



**DEFORME OLABİLİR SINIR KOŞULLARINDA  
KARBON NANOTÜPLERİN DOUBLET MEKANİK  
TEORİSİNE GÖRE EKSENEL TİTREŞİM ANALİZİ**

**Esmâ ASA**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEFORME OLABİLİR SINIR KOŞULLARINDA KARBON NANOTÜPLERİN  
DOUBLET MEKANİK TEORİSİNE GÖRE EKSENEL TİTREŞİM ANALİZİ**

**Esmâ ASA**  
0000-0003-3002-6546

Doç. Dr. Mustafa Özgür YAYLI  
0000-0003-2231-170X  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

## TEZ ONAYI

Esma ASA tarafından hazırlanan “DEFORME OLABİLİR SINIR KOŞULLARINDA KARBON NANOTÜPLERİN DOUBLET MEKANİK TEORİSİNE GÖRE EKSENEL TİTREŞİM ANALİZİ ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. M.Özgür YAYLI

**Başkan** : Doç. Dr. M.Özgür YAYLI  
0000-0003-2231-170X  
Bursa Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ  
0000-0002-4035-4642  
Bursa Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Dr. Öğ. Üye. Haluk SARAÇOĞLU  
0000-0003-3842-5699  
Dumlupınar Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN  
Enstitü Müdürü

..!./.../..

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**11/10/2019**

**Esmâ ASA**

## ÖZET

Yüksek Lisans

### DEFORME OLABİLİR SINIR KOŞULLARINDA KARBON NANOTÜPLERİN DOUBLET MEKANİK TEORİSİNE GÖRE EKSENEL TİTREŞİM ANALİZİ

**Esmâ ASA**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Mustafa Özgür YAYLI

Literatürdeki çalışmaların bir çoğu nano boyuttaki kirişlerin mesnetlenme koşulu olarak ankastre, basit ve serbet uç ile sınırlanmaktadır. Nano çubukların sınır koşulları gerçekte bu basit kabullerden çok uzaktadır. Dolayısı ile sınır koşulu olarak aksel yay modeli kullanmak daha uygun olacaktır. Bu çalışmada aksel yaylar ile mesnetenmiş karbon nanotüplerin Doublet mekanik teorisinde serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Karbon nanotüpün aksel yer değiştirme fonksiyonu olarak Fourier Sinüs serisi kullanılmıştır. Stoke dönüşümünün deforme olabilir aksel yaylara uygulanmasının yardımıyla titreşim modları için bir öz değer yaklaşımı oluşturulmuştur. Bu alışık olmadık yaklaşım rijit koşullardan hareket edebilir sınır koşullarına geçiş için bir köprü oluşturmaktadır. Elastik yay katsayılarına uygun değerler atayarak önerilmiş modelin etkinliği ve hassasiyeti karşılaştırma çalışmaları ile test edilmiştir. Aksel yayların ve küçük boyut parametresinin nanotüpün titreşim davranışına önemli ölçüde etki ettiği sonuçlardan görülmüştür. Benzer şekilde bu aksel yayların ve malzeme boyut parametresinin titreşim frekanslarına bağımlılığı çok önemlidir. Benzer yüksek mertebeden elastisite teorilerine göre sonuçlar diğer mikro ve nano ölçekteki yapılar için tahmin edilebilir bu da küçük boyutun çoğu zaman rijit olma gerçeklğini doğrulamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Double mekanik teorisi, titreşim, sonlu elemanlar yöntemi, karbon nanotüp

**2019, vii + 59 sayfa.**

## ABSTRACT

MSc Thesis

### LONGITUDINAL VIBRATION ANALYSIS OF CARBON NANOTUBES WITH ELASTICALLY RESTRAINED ENDS USING DOUBLET MECHANICS

**Esmâ ASA**

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

**Supervisor:** Assoc. Dr. Mustafa Özgür YAYLI

In the vast majority of studies, the supporting conditions of nano-sized rods have been all restricted to clamped, free, or simply supported cases in nature. Consequently, the boundary conditions should be approximated and described by axial spring restraints at the end. In this study, free axial vibration analysis of axially restrained carbon nanotubes (CNTs) is studied within the framework of doublet mechanics theory. Fourier sine series are utilized for describing the axial deflection of the carbon nanotube. An eigenvalue approximation is constructed for vibrational modes with the aid of Stokes' transformation to deformable axial springs. This unclassified approximation bridges the gap between the deformable and rigid boundary conditions. The comparison studies are carried out to verify the efficiency and accuracy of the proposed analytical model by assigning proper values to elastic spring coefficients. The results indicate that the axial springs and small scale parameter of carbon nanotube have considerable effects on the axial vibration behavior of nanotubes NTs. Similarly the dependencies of the vibration frequencies on material scale parameter and axial restraints are significant. Similar higher order effects are predicted for other nano or micro structures, all of that confirmed the smaller is stiffer phenomenon.

**Key words:** Doublet mechanics theory, vibration, finite element method, carbon nanotube

**2019, vii + 59 pages.**

## TEŞEKKÜR

Çalıőmamn her aşamasında bilgi, özveri ve hoőgörösü ile yanımda olan çalıőmaktan gurur duyduğum değerli hocam ve tez danıőmanım Sayın Doç.Dr.M. Özėür YAYLI hocama,

Manevi destekleriyle bana güç veren kıymetli dost ve arkadaşlarıma,

Hayatımın her alanında almıő olduğum tüm kararların arkasında olan maddi ve çok değerli manevi desteklerini benden esirgemeyen, varlıklarıyla kendimi őanslı hissettiren sevgili ailem, eőim, moral ve motivasyon kaynağım kızım Baőak Alya'ma sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Esmasa ASA  
11/10/2019

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK TARAMASI.....	2
2.1. Karbon Nanotüpler.....	8
2.1.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp (SWCNT).....	8
2.1.2 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (MWCNT).....	10
2.2. Nanoteknoloji.....	12
2.2.1. Nanoteknoloji Uygulama Alanları.....	13
2.2.2 İnşaat Sektöründe Nanoteknoloji.....	15
2.2.3. Türkiye’de Nanoteknoloji.....	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
3.1. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi Tanımı.....	19
3.2. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi Doublet Mekanik Yöntemi.....	21
3.3. Materyal Matrisleri.....	25
3.4. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp İçin Doublet Mekanik Teorisi.....	26
3.5. Problemin çözümü.....	30
3.6. Stokes’ Dönüşümü.....	31
3.7. Özdeğer Problemi.....	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	36
5. SONUÇ.....	47
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	59

