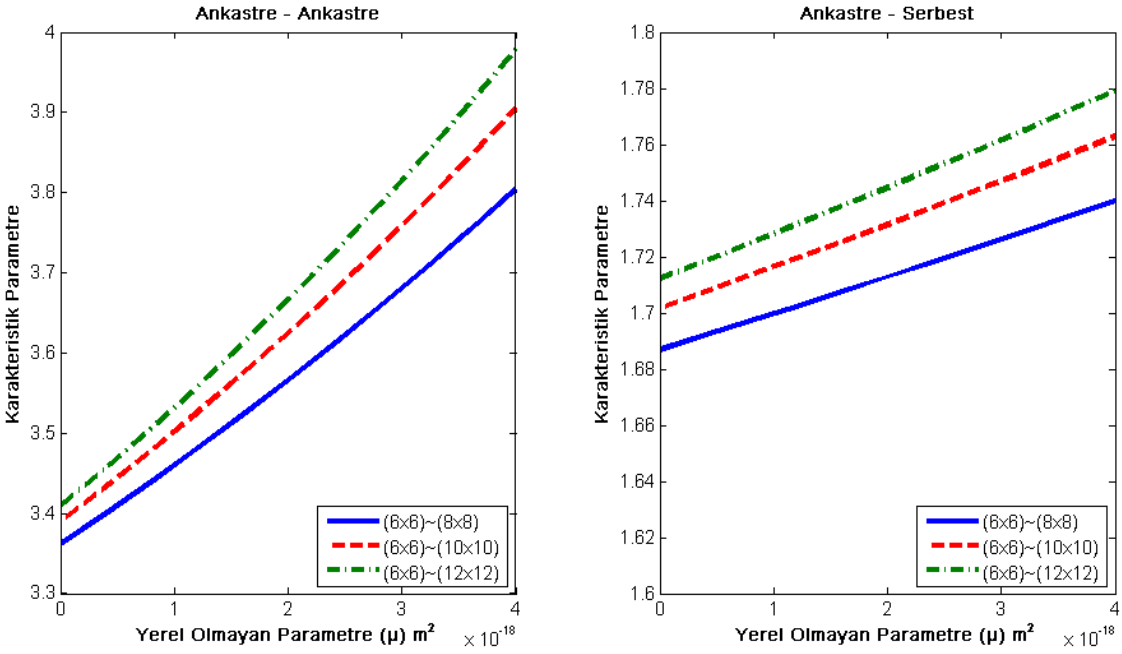



Şekil 5.51 Birleştirilmiş Karbon Nanotüp Yapısının Mod Şekilleri ($L$=20nm , $\gamma$=0.67)

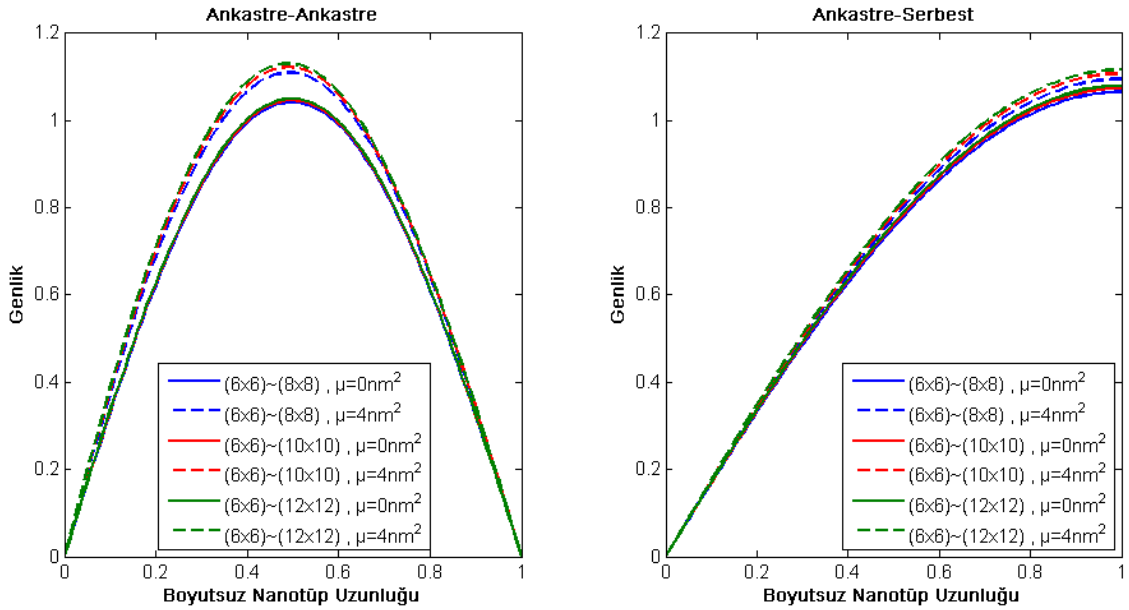
Üç farklı karbon nanotüp şiral açı durumu ele alınmıştır. Şiral açısı, nanotüpün çapını değiştirmektedir. BFP artan nanotüp yarıçapı ve yerel olmayan parametre ile azalmaktadır (Şekil (5.52)). Bu durum Ankastre-Serbest sınır şartında daha açık görülmektedir. Ancak karakteristik parametre her iki sınır şartı için de artmaktadır (Şekil (5.53)). Şekil (5.54)'de genlik oranına şiral açısı ve yerel olmayan parametre etkisi görülmektedir. Her ikisi de genlik oranını küçük miktarlarda da olsa artırmaktadır.




Şekil 5.52 BFP'nin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=5nm , $\gamma$=0.22)




Şekil 5.53 Karakteristik Parametrenin Yerel Olmayan Parametre ile Değişimi ($L$=5nm , $\gamma$=0.22)




Şekil 5.54 Birleştirilmiş Karbon Nanotüp Yapısının Mod Şekilleri ($L$=5nm , $\gamma$=0.22)

Yerel olmayan teorinin azaltıcı etkisi diğer çalışmalarla benzer şekilde grafiklerle gösterilmiştir. Yerel olmayan etkinin azaltıcı etkisi nanotüp uzunluğuna göre elde edilmiştir. Yerel olmayan etki uzun nanotüplerde ortadan kaybolmaktadır. Basamak kesitli karbon nanotüp yapısının birleşme noktası BFP ve genlik oranını çeşitli sınır şartları için farklı etkilemektedir. Ankastre-Ankastre sınır şartında BFP ve genlik oranı birleştirilmiş yapının orta noktasında ($\bar{x} = 0.5$) en yüksek değerine ulaşmaktadır. Ankastre-Serbest sınır şartında BFP ve genlik oranı birleştirilmiş yapının sonunda en yüksek değerine ulaşmaktadır ($\bar{x} = 1$). Şiral açısı, BFP ve genlik oranını artıran bir etki göstermektedir.

# BÖLÜM 6

# GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada karbon nanotüplerin statik ve dinamik burulma analizi Eringen'in Yerel Olmayan Elastisite Teorisi'nden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Yerel olmayan burulma hareketinin yönetici denklemi ve sınır şartları Hamilton prensibi kullanılarak elde edilmiştir.

Yapılan parametrik analizler sonucunda yerel olmayan parametrenin boyutsuz frekans ve açısal yer değiştirme üzerindeki azaltıcı etkisi görülmüştür. Ancak yerel olmayan etki boyut oranı ile doğrudan ilgilidir ve uzun nanotüp boylarında etkisini kaybetmektedir. Karbon nanotüp iç yarıçapı ve kalınlığı fiziksel özellikler ($G,\rho$) üzerinde oldukça etkilidir. Literatürde bu hususta farklı kabuller olmakla birlikte bu çalışmada tutarlı bir varsayım yapılmaya çalışılmıştır.