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$M$	Gerilme Tansörü
$z$	Bağımsız Değişken
$\sigma$	Gerilme
$E$	Elastisite (Young) Modülü
$A$	Eksenel Kesit Alanı
$p_\alpha$	Eksenel Mikro Gerilme
$T_\alpha^0$	Doğrultman Kosinüsü
$\sigma^M$	Makro Gerilme
$\rho$	Kütle Yoğunluğu
$v$	Eksenel Yer Değiştirme Vektörü
$\epsilon$	Doğrusal Şekil Değiştirme Tansörü
$t$	Zaman
$D$	Elastisite Katsayı Matrisi
$\mu$	Kayma Modülü
$\lambda$	Lame Sabiti
$\nu$	Poisson Oranı
$L$	Nano Tüp Boyu
$\psi$	Eksenel Şekil Değiştirme Fonksiyonu
$\varphi_0 - \varphi_L$	Yay Parametreleri

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
CM	Klasik Elastisite Teorisi
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
DM	Doublet Mekanik Teorisi
KM	Klasik Mekanik Teorisi
MWCNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
nN	Nano Newton
nm	Nanometre
Tpa	Tera Pascal
SWCNT	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
UNAM	Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp Kesitleri.....	9
Şekil 2.2. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp Çizimi .....	9
Şekil 2.3. Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Kesitleri .....	10
Şekil 2.4. Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Çizimi .....	10
Şekil 2.5. SWCNT'lerin (a) Zikzak, (b) Koltuk ve (c) İki farklı kiralite veya sarmallık, bükülmüş tüp şematik yapıları .....	11
Şekil 3.1. Doublet eksenlerinin şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.2. Eşil noktaların deformasyon grafiği .....	22
Şekil 3.3. 120° derecelik açıyla üç eşil nokta .....	24
Şekil 3.4. Nanotüpün koordinat eksenini gösterimi .....	27
Şekil 3.5. Zigzag nanotüpün gösterimi .....	27
Şekil 3.6. İki ucu hareket edebilir karbon nanotüpün gösterimi .....	30
Şekil 4.1. Yapılan çalışmanın doğruluğunun ve hassasiyetinin kontrolü .....	36
Şekil 4.2. Elastisite modülünün farklı değerleri için boyut parametresine bağlı frekans değerleri.....	38
Şekil 4.3. Boyut parametresinin sabit değerleri için Elastisite modülüne bağlı frekans parametreleri değişimleri .....	40
Şekil 4.4. Elastisite modülünün sabit değerleri için eşil mekanik teorisinin klasik elastisite teorisine oranı ve bunun ilk üç modun serbest titreşim frekanslarına etkisi .....	42
Şekil 4.5. Elastisite modülünün sabit değerleri için karbon nanotüp boyunun boyut parametresine oranı ve bu oranın ilk üç serbest titreşim frekansına bağlı değişimleri .....	44
Şekil 4.6. Yoğunluğa bağlı frekans değişimi (ilk üç mod için) .....	45
Şekil 4.7. Mod sayısına bağlı eşil ve klasik mekanik teorisi frekans oranı .....	46
Şekil 4.8. Uzunluk, boyut parametresine bağlı eşil klasik mekanik teorisi frekans oranı .....	46

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. Elastisite modülünün 580 nN/nm <sup>2</sup> olması durumunda ilk üç titreşim frekansı.....	37
Çizelge 4.2. Elastisite modülünün 2500 nN/nm <sup>2</sup> olması durumunda ilk üç titreşim frekansı.....	37
Çizelge 4.3. $\eta = 1,5$ nm boyut parametresi sabit değeri için Elastisite modülünün ilk üç frekans parametresine etkisi.....	39
Çizelge 4.4. $\eta = 2,5$ nm boyut parametresi sabit değeri için Elastisite modülünün ilk üç frekans parametresine etkisi.....	39
Çizelge 4.5. $E = 1000$ nN/nm <sup>2</sup> sabit Elastisite modülü değeri için farklı boyut parametrelerinin frekans oranına etkisi.....	41
Çizelge 4.6. $E = 2000$ nN/nm <sup>2</sup> sabit Elastisite modülü değeri için farklı boyut parametrelerinin frekans oranına etkisi.....	41
Çizelge 4.7. $E = 2000$ nN/nm <sup>2</sup> sabit Elastisite modül değeri için farklı karbon nanotüp boyu boyut parametresi oranının serbest titreşim frekanslarına etkisi.....	43
Çizelge 4.8. $E = 2500$ nN/nm <sup>2</sup> sabit Elastisite modül değeri için farklı karbon nanotüp boyu boyut parametresi oranının serbest titreşim frekanslarına etkisi.....	43

## 1. GİRİŞ

Mühendislik problemlerinin birçoğunda, fiziksel problemler doğrusal veya doğrusal olmayan adi ve kısmi diferansiyel denklemler ile gösterilirler. Çoğunlukla bu diferansiyel denklemlerin analitik veya kapalı çözümleri yapılamamaktadır. Genellikle bu diferansiyel denklemleri çözmek için yaklaşık yöntemler kullanılmaktadır. Ancak sürekli yaklaşık yöntem kullanılırsa bir süre sonra elde edilen verilerin doğruluğu sorgulanmaktadır. Kapalı matematiksel çözümün olmadığı durumlarda sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve sınır elemanlar yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır.

Mikro veya nano boyutlara inildiğinde klasik davranışların yerini kuantum davranışlar almakta ve makro boyutta kullanılan yöntemlerin geçerliliği sorgulanmaktadır. Geçtiğimiz yıllarda mikro veya nano boyutta yapıların mekanik çözümünde kullanılan birçok yüksek mertebeden elastisite teorileri geliştirilmiştir. Yerel olmayan elastisite teorisi de bu yöntemlerden biridir. Yerel olmayan elastisite teorisi küçük boyut etkisini hesaba katan bir teori olup, cismin bir noktadaki gerilmesi yalnız cismin o noktadaki şekil değiştirmelerine bağlı değil o noktanın bulunduğu uzaydaki bütün noktaların şekil değiştirmelerine de bağlı olduğuna açıklık getirir. Basit elastisite teorileriyle çözümün yapılamayacağı durumlarda; bu yöntemler kullanılarak sıralı birçok matematiksel işlem gerçekleştirileceği için kullanılacak bilgisayar programının çok kapsamlı olması gerekmektedir.

Gerçek fiziksel problemler mühendislik açısından çözümü oldukça zor ve karmaşık problemlerdir. Araştırmacılar mühendislik problemlerini çözerken; gerçek fiziksel problemi değil de onu en iyi temsil eden varsayımlı modeli oluşturmak zorundadır. Model oluşturulurken belirli ölçüde varsayımlar kullanılmaktadır, bazı parametreler sabit tutulurken diğer parametreler değiştirilmekte bu değişim ışığında oluşan etki gözlemlenmektedir. Elde edilen bu verilerden yeni çıkarımlar, tablolar, formüller ve grafikler oluşturulabilmektedir. Sonuçta oluşan verilerin yorumları yapılır. Kurulacak modelin gerçeği temsil etmemesi durumunda problemin gerçek fiziksel davranışı temsil etmesi mümkün değildir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK TARAMASI

Sürekli sistemlerin mikro ve nano boyuttaki modellerinin mekanik etkiler altındaki davranışı klasik elastisite teorisi ile açıklanamaz. Mikro ve nano ölçekte yapının boyuttan kaynaklı karakteristik özelliği de büyük önem kazanır. Bu nedenle boyut etkisini dikkate alan yerel olmayan elastisite teorisiyle problemlere çözüm aranmalıdır.

Literatürde yerel olmayan elastisite teorisi ile alakalı farklı teoriler kullanılarak bazı çalışmalar yapılmıştır. Winkler (1867) elastik zemini yaylar vasıtasıyla modellemiştir, Timoshenko (1937) titreşim teorisi ile alakalı modern hesaplama teknikleri geliştirmiştir. Berg (1958) elastik düzleme oturan kirişlerin rijitlik katsayısıyla alakalı bir yöntem çalışmıştır. Tanyi (1962) kısmen kısıtlanmış kirişleri elastik zemin tarafından incelemiştir. Bald (1964) elastik zemine oturan kirişleri çalışmıştır. Badr (1964) elastik zemine oturan kirişlerin farklı yüklemeler altındaki davranışını incelemiştir. Chang (1965) elastik zemine oturan sonsuz uzunluktaki kiriş davranışını incelemiştir. Vlasov ve vd. (1966), Ray (1966), Orkov ve Saxenhofer (1967), Carrol (1969) ve Meshgin (1974) elastik zemine oturan kirişi araştırmışlardır.

Kao (1968) doğrusal olmayan tam elastik zemine oturan kirişleri incelemiştir. Tuma ve Alberti (1970) elastik zemine oturan kirişin statik verilerini araştırmışlardır. Lin (1970a) elastik zemine oturan bir kirişin eğilmesini araştırmıştır. Hsu (1970) ve Lin (1970b) tek yönlü elastik zeminde olan kirişleri araştırmışlardır. Graza (1970) elastik zemine oturan kirişlerin matris verilerini araştırmışlardır. Smith ve Herrmann (1972) elastik zemine oturan kirişin ardışık kuvvetlerin etkisi altındaki stabilitesini incelemiştir. Eringen (1972), Eringen ve Edelen (1972) ve Eringen (1983) yerel olmayan elastisite teorisi fikrini ortaya çıkarmış ve geliştirmiştir.

Chez (1974) elastik zemine oturan kirişin temas problemlerini incelemiştir. Nugent (1975) elastik zemine oturan dairesel plakları ve kirişleri incelemiştir. Hayes (1976) elastik zemine oturan kirişin burkulmasını incelemiştir. Nakamoto (1976) elastik zemine oturan kirişin yer değiştirmelerini incelemiştir. Doshi (1976) düzgün olmayan kesitli kirişleri elastik zeminde incelemiştir.

Lai (1990) elastik zemindeki kirişlerin dinamik davranışlarını incelemiştir. Oruçoğlu (1991) yerel olmayan elastisite teorisinde çatlak problemini araştırmıştır. Stekel (1992) dairesel kesitli kirişlerin elastik zemine oturmasını incelemiştir. Elastik zemine oturan kirişlerin değişken yükler altındaki parametrik çalışmasının Emma (1992) analizini yapmıştır. Elastik zemine oturan kirişleri Doğan (1993) araştırmıştır. Eisenberger (1994) iki parametrelili ve tek parametrelili elastik zeminde oturan kirişlerin titreşim frekansları analizlerini yapmıştır. Karbon nanotüpleri Endo ve Iijima (1996) incelemiştir. Nano ve mikro kirişlerin analizlerini Benoit (1996) yapmıştır.

Karbon nanotüplerin özellik ve hazırlıklarını Ebbesen (1997) araştırmıştır. Jones ve Jones (1997) elastik zeminde ki kirişlerin analizini yapmışlar, sonra Jones (1997) elastik zemine oturan kirişlerin sonlu farklar teorisi kullanılarak analizini yapmıştır. Sujith ve Kumar (1997) aynı özellikte olmayan kirişlerin aksel titreşimleri için mutlak çözümlerini incelemiştir. Kadioğlu ve Aköz (1997) elastik zemine oturan daire ve doğru aksel kirişlerin sonlu eleman çözümünü yapmışlardır. Karbon nanotüplerin fiziksel özelliklerini Saito (1998) araştırmışlardır. Melerski (2000) silindirik tankların, dairesel plakların ve elastik zemine oturan kirişlerin tasarım analizini yapmıştır. Coşkun (2000) gerilimsiz zemin üzerine oturan kirişin doğrusal olmayan analizlerini incelemiştir. Düzgün (2001) elastik zemindeki sürekli temellerin kuvvet yöntemiyle incelemesini yapmış ve bilgisayar programı algoritmaları ile sayısal hesabı çözümlenmiştir. Karbon nanoyapıları Erkoç (2001) incelemiştir. Pilkey (2002) elastik kirişlerin tasarım ve analizi için hesaplama yöntemlerini incelemiştir.

Oguzgan ve Ayvaz (2002) elastik zeminde olan kirişlerin değiştirilmiş Vlasov modeli uygulanarak serbest titreşim analizini yapmışlardır. Nanotüpler hakkında Koç (2003) araştırmalar yapmıştır. Owens ve Jr.Poole (2003) nanoteknoloji hakkında araştırma ve çalışmalar yapmışlardır. Yatak katsayısı değişen elastik zemine kısmen gömülü kazıkların serbest titreşim analizlerini Yeşilce (2004) incelemiştir. Meyyappan (2004) karbon nanotüplerin uygulamalarını ve karbon nanotüplerin bilimini araştırmıştır.

Çıracı (2005) nano boyutla alakalı araştırmalar yapmıştır. Karadağ ve Bahçivan (2005) elastik zemine oturan çubuk uygulamalarının doğrusal olmayan ve serbest titreşim

analizlerini yapmışlardır. Elastik zemin üzerinde olan plaklar için etkili zemin derinliğini ve elastik zemin üzerinde olan kalın plaklar için kayma kilitlenmesiz sonlu eleman modelini Daloğlu ve Özgan (2005), (2011) araştırmışlardır. Sonlu farklar (SF) ve polinom diferansiyel quadrature (PDQ) metod ikilisi ile elastik zeminde olan dikdörtgen plakların geometrik açıdan doğrusal olmayan analizini Civalek ve Ülker (2006) yapmışlardır. Nanoteknolojide karbon nanotüplerin dayanım simülasyonlarını Sevi (2006) araştırmıştır. O'Connell (2006) karbon nanotüplerin uygulamalarını ve özelliklerini incelemiştir.

Kişin (2006) zemin yatak katsayısı, donatı tipi ve tel içeriği değişiminin, tekil yük altındaki çelik hasır donatılı ve çelik tel donatılı beton plakların davranışına etkisini incelemiştir. Elastik zeminde olan çelik hasır donatılı ve çelik lif donatılı beton plakların matematiksel analizini Akbaba (2006) incelemiştir. Kılıç (2006) izotrop, homojen ve doğrusal elastik Vlasov ve Winkler zemini üzerine oturan dikdörtgen plağın harmonik yükleme altındaki davranışını araştırmıştır. Tsudik (2006;2012) elastik zeminde olan yapıların, çerçevelerin ve kirişlerin analizini yapmıştır.