Yapılan literatür araştırmalarında karşılaşılmayan ve ilk defa elde edilen bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Bunlardan en önemli olanları maddeler halinde sıralamak gerekirse:

- Elastik ortam, karbon nanotüpün statik davranışına belirli bir sertlik değeri aralığında etki etmektedir (1nN – 1000nN) [152].
- Frekans Parametresi Oranı, elastik ortamın etkisiyle azalırken yerel olmayan parametre ile artmaktadır [152].
- Viskoelastik ortamın boyutsuz sönüm etkisi yerel olmayan parametreden etkilenmemektedir [165].
- van der Waals etkileşimi çift duvarlı karbon nanotüp yapılarında mod şekillerinin değişmesine ve rezonans frekansları aralığının açılmasına neden olmaktadır [166].
- Çok duvarlı karbon nanotüplerde dalga yayılımında grup hızlarının limit bir değere ulaştığı ve bunun nanotüp sayısıyla değişmediği görülmüştür [167].

- Birleştirilmiş karbon nanotüplerde şiral açısının artırılması ile genlik oranları da artmaktadır.

Elde edilen sonuçlar referanslar bölümünden de görüleceği üzere Web of Science indeksinde taranan dergilerde makale olarak yayımlanmıştır.

Bu çalışmanın ilerletilmesi ve geliştirilmesi açısından mevcut problemin silindirik kabuk, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme teorileri ve peridinamik, dublet mekaniği gibi görece daha yeni yerel olmayan elastisite yaklaşımlarıyla incelenmesi hedeflenmektedir. Son yıllarda giderek daha fazla ilgi uyandıran nümerik yaklaşımlarla yapılan analizler ise analitik yaklaşım ile olan farkların araştırılması açısından önem kazanmaktadır. Ayrıca nano boyutta deneysel çalışmanın çok masraflı ve uğraştırıcı olmasından dolayı moleküler dinamik simülasyonlarıyla elde edilecek verilerin oluşturulan teorik modellerin geçerliliğinin araştırılması da önemli bir hedef olarak önümüzde durmaktadır.

Yapılan bu doktora tez çalışmasının yakın gelecekte tasarlanacak veya hali hazırda tasarlanmakta olan nano-elektromekaniksel ürünlerin modellenmesinde, ilaç sektöründe, sensör teknolojilerinde, akıllı malzemelerin tasarımında faydalı olacağı düşünülmektedir.

Son söz olarak nano boyutta yapılabilecekleri öngörü olarak dünyaya sunan bilim insanı Richard Feynman'dan bir alıntıyla bitirmek gerekirse [1]: *"Aşağıda daha çok yer var"...*

# KAYNAKLAR


[1] R.P. Feynman, ***There's plenty of room at the bottom***, Resonance, Cilt:16, Sayı:9, Sayfa:890–905, (2011). doi:10.1007/s12045-011-0109-x.

[2] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Weibel, ***Tunneling through a controllable vacuum gap***, Applied Physics Letters, Cilt:40, Sayı:2, Sayfa:178–180, (1982). doi:10.1063/1.92999.

[3] G. Binnig, H. Rohrer, ***Scanning tunneling microscopy***, Surface Science, Cilt:126, Sayı:126, Sayfa:236–244, (1982). doi:10.1016/0039-6028(83)90716-1.

[4] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Weibel, ***Surface studies by scanning tunneling microscopy***, Physical Review Letters, Cilt:49, Sayı:1, Sayfa:57–61, (1982). doi:10.1103/PhysRevLett.49.57.

[5] G. Binnig, C. Quate, C. Gerber, ***Atomic Force Microscope***, Physical Review Letters, Cilt:56, Sayı:9, Sayfa:930–933, (1986). doi:10.1103/PhysRevLett.56.930.

[6] N. Taniguchi, ***On the basic concept of nanotechnology***, Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering, Sayfa:18–23, (1974). doi:10.1063/1.2836271.

[7] E. Drexler, ***Moleculer Machinery and Manufacturing with Applications to Computation***, Massachusetts Institute of Technology, 1991.

[8] D.M. Eigler, P.S. Weiss, E.K. Schweizer, N.D. Lang, ***Imaging Xe with a low-temperature scanning tunneling microscope***, Physical Review Letters, Cilt:66, Sayı:9, Sayfa:1189–1192, (1991). doi:10.1103/PhysRevLett.66.1189.

[9] H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, R.F. Curl, R.E. Smalley, ***C 60: buckminsterfullerene***, Nature, Cilt:318, Sayfa:162, (1985). doi:10.1038/318162a0.

[10] S. Iijima, ***Helical microtubules of graphitic carbon***, Nature, Cilt:354, Sayfa:56–58, (1991). doi:10.1038/354056a0.

[11] J.W. Mintmire, B.I. Dunlap, C.T. White, ***Are fullerene tubules metallic?***, Physical Review Letters, Cilt:68, Sayı:5, Sayfa:631–634, (1992).

doi:10.1103/PhysRevLett.68.631.

[12] D.S. Bethune, C.H. Klang, M.S. de Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez, R. Beyers, ***Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls***, Nature, Cilt:363, Sayı:6430, Sayfa:605–607, (1993). doi:10.1038/363605a0.

[13] L.-C. Qin, S. Iijima, ***Structure and formation of raft-like bundles of single-walled helical carbon nanotubes produced by laser evaporation***, Chemical Physics Letters, Cilt:269, Sayı:1–2, Sayfa:65–71, (1997). doi:10.1016/S0009-2614(97)00258-3.

[14] C.H. Kiang, W.A. Goddard, R. Beyers, D.S. Bethune, ***Carbon nanotubes with single-layer walls***, Carbon, Cilt:33, Sayı:7, Sayfa:903–914, (1995). doi:10.1016/0008-6223(95)00019-A.

[15] C.-H. Kiang, W. A. Goddard, R. Beyers, D.S. Bethune, ***Structural Modification of Single-Layer Carbon Nanotubes with an Electron Beam***, The Journal of Physical Chemistry, Cilt:100, Sayı:9, Sayfa:3749–3752, (1996). doi:10.1021/jp952636w.

[16] H. Tong-wei, H. Peng-fei, W. Jian, W. Ai-hui, ***Molecular dynamics simulation of a single graphene sheet under tension***, New Carbon Materials, Cilt:25, Sayı:4, Sayfa:261–266, (2010). doi:10.1016/j.carbon.2010.08.014.

[17] Y. Hancock, ***The 2010 Nobel Prize in physics—ground-breaking experiments on graphene***, Journal of Physics D: Applied Physics, Cilt:44, Sayı:47, Sayfa:473001, (2011). doi:10.1088/0022-3727/44/47/473001.

[18] J. Liu, M.J. Casavant, M. Cox, D. A. Walters, P. Boul, W. Lu, A.J. Rimberg, K. A. Smith, D.T. Colbert, R.E. Smalley, ***Controlled deposition of individual single-walled carbon nanotubes on chemically functionalized templates***, Chemical Physics Letters, Cilt:303, Sayı:1–2, Sayfa:125–129, (1999). doi:10.1016/S0009-2614(99)00209-2.

[19] L. Dong, B.J. Nelson, T. Fukuda, F. Arai, M. Nakajima, ***Towards linear nano servomotors with integrated position sensing***, in: Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 2005: pp. 855–860. doi:10.1109/ROBOT.2005.1570224.