Tepe (2007) nanoteknolojide nano ölçekteki yapıların yerel olmayan elastisite teorisi ile Hooke kanunu çerçevesinde başlangıç değer yöntemi ile incelemiştir. Elastik zemin üzerinde olan çelik lifli beton plakların deneylerini ve genel değerlendirmesini Kutlu (2007) yapmıştır. Güler (2007) Tel muhtevası ve beton sınıfı aynı, yatak katsayıları ayrı üç farklı beton plağın tekil yükleme altındaki davranışlarını incelemiştir. Yalnızca basınca çalışan elastik zemin üzerinde olan sonlu kirişin, simetrik olmayan tekil yük altındaki davranışlarını Seçkin (2007) incelemiştir. Elastik zemin üzerinde olan iki yapının Sh dalgasına maruz kalması durumunda yapı-zemin-yapı etki problemini Aluç (2007) incelemiştir.

Elastik zemin üzerinde olan yayılı yüklü daire eksenli çubuğun kesit etkilerini başlangıç değer modeli ve metodu kullanarak Sönmezateş (2007) incelemeler yapmıştır. Bilgin (2007) elastik zemine oturan daire eksenli çubuğun kesit etkilerini taşıma matrisi metodu ve başlangıç değerleri metodu kullanılarak incelemiştir. Elastik bir zemin üzerinde olan kirişlerin sap2000 analiz programı ve yönetici denklem ile kıyaslanmasını Akyol (2007)

araştırmıştır. Elastik zemin üzerinde olan her yerinde homojen olmayan kirişin titreşimini ve stabilitesini, elastik bir zeminde iki ucuda ankastre mesnetli rastgele ve devamlı homojen olmayan bir kirişin serbest titreşim analizi ve değişik geometrik özellikleri, sınır koşulları göz önünde bulundurularak kirişlerin serbest titreşim analizlerini Avcar (2007, 2010, 2014) incelemiştir.

King (2007) nanoteknoloji ile alakalı araştırma ve gelişmeleri araştırmışlardır. Tepe (2007) nanoteknolojide nano boyuttaki yapının yerel olmayan elastisite teorisi çerçevesinde incelemelerini yapmıştır. Nano'nun temel konu ve kavramlarını Pradeep (2007) araştırmıştır. Tchoul (2008) kompozitleri ve karbon nanotüpleri incelemiştir. D'Souza (2008) nanotüpleri, karbon nanoyapıları ve fullerenleri araştırmıştır. Elastik zemin üzerinde olan radye temellerin analizlerini Duman (2008), yapmıştır. Gülkan ve Karaşin (2008) elastik zeminlerde olan plakların sonlu ızgara yöntemiyle yaklaşık analizlerini yapmışlardır. Karkare (2008) nanoteknoloji esasları ve uygulamalarını çalışmıştır. Kırca ve Menceloğlu (2008) uluslararası rekabet stratejileri, nanoteknoloji ve Türkiye'yi araştırmıştır.

Contreras ve ark. (2009) değişik konfigürasyonlu bilgisayarların nanotüple imalatı için algoritma çalışmaları yapmıştır. Sofiyev ve ark. (2009) Winkler zeminde her yerinde homojen olmayan kesilmiş konik kabukların serbest titreşimlerini incelemişlerdir. Elastik zemin üzerine oturan bir Timoshenko kirişinin sonlu elemanlar metoduyla elastoplastik analizini Yazıcı (2009) incelemiştir. Winkler elastik zeminde olan sonlu uzunluktaki bir kirişin hareketli tekil yük altında sonlu titreşimini Özdemir (2009), araştırmıştır. Pentaras (2009) karbon nanotüplerde, burkulma ve titreşim etkisini incelemiştir. Schodek ve ark. (2009) mimar ve mühendisler için nanoteknolojiye, nanomalzemelere ve nano tasarımına giriş yapmışlardır.

Hasar değişkeni oranlamalarında aşkınsal ters öz değer problemini Singh (2009) incelemiştir. Elastik zeminde olan kirişlerin harmonik diferansiyel quadrature ve ayrık tekil konvolüsyon yöntemlerini kullanarak analizlerini Demir ve Civalek (2009) yapmışlardır. Yerel olmayan elastisite teorisi ile çatlamış nano boyuttaki kirişin serbest olan enine titreşimlerini Loya ve ark. (2009) araştırmışlardır. Nano boyuttaki çubukların

eksenel titreşimin analizini yerel olmayan sürekli çubuk modellemesi ile elastik zemine gömülü karbon nanotüplerin (nanoçubukların) eksenel titreşim analizini yerel olmayan elastisite teorisi yardımıyla Aydoğdu (2009, 2012) incelemiştir. Ramsden (2009, 2011) nanoteknoloji ve nanoteknoloji esaslarını araştırmışlardır.

Açı ve Ritz Metodları, yerel olmayan elastisite teorisi çerçevesinde Kösegil (2010) araştırmıştır. Attarnejad ve ark. (2010) elastik zemin üzerine oturan kirişlerin çoklu parametrelili farklı uygulama dönüşümüyle Timoshenko'nun serbest titreşim analizlerini yapmışlardır. Sofiyev ve Avcar (2010) Pasternak zeminin eksenel yük etkisinde FGM katmanının içerdiği silindirik kabuklarının stabilitesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Toksöz (2010) karbon nanotüplerin elastisite teorisinde Ritz Metodu ve Açı Yöntemi ile problem çözülmüştür. Şık (2010) değişen derinlikli çoklu parametrelili elastik zemin üzerinde oturan plakların hesaplarını incelemiştir. Elastik zemin üzerinde olan deprem etkisine maruz kalan plakların dinamik ve parametrik analizlerini Mindlin kalın plak teorisini kullanarak Seyis (2010) araştırmıştır.

Yaylı (2010) yerel olmayan elastisite teorisine göre nano boyuttaki kirişleri doğrusal olmayan teoriyle incelemiştir. Sirmen (2010) tek ve çift katlı karbon nanotüplerde eğilmeyi incelemiştir. Şahin (2010) yaklaşık yöntem ile karbon nanotüplerin burkulma yüklerinin hesabını yapmıştır. Nanoteknoloji uygulamaları ve önemini Fulekar (2010) araştırmıştır. Çift duvarlı karbon nanotüpleri Seyman (2010) araştırmıştır. Varadan (2010) nanoteknoloji ve nanobilim mühendisliği alanında çalışmalar yapmıştır. Elastik zemin üzerinde olan doğrusal yayılı yüke maruz kalan kalın plakları parametrik olarak Şahinkaya (2010) incelemiştir.