[20] A R. Hall, S. Paulson, T. Cui, J.P. Lu, L.-C. Qin, S. Washburn, ***Torsional electromechanical systems based on carbon nanotubes***, Reports on Progress in Physics, Cilt:75, Sayı:11, Sayfa:116501, (2012). doi:10.1088/0034-4885/75/11/116501.

[21] X.M. Henry Huang, C.A. Zorman, M. Mehregany, M.L. Roukes, ***Nanoelectromechanical systems: Nanodevice motion at microwave frequencies***, Nature, Cilt:421, Sayı:6922, Sayfa:496, (2003). http://dx.doi.org/10.1038/421496a.

[22] H.G. Craighead, ***Nanoelectromechanical Systems***, Science, Cilt:290, Sayı:5496, Sayfa:1532–1535, (2000). doi:10.1126/science.290.5496.1532.

[23] B. Ilic, Y. Yang, H.G. Craighead, ***Virus detection using nanoelectromechanical devices***, Applied Physics Letters, Cilt:85, Sayı:13, Sayfa:2604, (2004). doi:10.1063/1.1794378.

[24] V. V Deshpande, H.-Y. Chiu, H.W.C. Postma, C. Mikó, L. Forró, M. Bockrath, ***Carbon nanotube linear bearing nanoswitches.***, Nano Letters, Cilt:6, Sayı:6, Sayfa:1092–5, (2006). doi:10.1021/nl052513f.

[25] B. Bourlon, D.C. Glattli, C. Miko, L. Forró, A. Bachtold, ***Carbon Nanotube Based Bearing for Rotational Motions***, Nano Letters, Cilt:4, Sayı:4, Sayfa:709–712, (2004). doi:10.1021/nl035217g.

[26] M.D. and S.V.R. and N.R. Aluru, ***Calculation of pull-in voltages for carbon-nanotube-based nanoelectromechanical switches***, Nanotechnology, Cilt:13, Sayı:1, Sayfa:120, (2002). http://stacks.iop.org/0957-4484/13/i=1/a=325.

[27] J. Peddieson, G.R. Buchanan, R.P. McNitt, Application of nonlocal continuum models to nanotechnology, in: Int. J. Eng. Sci., 2003: pp. 305–312. doi:10.1016/S0020-7225(02)00210-0.

[28] L.J. Sudak, ***Column buckling of multiwalled carbon nanotubes using nonlocal continuum mechanics***, Journal of Applied Physics, Cilt:94, Sayı:11, Sayfa:7281, (2003). doi:10.1063/1.1625437.

[29] Q. Wang, K.M. Liew, ***Application of nonlocal continuum mechanics to static analysis of micro- and nano-structures***, Physics Letters A, Cilt:363, Sayı:3, Sayfa:236–242, (2007). doi:10.1016/j.physleta.2006.10.093.

[30] J.N. Reddy, ***Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams***, International Journal of Engineering Science, Cilt:45, Sayı:2–8, Sayfa:288–307, (2007). doi:10.1016/j.ijengsci.2007.04.004.

[31] M. Aydogdu, ***A general nonlocal beam theory: Its application to nanobeam bending, buckling and vibration***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:41, Sayı:9, Sayfa:1651–1655, (2009). doi:10.1016/j.physe.2009.05.014.

[32] E. Ghavanloo, S. A. Fazelzadeh, ***Vibration characteristics of single-walled carbon nanotubes based on an anisotropic elastic shell model including chirality effect***, Applied Mathematical Modelling, Cilt:36, Sayı:10, Sayfa:4988–5000, (2012). doi:10.1016/j.apm.2011.12.036.

[33] S. A. M.A.M. Ghannadpour, B. Mohammadi, J. Fazilati, ***Bending, buckling and vibration problems of nonlocal Euler beams using Ritz method***, Composite Structures, Cilt:96, Sayfa:584–589, (2013). doi:10.1016/j.compstruct.2012.08.024.

[34] Y.-G. Hu, K.M. Liew, Q. Wang, ***Modeling of vibrations of carbon nanotubes***, Procedia Engineering, Cilt:31, Sayfa:343–347, (2012). doi:10.1016/j.proeng.2012.01.1034.

[35] K. Kiani, ***Longitudinal, transverse, and torsional vibrations and stabilities of axially moving single-walled carbon nanotubes***, Current Applied Physics, Cilt:13, Sayı:8, Sayfa:1651–1660, (2013). doi:10.1016/j.cap.2013.05.008.

[36] E. Ghavanloo, F. Daneshmand, M. Rafiei, ***Vibration and instability analysis of carbon nanotubes conveying fluid and resting on a linear viscoelastic Winkler foundation***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:42, Sayı:9, Sayfa:2218–2224, (2010). doi:10.1016/j.physe.2010.04.024.

[37] H.S. Shen, ***Nonlocal shear deformable shell model for postbuckling of axially compressed microtubules embedded in an elastic medium***, Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, Cilt:9, Sayı:3, Sayfa:345–357, (2010). doi:10.1007/s10237-009-0180-3.

[38] P. Soltani, M.M. Taherian, A. Farshidianfar, ***Vibration and instability of a viscous-fluid-conveying single-walled carbon nanotube embedded in a visco-elastic medium***, Journal of Physics D: Applied Physics, Cilt:43, Sayı:42, Sayfa:425401, (2010). doi:10.1088/0022-3727/43/42/425401.

[39] E. Ghavanloo, M. Rafiei, F. Daneshmand, ***In-plane vibration analysis of curved carbon nanotubes conveying fluid embedded in viscoelastic medium***, Physics Letters A, Cilt:375, Sayı:19, Sayfa:1994–1999, (2011). doi:10.1016/j.physleta.2011.03.025.

[40] Y.-X. Zhen, B. Fang, Y. Tang, ***Thermal–mechanical vibration and instability analysis of fluid-conveying double walled carbon nanotubes embedded in visco-elastic medium***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:44, Sayı:2, Sayfa:379–385, (2011). doi:10.1016/j.physe.2011.09.004.

[41] F. Daneshmand, ***Microtubule circumferential vibrations in cytosol.***, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of Engineering in Medicine, Cilt:226, Sayı:8, Sayfa:589–99, (2012). doi:10.1177/0954411912449945.

[42] M. Rafiei, S.R. Mohebpour, F. Daneshmand, ***Small-scale effect on the vibration of non-uniform carbon nanotubes conveying fluid and embedded in viscoelastic medium***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:44, Sayı:7–8, Sayfa:1372–1379, (2012). doi:10.1016/j.physe.2012.02.021.

[43] S.A. A. Ghorbanpour Arani, ***Nonlocal Vibration of Embedded Coupled CNTs Conveying Fluid Under Thermo-Magnetic Fields Via Ritz Method***, Journal of Solid Mechanics, Cilt:5, Sayı:2, Sayfa:206–215, (2013). http://en.journals.sid.ir/ViewPaper.aspx?ID=336254 (accessed March 17, 2015).

[44] M.A. Kazemi-Lari, E. Ghavanloo, S. Ahmad Fazelzadeh, ***Structural instability of carbon nanotubes embedded in viscoelastic medium and subjected to distributed tangential load***, Journal of Mechanical Science and Technology, Cilt:27, Sayı:7, Sayfa:2085–2091, (2013). doi:10.1007/s12206-013-0522-z.