Yüksek mertebeden elastisite teorisinden değiştirilmiş şekil değiştirme ve değiştirilmiş gerilme çifti değişimini elastisite teorileri kullanılarak mikro kirişin burkulma ve eğilme analizlerini Akgöz (2010) yapmıştır. Yerel olmayan elastisite teorisi yardımıyla nano plakların dinamik ve statik analizini teorik olarak Aksencer (2010) incelemiştir. Yerel olmayan elastisite teorisi yardımıyla çatlamış nano ölçekteki kirişin eksenel titreşimlerini Hsu ve ark. (2011) araştırmıştır. Seiler ve Mahler (2011) nanokompozitleri ve karbon nanotüpleri araştırmışlardır. Işık (2011) mikro ve nano boyuttaki yapıların yerel olmayan

elastisite teorisi ile titreşim ve eğilme analizlerini yapmıştır. Kuyumcu (2011) homojen olmayan yer hareketlerine maruz kalan kablolu köprülerde yapı-zemin etkileşiminin stokastik hareketler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Elastik zeminde olan dairesel ve doğrusal eksenli çubukların dinamik hareketi Laplace uzayında Akkurt (2011) tarafından teorik olarak araştırılmıştır.

Varma (2012) nanoteknolojinin uygulama alanları ve kullanım amaçları ile alakalı çalışmalar yapmıştır. Küçükyıldırım (2012) karbon nanotüpler, sentezleme yöntemleri, kullanım amaçları ve kullanım alanlarını araştırmıştır. Karbon nanotüp ürünleriyle tasarlanan heliks antenlerin performans değerlerini Arı (2012) araştırmıştır. Karbon nanotüplerin fiziksel nitelikleri üzerine yeni katkılamanın etkilerini Tetik (2012) incelemiştir. Kurt ve ark. (2012) nanotüpleri ve molekülleri araştırmışlardır. Zhang (2012) karbon nanotüpleri ve karbon nanotüp uygulamalarını araştırmıştır. Elishakoff (2012) nano sensörlerin titreşimini, karbon nanotüpleri, balistik etkisini ve burkulmasını incelemiştir. Hızal (2012) elastik zemin üzerinde bulunan kirişlerin zorlanmış titreşimlerinin analizlerini yapmıştır. Elastik zemin üzerinde olan sonsuz kirişin hareketli yükler altında dinamik analizlerini Turan (2012) incelemiştir.

Akgöz ve Civelek (2013) elastik şekil değiştirme gradyan elstasisine dayalı kesiti düzgün olarak değişen mikro boyutlu kolonların analizi tarafından yapılmıştır. Işık (2013) çift katmanlı karbon nanotüplerin bir ucu yaylı diğer ucu ankastre olması durumunu araştırmıştır. Iniewski ve Morris (2013) karbon nanotüpleri, grafeni, nano yapıları ve uygulamalarını araştırmışlardır. Yaylı (2014) nano boyuttaki tüpleri Fourier serisi kullanarak rijit olmayan sınır koşullarında incelemiştir. Buczkowski ve Torbacki (2014) elastik zemin üzerinde olan plak ve kirişlerin sonlu elemanlar analizlerini yapmışlardır. Tanaka (2014) grafeni ve karbon nanotüpleri incelemiştir. Tserpes ve ark. (2014) grafen, karbon nanotüpler ve kompozitlerin modellenmesini incelemiştir.

Yaylı ve Yanık (2015) elastik zemine oturan çubuğun eksenel titreşim analizlerini rijit olmayan sınır koşullarında çalışmışlardır. Yanık (2015) nano ölçekteki çubukların rijit olmayan sınır koşullarında elastisite teorisinde Stokes' dönüşümleri ile titreşim analizlerini yapmıştır. Elastik zemine gömülü çatlak bir nano boyuttaki kırşin titreşimi

üzerinde ki manyetik ve termik etkilerini Karlıcı ve ark. (2015) incelemiştir. Gürses (2015) nanoteknoloji ve boşluklu nano ölçekteki plakların yerel olmayan elastisite teorisi ile titreşim ve eğilme analizlerini yapmıştır. Beni ve ark. (2015) çift gerilme teorisi kullanılarak çatlak nano ölçekteki kırılgan serbest olan enine titreşiminin boyutuna etkisini çalışmışlardır. Arda (2016) yerel olmayan elastisite teorisi yardımıyla nano boyuttaki yapılarda burulma davranışının dinamik ve statik analizlerini yapmıştır.

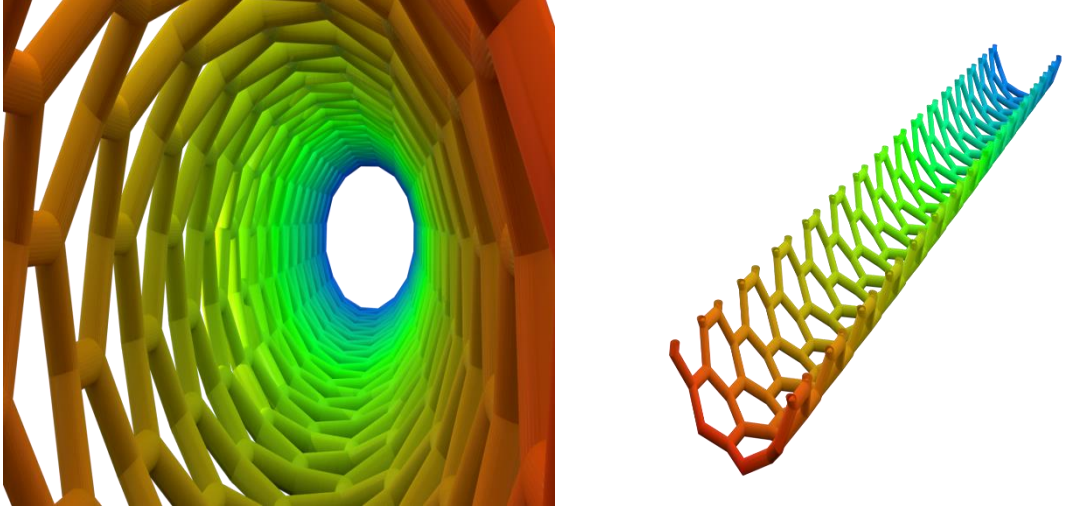
Aya (2017) yerel olmayan elastisite teorisi yardımıyla doğrusal olmayan eksenli nano boyuttaki çubukların düzlem dışı dinamik ve statik analizlerini yapmıştır. Bağdatlı (2017) yerel olmayan elastisite teorisi ile üzerinde akışkan bulunduran nanokirişin titreşim analizini yapmıştır. Uyan (2018) boyut etkisini dikkate alan yerel olmayan elastisite teorisini kullanarak bor nitrid nanoçubukların eksenel titreşimini incelemiştir. Yaylı (2018) dönel yaylarla mesnetlenmiş karbon nanotüpün yerel olmayan elastisite teorisi olan Timoshenko kiriş teorisinde serbest titreşim analizini yapmıştır.

## **2.1. Karbon Nanotüpler**

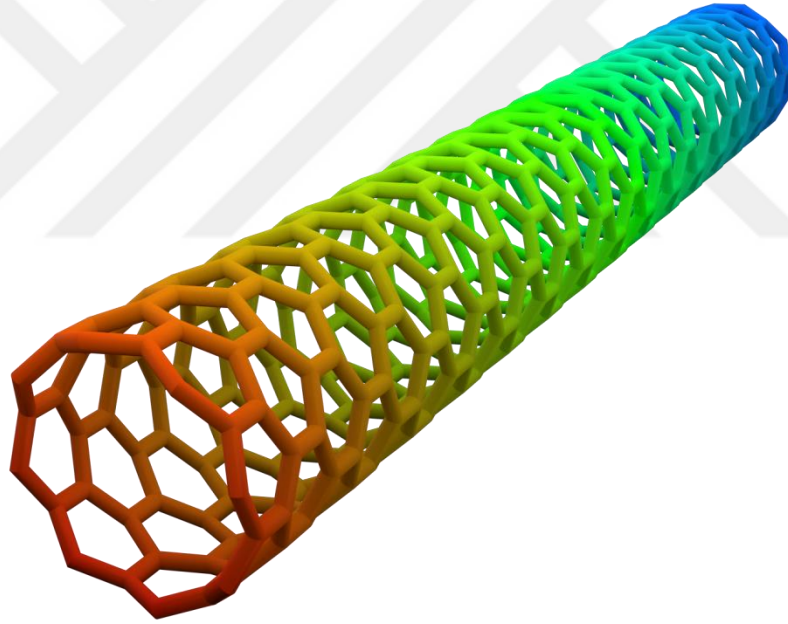
Bütün canlıların en temel elementi karbon elementidir. Karbonun allotroplarından biri de grafitir. Bir tek karbon atomu kalınlığındaki grafit katmanına grafen yapı denir. Karbon atomlarının altıgen oluşturacak şekilde grafenlerin yuvarlanmasıyla oluşan yapıya da karbon nanotüp denilmektedir. Bu tüplerin diğer atom ve moleküllerle yaptığı bileşiklere ise fulleren denilir. İlk tüp şeklindeki molekülleri 1991’de Sumia Lijima tarafından bulunan ilk karbon nanotüpler çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) olarak adlandırıldı, bu çalışmadan iki yıl sonra Lijima ve arkadaşları tarafından tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) keşfedildi.

### **2.1.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp (SWCNT)**

Tek bir grafen tabakanın yuvarlanmasıyla oluşturulan yapıya tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) denilmektedir. Tek duvarlı karbon nanotüp şekil ve kesitleri Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 ’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp Kesitleri



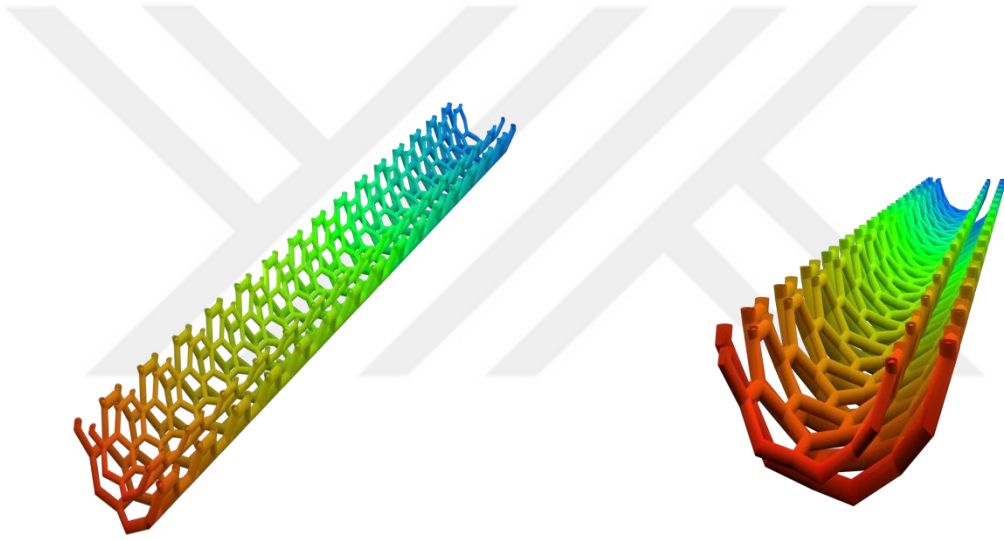
Şekil 2.2. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp Çizimi

### 2.1.2 Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (MWCNT)

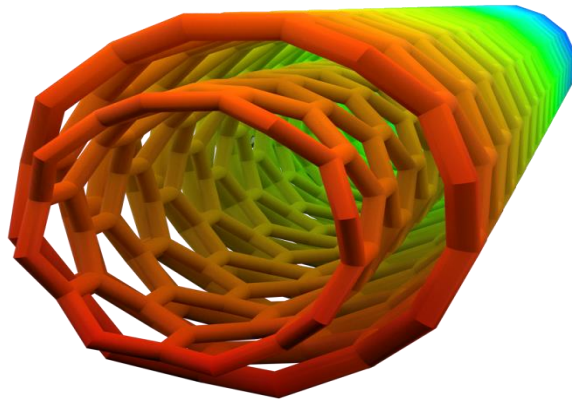
İki veya daha fazla silindirik grafen tabakalarından oluşan yapıya çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) denilmektedir. Grafen tabakaların bütün katmanları arasında van der Waals kuvveti etkin olmaktadır.

Karbon nanotüp üretmek için üç ana yöntem vardır; ark deşarjı, kimyasal buhar biriktirme ve lazer ablasyon metodudur. Üretim maliyeti diğer yöntemlere göre daha düşük olan kimyasal buhar biriktirme metodu sanayi ölçeğinde kullanılmaktadır.

Çok duvarlı karbon nanotüp şekil ve kesiti Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 'te görülmektedir.