[45] Y. Lei, S. Adhikari, M.I. Friswell, ***Vibration of nonlocal Kelvin-Voigt viscoelastic damped Timoshenko beams***, International Journal of Engineering Science, Cilt:66–67, Sayfa:1–13, (2013). doi:10.1016/j.ijengsci.2013.02.004.

[46] Y.-Z. Wang, F.-M. Li, ***Nonlinear free vibration of nanotube with small scale effects embedded in viscous matrix***, Mechanics Research Communications, Cilt:60, Sayfa:45–51, (2014). doi:10.1016/j.mechrescom.2014.06.002.

[47] M. Pang, Y.Q. Zhang, W.Q. Chen, ***Transverse wave propagation in viscoelastic single-walled carbon nanotubes with small scale and surface effects***, Journal of Applied Physics, Cilt:117, Sayı:2, Sayfa:24305, (2015). doi:10.1063/1.4905852.

[48] F. Daneshmand, ***Combined strain-inertia gradient elasticity in free vibration shell analysis of single walled carbon nanotubes using shell theory***, Applied Mathematics and Computation, Cilt:243, Sayfa:856–869, (2014). doi:10.1016/j.amc.2014.05.094.

[49] D. Karličić, M. Cajić, T. Murmu, S. Adhikari, ***Nonlocal longitudinal vibration of viscoelastic coupled double-nanorod systems***, European Journal of Mechanics - A/Solids, Cilt:49, Sayfa:183–196, (2015). doi:10.1016/j.euromechsol.2014.07.005.

[50] M. Rezaee, V. A. Maleki, ***An analytical solution for vibration analysis of***

***carbon nanotube conveying viscose fluid embedded in visco-elastic medium***, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Cilt:229, Sayı:4, Sayfa:644–650, (2014). doi:10.1177/0954406214538011.

[51] A. Ghorbanpour Arani, H. Vossough, R. Kolahchi, ***Nonlinear vibration and instability of a visco-Pasternak coupled double-DWBNNTs-reinforced microplate system conveying microflow***, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Cilt:0, Sayı:0, Sayfa:1–17, (2015). doi:10.1177/0954406215569587.

[52] A. Ghorbanpour Arani, M. A. Roudbari, ***Nonlocal piezoelastic surface effect on the vibration of visco-Pasternak coupled boron nitride nanotube system under a moving nanoparticle***, Thin Solid Films, Cilt:542, Sayfa:232–241, (2013). doi:10.1016/j.tsf.2013.06.025.

[53] X.Q. He, S. Kitipornchai, K.M. Liew, ***Buckling analysis of multi-walled carbon nanotubes: a continuum model accounting for van der Waals interaction***, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Cilt:53, Sayı:2, Sayfa:303–326, (2005). doi:10.1016/j.jmps.2004.08.003.

[54] Y. Kimoto, H. Mori, T. Mikami, S. Akita, Y. Nakayama, K. Higashi, Y. Hirai, ***Molecular Dynamics Study of Double-Walled Carbon Nanotubes for Nano-Mechanical Manipulation***, Japanese Journal of Applied Physics, Cilt:44, Sayı:4R, Sayfa:1641, (2005). doi:10.1143/JJAP.44.1641.

[55] C.Y. Wang, Y. Zhao, S. Adhikari, Y.T. Feng, ***Vibration of Axially Strained Triple-Wall Carbon Nanotubes***, Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Cilt:7, Sayı:10, Sayfa:2176–2185, (2010). doi:10.1166/jctn.2010.1601.

[56] M. Aydogdu, ***A nonlocal rod model for axial vibration of double-walled carbon nanotubes including axial van der Waals force effects***, Journal of Vibration and Control, Sayfa:1077546313518954-, (2014). doi:10.1177/1077546313518954.

[57] L. Wang, H. Hu, ***Flexural wave propagation in single-walled carbon nanotubes***, Phys. Rev. B, Cilt:71, Sayı:19, Sayfa:195412, (2005). doi:10.1103/PhysRevB.71.195412.

[58] W.H. Duan, C.M. Wang, Y.Y. Zhang, ***Calibration of nonlocal scaling effect parameter for free vibration of carbon nanotubes by molecular dynamics***, Journal of Applied Physics, Cilt:101, Sayı:2, Sayfa:24305, (2007).

doi:10.1063/1.2423140.

[59] Q. Wang, C.M. Wang, ***The constitutive relation and small scale parameter of nonlocal continuum mechanics for modelling carbon nanotubes***, Nanotechnology, Cilt:18, Sayı:7, Sayfa:75702, (2007). doi:10.1088/0957-4484/18/7/075702.

[60] Q. Wang, V.K. Varadan, ***Application of nonlocal elastic shell theory in wave propagation analysis of carbon nanotubes***, Smart Materials and Structures, Cilt:16, Sayı:1, Sayfa:178–190, (2007). doi:10.1088/0964-1726/16/1/022.

[61] E.C. Aifantis, ***Exploring the applicability of gradient elasticity to certain micro/nano reliability problems***, Microsystem Technologies, Cilt:15, Sayı:1 SPEC. ISS., Sayfa:109–115, (2009). doi:10.1007/s00542-008-0699-8.

[62] H. Askes, E.C. Aifantis, ***Gradient elasticity and flexural wave dispersion in carbon nanotubes***, Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, Cilt:80, Sayı:19, (2009). doi:10.1103/PhysRevB.80.195412.

[63] C.W. Lim, Y. Yang, ***Wave propagation in carbon nanotubes: nonlocal elasticity-induced stiffness and velocity enhancement effects***, Journal of Mechanics of Materials and Structures, Cilt:5, Sayı:3, Sayfa:459–476, (2010). doi:10.2140/jomms.2010.5.459.

[64] J. Song, J. Shen, X.F. Li, ***Effects of initial axial stress on waves propagating in carbon nanotubes using a generalized nonlocal model***, Computational Materials Science, Cilt:49, Sayfa:518–523, (2010). doi:10.1016/j.commatsci.2010.05.043.

[65] B. Yakaiah, A. Srihari Rao, ***Higher order nonlocal strain gradient approach for wave characteristics of carbon nanorod***, Nonlinear Analysis: Modelling and Control, Cilt:19, Sayı:4, Sayfa:660–668, (2014). doi:10.15388/NA.2014.4.10.

[66] Y. Huang, Q.-Z.Z. Luo, X.-F.F. Li, ***Transverse waves propagating in carbon nanotubes via a higher-order nonlocal beam model***, Composite Structures, Cilt:95, Sayfa:328–336, (2013). doi:10.1016/j.compstruct.2012.07.038.

[67] B. Wang, Z. Deng, H. Ouyang, J. Zhou, ***Wave propagation analysis in nonlinear curved single-walled carbon nanotubes based on nonlocal elasticity theory***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:66, Sayfa:283–292, (2015). doi:10.1016/j.physe.2014.09.015.

[68] J. Yoon, C.Q. Ru, A. Mioduchowski, ***Sound wave propagation in multiwall carbon nanotubes***, Journal of Applied Physics, Cilt:93, Sayı:8, Sayfa:4801–4806, (2003). doi:10.1063/1.1559932.

[69] J. Yoon, C.Q. Ru, A. Mioduchowski, ***Timoshenko-beam effects on transverse wave propagation in carbon nanotubes***, Composites Part B: Engineering, Cilt:35, Sayfa:87–93, (2004). doi:10.1016/j.compositesb.2003.09.002.

[70] Q. Wang, ***Wave propagation in carbon nanotubes via nonlocal continuum mechanics***, Journal of Applied Physics, Cilt:98, Sayı:12, Sayfa:124301, (2005). doi:10.1063/1.2141648.

[71] H. Cai, X. Wang, ***Effects of initial stress on transverse wave propagation in carbon nanotubes based on Timoshenko laminated beam models***, Nanotechnology, Cilt:17, Sayfa:45–53, (2005). doi:10.1088/0957-4484/17/1/009.

[72] K. Dong, X. Wang, ***Wave propagation in carbon nanotubes under shear deformation***, Nanotechnology, Cilt:17, Sayı:11, Sayfa:2773–2782, (2006). doi:10.1088/0957-4484/17/11/009.

[73] Q. Wang, G.Y.Y. Zhou, K.C.C. Lin, ***Scale effect on wave propagation of double-walled carbon nanotubes***, International Journal of Solids and Structures, Cilt:43, Sayı:20, Sayfa:6071–6084, (2006). doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.11.005.

[74] L. Wang, W. Guo, H. Hu, ***Group velocity of wave propagation in carbon nanotubes***, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Cilt:464, Sayı:January, Sayfa:1423–1438, (2008). doi:10.1098/rspa.2007.0349.

[75] K. Dong, S.Q. Zhu, X. Wang, ***Wave propagation in multiwall carbon nanotubes embedded in a matrix material***, Composite Structures, Cilt:82, Sayfa:1–9, (2008). doi:10.1016/j.compstruct.2006.11.003.

[76] M.M. Selim, S. Abe, K. Harigaya, ***Effects of initial compression stress on wave propagation in carbon nanotubes***, European Physical Journal B, Cilt:69, Sayfa:523–528, (2009). doi:10.1140/epjb/e2009-00184-5.

[77] M.M. Selim, ***Dispersion of dilatation wave propagation in single-wall carbon nanotubes using nonlocal scale effects***, Journal of Nanoparticle Research, Cilt:13, Sayfa:1229–1235, (2011). doi:10.1007/s11051-010-0116-y.

[78] S. Narendar, S. Gopalakrishnan, ***Nonlocal scale effects on wave propagation in multi-walled carbon nanotubes***, Computational Materials Science, Cilt:47, Sayı:2, Sayfa:526–538, (2009). doi:10.1016/j.commatsci.2009.09.021.

[79] Y. Yang, L. Zhang, C.W. Lim, ***Wave propagation in double-walled carbon nanotubes on a novel analytically nonlocal Timoshenko-beam model***, Journal of Sound and Vibration, Cilt:330, Sayı:8, Sayfa:1704–1717, (2011).

doi:10.1016/j.jsv.2010.10.028.

[80] M. Aydogdu, ***Longitudinal wave propagation in nanorods using a general nonlocal unimodal rod theory and calibration of nonlocal parameter with lattice dynamics***, International Journal of Engineering Science, Cilt:56, Sayfa:17–28, (2012). doi:10.1016/j.ijengsci.2012.02.004.

[81] M. Aydogdu, ***Longitudinal wave propagation in multiwalled carbon nanotubes***, Composite Structures, Cilt:107, Sayfa:578–584, (2014). doi:10.1016/j.compstruct.2013.08.031.

[82] K.M. Liew, Q. Wang, ***Analysis of wave propagation in carbon nanotubes via elastic shell theories***, International Journal of Engineering Science, Cilt:45, Sayfa:227–241, (2007). doi:10.1016/j.ijengsci.2007.04.001.

[83] K. Dong, X. Wang, ***Wave propagation in carbon nanotubes embedded in an elastic matrix***, Archive of Applied Mechanics, Cilt:77, Sayı:8, Sayfa:575–586, (2007). doi:10.1007/s00419-007-0113-5.

[84] A. Chakraborty, M.S. Sivakumar, S. Gopalakrishnan, ***Spectral element based model for wave propagation analysis in multi-wall carbon nanotubes***, International Journal of Solids and Structures, Cilt:43, Sayfa:279–294, (2006). doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.03.044.

[85] Y. Gafour, M. Zidour, A. Tounsi, H. Heireche, A. Semmah, ***Sound wave propagation in zigzag double-walled carbon nanotubes embedded in an elastic medium using nonlocal elasticity theory***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:48, Sayfa:118–123, (2013). doi:10.1016/j.physe.2012.11.006.

[86] H. Heireche, A. Tounsi, A. Benzair, M. Maachou, E. A. Adda Bedia, ***Sound wave propagation in single-walled carbon nanotubes using nonlocal elasticity***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:40, Sayfa:2791–2799, (2008). doi:10.1016/j.physe.2007.12.021.

[87] Z. Huiling, Y. Xiaochun, ***Guided circumferential waves in double-walled carbon nanotubes***, Acta Mechanica Solida Sinica, Cilt:20, Sayı:2, Sayfa:110–116, (2007). doi:10.1007/s10338-007-0713-1.

[88] Z.M. Islam, P. Jia, C.W. Lim, ***Torsional Wave Propagation and Vibration of Circular Nanostructures Based on Nonlocal Elasticity Theory***, International Journal of Applied Mechanics, Cilt:6, Sayı:2, Sayfa:1450011, (2014). doi:10.1142/S1758825114500112.

[89] M. Taj, J. Zhang, ***Analysis of wave propagation in orthotropic microtubules embedded within elastic medium by Pasternak model.***, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Cilt:30, Sayfa:300–5, (2014). doi:10.1016/j.jmbbm.2013.11.011.

[90] T. Natsuki, Q.-Q. Ni, M. Endo, ***Vibrational analysis of fluid-filled carbon nanotubes using the wave propagation approach***, Applied Physics A, Cilt:90, Sayfa:441–445, (2008). doi:10.1007/s00339-007-4297-x.

[91] S.T. Talebian, M. Tahani, S.M. Hosseini, M.H. Abolbashari, ***Displacement time history analysis and radial wave propagation velocity in pressurized multiwall carbon nanotubes***, Computational Materials Science, Cilt:49, Sayı:2, Sayfa:283–292, (2010). doi:10.1016/j.commatsci.2010.05.008.

[92] L. Wei, Y.-N. Wang, ***Electromagnetic wave propagation in single-wall carbon nanotubes***, Physics Letters A, Cilt:333, Sayfa:303–309, (2004). doi:10.1016/j.physleta.2004.10.048.

[93] M.J. Hao, X.M. Guo, Q. Wang, ***Small-scale effect on torsional buckling of multi-walled carbon nanotubes***, European Journal of Mechanics, A/Solids, Cilt:29, Sayı:1, Sayfa:49–55, (2010). doi:10.1016/j.euromechsol.2009.05.008.

[94] A. Besseghier, A. Tounsi, M.S.A. Houari, A. Benzair, L. Boumia, H. Heireche, ***Thermal effect on wave propagation in double-walled carbon nanotubes embedded in a polymer matrix using nonlocal elasticity***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:43, Sayı:7, Sayfa:1379–1386, (2011). doi:10.1016/j.physe.2011.03.008.

[95] R.M.H. Khorasany, S.G. Hutton, ***Effect of temperature and geometrical nonlinearity on wave propagation characteristics of carbon nanotubes***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:44, Sayı:1, Sayfa:87–96, (2011). doi:10.1016/j.physe.2011.07.011.

[96] L. Chico, V. Crespi, L. Benedict, S. Louie, M. Cohen, ***Pure Carbon Nanoscale Devices: Nanotube Heterojunctions***, Physical Review Letters, Cilt:76, Sayı:6, Sayfa:971–974, (1996). doi:10.1103/PhysRevLett.76.971.