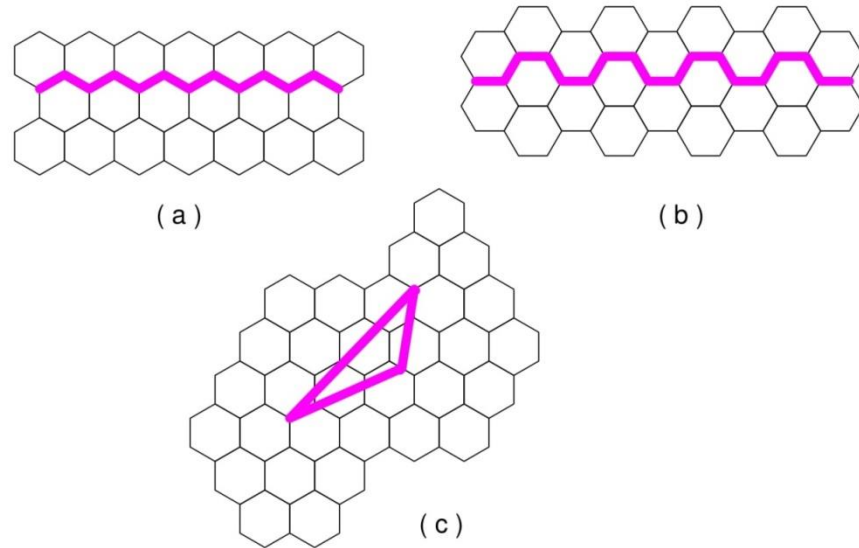
Şekil 2.3. Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Kesitleri



Şekil 2.4. Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Çizimi

Karbon nanotüpler tek yada iç içe geçmiş ucu açık yada kapalı silindirler şeklinde farklı çaplarda olabilmektedirler. Karbon nanotüpler diğer tüm element ve yapılara nisbeten hafif, dayanıklı ve esnek bir yapıya sahiptirler. Karbon nanotüpün çap, boy ve sıralanma şekilleri değiştirilerek istenilen düzeyde iyi özellikler elde edilebilmektedir. Karbon nanotüpler günümüz teknolojisinin bilinen en dayanıklı malzemesi olması özelliğini taşımaktadır şuan. Karbon nanotüpler kendi ağırlığının 300-400 milyon kat ağırlığına dayanabilmektedir. Oluşan bağ yapısına bağlı olarak kimyasal tepkimelere dirençlidirler. Karbon nanotüpler boyutları itibariyle sıralanışları değiştirilerek yaklaşık 1000 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip özelliktedirler. Isı yalıtımı yüksek, elektrik iletkenliği iyi düzeyde, esneme kabiliyeti mükemmel seviyede, rijitlik stabilizesi iyi, sağlam, sert ve hafif yapılardır. Gerilme gücü, dayanma gücü günümüz teknolojisinde kullanılan birçok maddeden kat be kat yüksek seviyelerdedir.

Grafit yapıların kıvrılış yönüne göre karbon nanotüpler ya koltuk tüp yapı olurlar ya da zigzag tüp yapı olurlar. Ayrıca her iki oluşumunda biraz bükülmesiyle de bükülmüş tüp yapılar oluşur. Bahsedilen karbon nanotüp şematik yapıları Şekil 2.5 'te görülmektedir.



**Şekil 2.5.** SWCNT'lerin (a) Zikzak, (b) Koltuk ve (c) İki farklı kiralite veya sarmallık, bükülmüş tüp şematik yapıları

Bu yapı çeşitliliğinden dolayı tüpler birbirinden farklı elektronik ve mekanik özellikler göstermektedirler. Zikzak yapı modeli yarı iletken özelliği karşılarken, koltuk yapı modeli metalik özelliği karşılamaktadır. Zikzak yapıda tüpün etrafındaki katman sayısı için katları ise bu yapı da metalik özellik gösterir. Karbon nanotüpte atomlar yalnızca altıgen geometri oluşturur. Her atomun yalnızca üç komşusu vardır.

## 2.2. Nanoteknoloji

Herhangi bir ölçünün milyarda biri nano boyut olarak ifade edilir. Nano boyut genellikle metre ile birlikte kullanılır ve buna nanometre denir. Yani metrenin milyarda biridir nanometre. Nanometre boyutu itibari ile hayal ve tahmin edilmesi hayli zor bir ölçü birimidir. Bu yüzden bilinen-tahmin edilebilen birkaç örnek vermek gerekirse canlıların en temel yapı taşı olan DNA'mız 2.5 nanometre boyutunda, saç telinin seksenbinde biri ebatında 1 nanometre, hücre zarı 12 nanometre, alyuvarlarımız 7 nanometre boyutunda gibi örnekler çoğaltılabilsede sonuç olarak bir nanometre dünyanın yanındaki futbol topu gibi hayal edilebilir. Nanoteknoloji de tam olarak bu avantajı üzerine, boyut etkisi üzerine kurulmuştur.

Nanoteknoloji; nano ölçekteki yapılardan daha gelişmiş, tamamen farklı fiziksel, kimyasal, biyolojik özelliklerde makro yada mikro yapılar elde etmeyi hedefleyen bilim ve teknolojiye denilmektedir. Nano boyutlarda yapıların kontrolü ve imali ile daha büyük yapıların oluşturulmasına, bu yapılarla yeni özelliklerin elde edilmesi işlemine de denilmektedir. Nano ölçek boyutunda malzeme özellikleri makro ya da mikro boyuttaki özelliklerinden çok farklıdır, nano ölçeğe yaklaştıkça yapıda daha yararlı ve değişik bir çok özellik olduğu fark edilmiştir. Doğadaki tüm yapılar atomların farklı farklı dizilimlerinden oluşur. Atom dizilimleri nano boyutlarda değiştirilerek, sarmalları, katmanları değiştirilerek istenilen en iyi nitelikte malzeme elde edilebilir. Genetik mühendisliği gibi düşünersek yapının iyi genleri çekip istenilen özelliklerle birleştirilerek en iyi nitelikte üstün özelliklere sahip bir ürün elde edilecektir. Evrendeki atomik dizilim kopyalanabilir yada taklit edilebilirse atomlar hareket ettirilerek kopya ürün veya tamamen bambaşka yeni bir ürün elde edilebilecektir. Bu da nanoteknolojiye olan ilgi ve

merakı artırmaktadır. Maddenin atom yapısını çok iyi bilerek kömür gibi bir üründen atom dizilimi değiştirilerek elmas elde edilebilecektir.

Atomların içsel yapısı, dizilişleri çok iyi bilinerek yeni ürün elde edilebilmesi nanoteknolojiyi uygulanabilir kılmaktadır. Nanoteknoloji tamamen yeni bir ürün oluştururken atom ve moleküllerin bilinen özelliklerini kullanmaktadır.

Nanoteknolojinin fizik, kimya, biyoloji, tıp-eczacılık, tekstil, mühendislik bilim dallarında günümüzde kullanımı mevcuttur. Nanoteknolojinin uygulama alanları; otomotiv, çevre, elektronik, gıda, sağlık, tekstil, kozmetik, savunma ve enerji alanlarıdır. Nanoteknoloji günümüzde maliyetinden ve henüz yeterince keşfedilememiş olmasından dolayı yaygın kullanımda olmasada gelecekte vazgeçilmez olacağı düşünülmektedir.

### **2.2.1. Nanoteknoloji Uygulama Alanları**

Nano ölçekteki malzeme ve aygıtların makroskopik boyutlardaki yapıların içerisine konularak çok miktarda üretim yapmak için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Klasik metotlarla elde edilen ürünlere kıyasla daha dayanıklı daha hafif ürünler elde etmek için malzemelerin atomik ve moleküler yapılarından başlanarak hatasız dizilimler ile tam istenilen şekliyle nano yapıda seramikler, polimer malzemeler, metaller üretilmektedir. Nano boyutta parçacıklardan yapılmış boya, boyar malzemeler kullanılarak geliştirilmiş baskı yöntemleri, alışılmamış ve eşsiz özellikleriyle nanotüplerden lifler, elyaflar ve benzersiz özelliklere sahip kaplama malzemeleri üretilmektedir. Nano ölçekte malzeme ile kaplama yapılmış elektronik kesme aletleri ve türlü kimyasal uygulamalar yapılabilmektedir. Üretilen bu ürünler de nano-imalatın potansiyel uygulama alanına örnek verilebilir.