[97] D.B. Romero, M. Carrard, W. De Heer, L. Zuppiroli, ***A carbon nanotube/organic semiconducting polymer heterojunction***, Advanced Materials, Cilt:8, Sayı:11, Sayfa:899–902, (1996). doi:10.1002/adma.19960081105.

[98] Z. Yao, H.W.C. Postma, L. Balents, C. Dekker, ***Carbon nanotube***

***intramolecular junctions***, Nature, Cilt:402, Sayı:6759, Sayfa:273–276, (1999). doi:10.1038/46241.

[99] J.T. Hu, M. Ouyang, P.D. Yang, C.M. Lieber, ***Controlled growth and electrical properties of heterojunctions of carbon nanotubes and silicon nanowires***, Nature, Cilt:399, Sayı:6731, Sayfa:48–51, (1999). doi:10.1038/19941.

[100] Y. Zhang, T. Ichihashi, E. Landree, F. Nihey, S. Iijima, ***Heterostructures of Single-Walled Carbon Nanotubes and Carbide Nanorods***, Science, Cilt:285, Sayı:5434, Sayfa:1719–1722, (1999). doi:10.1126/science.285.5434.1719.

[101] G. Treboux, P. Lapstun, K. Silverbrook, ***An Intrinsic Carbon Nanotube Heterojunction Diode***, Journal of Physical Chemistry B, Cilt:103, Sayı:11, Sayfa:1871–1875, (1999). doi:10.1021/jp983639m.

[102] M. Ferreira, T. Dargam, R. Muniz, A. Latgé, ***Local electronic properties of carbon nanotube heterojunctions***, Physical Review B, Cilt:62, Sayı:23, Sayfa:40–45, (2000). doi:10.1103/PhysRevB.62.16040.

[103] A.A. Odintsov, ***Schottky barriers in carbon nanotube heterojunctions***, Physical Review Letters, Cilt:85, Sayı:1, Sayfa:150–153, (2000). doi:10.1103/PhysRevLett.85.150.

[104] J. Kim, J.-O. Lee, H. Oh, K.-H. Yoo, J.-J. Kim, ***Temperature dependence of the current-voltage characteristics of a carbon-nanotube heterojunction***, Physical Review B, Cilt:64, Sayı:16, Sayfa:161404, (2001). doi:10.1103/PhysRevB.64.161404.

[105] Y. Zhang, S. Iijima, ***Method of forming a heterojunction of a carbon nanotube and a different material, method of working a filament of a nanotube***, 2001. https://www.google.com/patents/US6203864.

[106] A N. Andriotis, M. Menon, D. Srivastava, L. Chernozatonskii, ***Rectification properties of carbon nanotube "Y-junctions".***, Physical Review Letters, Cilt:87, Sayı:6, Sayfa:66802, (2001). doi:10.1103/PhysRevLett.87.066802.

[107] A. Andriotis, M. Menon, D. Srivastava, L. Chernozatonskii, ***Transport properties of single-wall carbon nanotube Y junctions***, Physical Review B, Cilt:65, Sayı:16, Sayfa:1–13, (2002). doi:10.1103/PhysRevB.65.165416.

[108] A.M. Cassell, J. Li, R.M.D. Stevens, J.E. Koehne, L. Delzeit, H.T. Ng, Q. Ye, J. Han, M. Meyyappan, ***Vertically aligned carbon nanotube heterojunctions***, Applied Physics Letters, Cilt:85, Sayı:12, Sayfa:2364–2366, (2004). doi:10.1063/1.1794356.

[109] M.P. Anantram, F. Léonard, ***Physics of carbon nanotube electronic devices***, Reports on Progress in Physics, Cilt:69, Sayı:3, Sayfa:507–561, (2006). doi:10.1088/0034-4885/69/3/R01.

[110] J. Luo, J. Zhu, ***Arrays of one-dimensional metal/silicon and metal/carbon nanotube heterojunctions***, Nanotechnology, Cilt:17, Sayı:11, Sayfa:S262–S270, (2006). doi:10.1088/0957-4484/17/11/s06.

[111] J.L. Sun, J. Wei, J.L. Zhu, D. Xu, X. Liu, H. Sun, D.H. Wu, N. Le Wu, ***Photoinduced currents in carbon nanotube/metal heterojunctions***, Applied Physics Letters, Cilt:88, Sayı:13, Sayfa:1–4, (2006). doi:10.1063/1.2189454.

[112] X.F. Li, K.Q. Chen, L. Wang, M.Q. Long, B.S. Zou, Z. Shuai, ***Effect of length and size of heterojunction on the transport properties of carbon-nanotube devices***, Applied Physics Letters, Cilt:91, Sayı:13, Sayfa:5–8, (2007). doi:10.1063/1.2790839.

[113] L. Liao, K. Liu, W. Wang, X. Bai, E. Wang, Y. Liu, J. Li, C. Liu, ***Multiwall Boron Carbonitride/Carbon Nanotube Junction and Its Rectification Behavior***, Journal of the American Chemical Society, Cilt:129, Sayı:31, Sayfa:9562–9563, (2007). doi:10.1021/ja072861e.

[114] H. Yu, X. Quan, S. Chen, H. Zhao, ***TiO2-multiwalled carbon nanotube heterojunction arrays and their charge separation capability***, Journal of Physical Chemistry C, Cilt:111, Sayı:35, Sayfa:12987–12991, (2007). doi:10.1021/jp0728454.

[115] Y. Jia, J. Wei, K. Wang, A. Cao, Q. Shu, X. Gui, Y. Zhu, D. Zhuang, G. Zhang, B. Ma, L. Wang, W. Liu, Z. Wang, J. Luo, D. Wu, ***Nanotube-silicon heterojunction solar cells***, Advanced Materials, Cilt:20, Sayı:23, Sayfa:4594–4598, (2008). doi:10.1002/adma.200801810.

[116] S. Filiz, M. Aydogdu, ***Axial vibration of carbon nanotube heterojunctions using nonlocal elasticity***, Computational Materials Science, Cilt:49, Sayı:3, Sayfa:619–627, (2010). doi:10.1016/j.commatsci.2010.06.003.

[117] A. G. Arani, R. Kolahchi, ***Exact solution for nonlocal axial buckling of linear carbon nanotube hetero-junctions***, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Cilt:228, Sayı:2, Sayfa:366–377, (2013). doi:10.1177/0954406213483647.

[118] Y.-G. Hu, K.M. Liew, Q. Wang, X.Q. He, B.I. Yakobson, ***Nonlocal shell model for elastic wave propagation in single- and double-walled carbon nanotubes***,

Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Cilt:56, Sayı:12, Sayfa:3475–3485, (2008). doi:10.1016/j.jmps.2008.08.010.

[119] M.M. Selim, ***Torsional vibration of carbon nanotubes under initial compression stress***, Brazilian Journal of Physics, Cilt:40, Sayı:3, Sayfa:283–287, (2010). http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-97332010000300004&nrm=iso.

[120] H.S. Shen, C.L. Zhang, ***Torsional buckling and postbuckling of double-walled carbon nanotubes by nonlocal shear deformable shell model***, Composite Structures, Cilt:92, Sayı:5, Sayfa:1073–1084, (2010). doi:10.1016/j.compstruct.2009.10.002.

[121] B. Gheshlaghi, S.M. Hasheminejad, S. Abbasion, ***Size dependent torsional vibration of nanotubes***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:43, Sayı:1, Sayfa:45–48, (2010). doi:10.1016/j.physe.2010.06.015.

[122] T. Murmu, S. Adhikari, C.Y. Wang, ***Torsional vibration of carbon nanotube–buckyball systems based on nonlocal elasticity theory***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:43, Sayı:6, Sayfa:1276–1280, (2011). doi:10.1016/j.physe.2011.02.017.

[123] S. Narendar, S. Gopalakrishnan, ***Nonlocal wave propagation in rotating nanotube***, Results in Physics, Cilt:1, Sayı:1, Sayfa:17–25, (2011). doi:10.1016/j.rinp.2011.06.002.

[124] C. Li, C.W. Lim, J. Yu, ***Twisting statics and dynamics for circular elastic nanosolids by nonlocal elasticity theory***, Acta Mechanica Solida Sinica, Cilt:24, Sayfa:484–494, (2011). doi:10.1016/S0894-9166(11)60048-7.

[125] S. Narendar, ***Spectral finite element and nonlocal continuum mechanics based formulation for torsional wave propagation in nanorods***, Finite Elements in Analysis and Design, Cilt:62, Sayfa:65–75, (2012). doi:10.1016/j.finel.2012.06.012.

[126] C.W. Lim, C. Li, J.L. Yu, ***Free torsional vibration of nanotubes based on nonlocal stress theory***, Journal of Sound and Vibration, Cilt:331, Sayı:12, Sayfa:2798–2808, (2012). doi:10.1016/j.jsv.2012.01.016.

[127] F. Khademolhosseini, A.S. Phani, A. Nojeh, N. Rajapakse, ***Nonlocal continuum modeling and molecular dynamics simulation of torsional vibration of carbon nanotubes***, IEEE Transactions on Nanotechnology, Cilt:11, Sayı:1, Sayfa:34–43,

(2012). doi:10.1109/TNANO.2011.2111380.

[128] Ç. Demir, Ö. Civalek, ***Torsional and longitudinal frequency and wave response of microtubules based on the nonlocal continuum and nonlocal discrete models***, Applied Mathematical Modelling, Cilt:37, Sayı:22, Sayfa:9355–9367, (2013). doi:10.1016/j.apm.2013.04.050.

[129] K.I. Tserpes, N. Silvestre, ***Modeling of Carbon Nanotubes, Graphene and their Composites***, Springer, 2013. https://books.google.com.tr/books?id=8eW5BAAAQBAJ.

[130] S. Gopalakrishnan, S. Narendar, ***Wave Propagation in Nanostructures - Nonlocal Continuum Mechanics Formulations***, Springer International Publishing, 2013. doi:10.1007/978-3-319-01032-8.

[131] I. Elishakoff, ***Carbon Nanotubes and Nanosensors: Vibration, Buckling and Balistic Impact***, Wiley, 2013. https://books.google.com.tr/books?id=_7jf-j8lZxUC.

[132] T. Murmu, S. Adhikari, D. Karlicic, M. McCarthy, ***Non-local Structural Mechanics***, Wiley, 2016. https://books.google.com.tr/books?id=9DPvCQAAQBAJ.

[133] A.C. Eringen, ***Nonlocal Continuum Field Theories***, Springer New York, 2007. https://books.google.com.tr/books?id=RbwPEe88CNIC.

[134] D.G.B. Edelen, ***Part II – Nonlocal Field Theories, in: Contin. Phys.***, 1976: pp. 75–204. doi:10.1016/B978-0-12-240804-5.50008-7.

[135] A.C. Eringen, C.B. Kafadar, ***Part I – Polar Field Theories, in: Contin. Phys.***, 1976: pp. 1–73. doi:10.1016/B978-0-12-240804-5.50007-5.

[136] A.C. Eringen, ***Part III – Nonlocal Polar Field Theories, in: Contin. Phys.***, 1976: pp. 205–267. doi:10.1016/B978-0-12-240804-5.50009-9.

[137] J.A. Krumhansl, ***Generalized continuum field representations for lattice vibrations***, DTIC Document, 1964.

[138] J. Krumhansl, ***Some considerations of the relation between solid state physics and generalized continuum mechanics***, Mechanics of Generalized Continua. IUTAM Symposia. Springer Berlin Heidelberg, Sayfa:298–311, (1968).

[139] E. Kröner, B.K. Datta, ***Nichtlokale Elastostatik: Ableitung aus der Gittertheorie***, Zeitschrift Für Physik, Cilt:196, Sayı:3, Sayfa:203–211, (1966). doi:10.1007/BF01330987.

[140] I.. Kunin, ***Model of an elastic medium of simple structure with three-***

***dimensional dispersion***, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Cilt:30, Sayı:3, Sayfa:642–652, (1967). doi:10.1016/0021-8928(67)90101-3.

[141] A.C. Eringen, ***A unified theory of thermomechanical materials***, International Journal of Engineering Science, Cilt:4, Sayı:2, Sayfa:179–202, (1966). doi:10.1016/0020-7225(66)90022-x.

[142] A.C. Eringen, ***Linear theory of micropolar elasticity***, DTIC Document, 1965.

[143] A.C. Eringen, D.G.B. Edelen, ***On nonlocal elasticity***, International Journal of Engineering Science, Cilt:10, Sayı:3, Sayfa:233–248, (1972). doi:10.1016/0020-7225(72)90039-0.

[144] A.C. Eringen, ***On nonlocal fluid mechanics***, International Journal of Engineering Science, Cilt:10, Sayı:6, Sayfa:561–575, (1972). doi:10.1016/0020-7225(72)90098-5.

[145] A.C. Eringen, ***Linear theory of nonlocal elasticity and dispersion of plane waves***, International Journal of Engineering Science, Cilt:10, Sayı:5, Sayfa:425–435, (1972). doi:10.1016/0020-7225(72)90050-X.

[146] A.C. Eringen, B.S. Kim, ***On the Problem of Crack Tip in Nonlocal Elasticity***, in: Contin. Mech. Asp. Geodyn. Rock Fract. Mech., Springer Netherlands, Dordrecht, 1974: pp. 107–113. doi:10.1007/978-94-010-2268-2_8.

[147] A. Cemal Eringen, B.S. Kim, ***Stress concentration at the tip of crack***, Mechanics Research Communications, Cilt:1, Sayı:4, Sayfa:233–237, (1974). doi:10.1016/0093-6413(74)90070-6.

[148] V. Sundararaghavan, A. Waas, ***Non-local continuum modeling of carbon nanotubes: Physical interpretation of non-local kernels using atomistic simulations***, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Cilt:59, Sayı:6, Sayfa:1191–1203, (2011). doi:10.1016/j.jmps.2011.03.009.

[149] C. Polizzotto, ***Nonlocal elasticity and related variational principles***, International Journal of Solids and Structures, Cilt:38, Sayı:42–43, Sayfa:7359–7380, (2001). doi:10.1016/S0020-7683(01)00039-7.

[150] A.C. Eringen, ***On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves***, Journal of Applied Physics, Cilt:54, Sayı:9, Sayfa:4703–4710, (1983). doi:10.1063/1.332803.

[151] T. Murmu, S. Adhikari, C.Y.Y. Wang, ***Torsional vibration of carbon nanotube–buckyball systems based on nonlocal elasticity theory***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:43, Sayı:6, Sayfa:1276–1280,

(2011). doi:10.1016/j.physe.2011.02.017.

[152] M. Arda, M. Aydogdu, ***Torsional statics and dynamics of nanotubes embedded in an elastic medium***, Composite Structures, Cilt:114, Sayı:1, Sayfa:80–91, (2014). doi:10.1016/j.compstruct.2014.03.053.

[153] J.N. Reddy, ***Energy Principles and Variational Methods in Applied Mechanics***, Wiley, 2002. https://books.google.com.tr/books?id=3gw5rxLQdaQC.

[154] S. Adali, ***Variational principles for buckling of microtubules modeled as nonlocal orthotropic shells***, Computational and Mathematical Methods in Medicine, Cilt:2014, (2014). doi:10.1155/2014/591532.

[155] S. Adali, ***Variational Principles for Nonlocal Continuum Model of Orthotropic Graphene Sheets Embedded in An Elastic Medium***, Acta Mathematica Scientia, Cilt:32, Sayı:1, Sayfa:325–338, (2012). doi:10.1016/S0252-9602(12)60020-4.

[156] S. Adali, ***Variational Principles for Transversely Vibrating Multiwalled Carbon Nanotubes Based on Nonlocal Euler−Bernoulli Beam Model***, Nano Letters, Cilt:9, Sayı:5, Sayfa:1737–1741, (2009). doi:10.1021/nl8027087.

[157] S. Adali, ***Variational principles for multi-walled carbon nanotubes undergoing buckling based on nonlocal elasticity theory***, Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics, Cilt:372, Sayı:35, Sayfa:5701–5705, (2008). doi:10.1016/j.physleta.2008.07.003.

[158] M. Aydogdu, ***Axial vibration of the nanorods with the nonlocal continuum rod model***, Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, Cilt:41, Sayı:5, Sayfa:861–864, (2009). doi:10.1016/j.physe.2009.01.007.

[159] S. Bandow, S. Asaka, Y. Saito, A. Rao, L. Grigorian, E. Richter, P. Eklund, ***Effect of the Growth Temperature on the Diameter Distribution and Chirality of Single-Wall Carbon Nanotubes***, Physical Review Letters, Cilt:80, Sayfa:3779–3782, (1998). doi:10.1103/PhysRevLett.80.3779.

[160] C. Li, T.-W. Chou, ***A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes***, International Journal of Solids and Structures, Cilt:40, Sayı:10, Sayfa:2487–2499, (2003). doi:10.1016/S0020-7683(03)00056-8.

[161] C.Y. Wang, L.C. Zhang, ***A critical assessment of the elastic properties and effective wall thickness of single-walled carbon nanotubes.***, Nanotechnology, Cilt:19, Sayı:7, Sayfa:75705, (2008). doi:10.1088/0957-4484/19/7/075705.

[162] L.-C. Qin, ***Determination of the chiral indices (n,m) of carbon nanotubes by electron diffraction.***, Physical Chemistry Chemical Physics : PCCP, Cilt:9,

Sayı:1, Sayfa:31–48, (2007). doi:10.1039/b614121h.

[163] C. Laurent, E. Flahaut, A. Peigney, ***The weight and density of carbon nanotubes versus the number of walls and diameter***, Carbon, Cilt:48, Sayı:10, Sayfa:2994–2996, (2010). doi:10.1016/j.carbon.2010.04.010.

[164] C.Q. Ru, ***Elastic models for carbon nanotubes***, in: Encycl. Nanosci. Nanotechnol., American Scientific Publishers, 2004: pp. 731–744.

[165] M. Arda, M. Aydogdu, ***Analysis of Free Torsional Vibration in Carbon Nanotubes Embedded in a Viscoelastic Medium***, Advances in Science and Technology Research Journal, Cilt:9, Sayı:26, Sayfa:28–33, (2015). doi:10.12913/22998624/2361.

[166] M. Aydogdu, M. Arda, ***Torsional vibration analysis of double walled carbon nanotubes using nonlocal elasticity***, International Journal of Mechanics and Materials in Design, Sayı:2005, (2014). doi:10.1007/s10999-014-9292-8.

[167] M. Arda, M. Aydogdu, ***Torsional wave propagation in multiwalled carbon nanotubes using nonlocal elasticity***, Applied Physics A, Cilt:122, Sayı:3, Sayfa:219, (2016). doi:10.1007/s00339-016-9751-1.

# ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ARDA, 1987 yılında Zonguldak'ta doğdu. İlk ve Orta Öğrenimini Zonguldak'ta tamamladı. 2001 yılında girdiği Zonguldak Fen Lisesi'nden 2004 yılında mezun oldu. Lisans öğrenimini Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde 2004-2009 yılları arasında tamamladı. Yüksek lisansını Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 2012 yılında bitirdi. Aynı yıl Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora öğrenimine başladı. 2010 yılı Ekim ayında atandığı Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi kadrosunda halen çalışmaya devam etmektedir.

# TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

## 1) SCI-SSCI veya SCI Expanded Kapsamındaki Yayınları

- ARDA, M., AYDOGDU, M., "Torsional wave propagation in multiwalled carbon nanotubes using nonlocal elasticity", Applied Physics A Materials Science & Processing, Volume:122, Issue:3, Page:219, 2016. DOI: 10.1007/s00339-016-9751-1 (Mart 2016)
- AYDOGDU, M., ARDA, M., "Torsional vibration analysis of double walled carbon nanotubes using nonlocal elasticity", International Journal of Mechanics and Materials in Design,Volume:12, Issue:1, Page: 71-84. DOI: 10.1007/s10999-014-9292-8 (Mart 2016)
- ARDA, M., AYDOGDU, M., "Torsional statics and dynamics of nanotubes embedded in an elastic medium", Composite Structures, Volume: 114, Pages: 80–91, August 2014. DOI:10.1016/j.compstruct.2014.03.053 (Ağustos 2014)

## 2) Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

- AYDOGDU, M.; ARDA, M., "Forced vibration of nanorods using nonlocal elasticity", Advances in Nano Research, Vol: 4, No: 4, Page: 265-279, 2016. DOI: 10.12989/anr.2016.4.4.265 (Aralık 2016)
- ARDA, M., AYDOGDU, M. "Bending of CNTs Under The Partial Uniform Load", International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS), Volume:8, Issue:2, Page:21-29, 2016. (Eylül 2016)
- ARDA, M., AYDOGDU, M. "Analysis of Free Torsional Vibration in Carbon Nanotubes Embedded in a Viscoelastic Medium", Advances in Science and Technology Research Journal, Volume:9, Issue:26, Page:28-33, 2015. DOI: 10.12913/22998624/2361 (Mayıs 2015)

**3) Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler (Proceedings)**

- ARDA, M., AYDOGDU, M., "Torsional Wave Propagation of CNTs via Different Nonlocal Gradient Theories", The 23rd International Congress on Sound and Vibration (ICSV23), 10-14 July 2016, Athens. (Temmuz 2016)

**4) Uluslararası Konferans ve Sempozyumlar**

- ARDA, M., AYDOGDU, M. "ARDA, M., AYDOGDU, M. " Analysis of Free Torsional Vibration in Carbon Nanotubes Embedded in a Viscoelastic Medium", 6th International Advance in Manufacturing and Machine Designing Symposium (MSN2015), 20-22 May 2015, Naleczow/POLAND. (Mayıs 2015)
- AYDOGDU, M., ARDA, M., "Forced Vibration of Nanorods Using Nonlocal Elasticity", International Conference on Advances in Composite Materials and Structures (CACMS2015), 13-15 April 2015, Istanbul. (Nisan 2015)
- ARDA, M., AYDOGDU, M., " Torsional wave propagation in multiwalled carbon nanotubes using nonlocal elasticity", International Conference on Advances in Composite Materials and Structures (CACMS2015), 13-15 April 2015, Istanbul. (Nisan 2015)