Nano boyutta malzeme üretimi yeni ölçüm standartlarının da oluşmasını sağlamıştır. Nanoteknoloji üretim aşamasında daha az enerji sarf edilmesini ve aynı zamanda atık malzeme üretilmemesini sağlayacaktır. Bu bağlamda düşük maliyetli üretim yöntemlerinin geliştirilmesi nano-imalatın potansiyel gelecek teknolojisi olacağı gerçeğini göz önüne sermektedir.

Bilgisayar, telefon ve televizyon tasarımlarında ihtiyaç duyulan az enerji sarfiyatı ve nano boyutta elektronik devre elemanları üretilmesi günümüz teknolojisinin akıl yordduğu bir mevzudur. Halihazırda nano boyutta depolama alanları, hızları ve kapasiteleri yüksek daha az enerji harcayan nano ölçekte elektronik aygıtlar mevcuttur. Üretilen bu elektronik araçlar için sensör, sinyal ve gösterge sistemleri de nano-imalata örnek verilebilir.

Uzay ve havacılık teknolojileri çok maliyetli teknolojilerdir. Bu araçların imalatı sırasında kullanılan malzemelerin ağırlığı maliyetiyle doğru orantılıdır. Nanoteknoloji ile bu malzeme ağırlığı azaltılarak maliyetlerinin ciddi oranda düşmesini sağlayacaktır. En az enerji sarfiyatı gerektiren, radyasyona karşı dayanıklılığı yüksek, çok verimli bilgisayarların yapımı; mikro boyutta uzay araçlarında kullanılabilecek nano boyutta ekipmanlar, aletler, algılayıcılar, nano elektronik desteklenen uçuş sistemleri ve ısıya dayanıklı nano özellikte kaplama malzemeleri üretilmesine olanak sağlamıştır. Uzay araçları, havacılık ve roket istasyonları yapımında da maliyeti düşürmek için nano-imalatlardan kullanılmaktadır. Ayrıca çekme - basınç direnci çelik ve günümüz yapı ürünlerinden kat be kat fazla olan nanotüplerle yeryüzünden atmosfere kadar yükselebilecek yapılarda üretilebilir. Bu yöntem sayesinde de fırlatma maliyetleri düşürülebilir.

Nano elektrik yardımıyla çeşitli eğitim sistemleri, haberleşme araçları, insan gücü gerektirmeyen ya da çok az gerektiren robotik ekipmanlar, radyoaktif ve zararlı gaz tesbit araçları, daha iyi savunma ve silah sistemleri, nükleer savunma sistemlerinin iyileştirilebilmesi için nano ve mikro boyutta aygıtların sentez ürünleri, akıllı giyecekler ve tam korunaklı kamuflajın da nanoimalat olarak ar ge çalışmaları devam etmektedir.

Potansiyel uygulama alanlarından biri de temiz enerji kaynağı olan hidrojen gazı depolama işine çözümler aranmasıdır. Bu ve benzeri çözümler çevre gözlenmesi ve korunması yönünde atık üretmeyen, çevreye zarar vermeyen üretim sistemleri oluşturulabilir. Nanolifler temiz su üretiminde kullanılabilir. Nano kompozitlerle üretilen yüksek verimlilikte motorlar sayesinde de daha çevreci ulaşım araçları elde edilecektir. Nano kompozit ve nano malzemelerinin fosil yakıt endüstrisi verimliliğini artırıcı potansiyeli bulunmaktadır.

Nanoteknoloji yaşıyan organizmalara moleküler seviyede müdahale şansı verebilir. Yaşıyan organizmalarla bağlantı kurabilecek yeni araçlar üretilecek birçok yeni tedavi ve teşhis yöntemide bulunması mümkündür. Yalnızca hastalığın bulunduğu veya yayıldığı yerlere local müdahaleler, insan vücudu içerisinde hareket ederek teşhis kolaylığı sağlayan araçlarda günümüz potansiyel örnekleri olarak verilebilir.

Tıp ve sağlık sektöründe oluşan bu yenilikler kapsamında tarımda ve biyoteknolojide gelişmeler gözlenmektedir. Daha besleyici, hastalık direnci yüksek hayvan ve bitkiler, yeni ilaçlar, gübreler de araştırılmaktadır. Bugün dahi hayvan ve bitki genlerinin değiştirilmesiyle oluşturulmuş yeni ürünlere rastlamak mümkündür.

### **2.2.2 İnşaat Sektöründe Nanoteknoloji**

İnşaat sektöründe şimdilerde cam, kereste, beton ve çelik en yaygın kullanılan yapı malzemeleridir. Nanoteknolojinin hayatımıza girmesiyle birlikte yapının en temel yapı taşları olan beton ve çimentoya nano boyutta partiküller eklemek yada sentezlemek suretiyle çelik ve betondan daha kaliteli, kullanışlı, yüksek performanslı sahip yapı malzemeleri elde edilebilmektedir. Nano ölçekteki yapılar makro boyuttaki malzemelerden çok farklı özellik taşımaktadır. Örneğin; nanomalzemelerden en önemlisi olan karbon nanotüp çelikten altı kat daha hafif ve yüzelli kat daha güçlüdür.

İnşaat sektöründe kullanılan yapı malzemeleri yerine çok fonksiyonlu, yüksek performanslı, aktif, kendini kolay adapte edebilen, çimento kompozitler, polimerik malzemeler gibi malzemeler farklı boyutlarda modellenip üretilerek inşaat sektörüne nanoteknoloji uyarlanmaktadır.

Nano malzemeler pek çok özelliği içerisinde barındırır. Enerji, verim, emniyet, dayanım, çevre gibi birçok niteliği bir arada bulundurur. Nanoteknolojinin inşaat alanındaki hedefi inşaat malzemelerinin daha sağlam, daha sağlıklı ve çok daha güvenliğini üretmektir. 'Nanoconex' projesi kapsamında üretilmesi planlanan inşaat malzemeleri;

- Biometrik malzemeler
- Nanoboyalar

- Şeklini hatırlayan akıllı sistemler
- Kontrollü malzemeler
- Dayanıklı malzemeler
- Kompozitler ( Kendini adapte eden ara yüzeyler)
- Nanoparçacıklar, lifler, tüpler

‘Nanoconex’ projesi kapsamında üretilmesi planlanan inşaat malzemeleri; Paslanmaz çelik, sentetik yada yoğun ve güçlü modifiye edilebilir kereste, düşük enerjili çimento, çok sert beton, nanokatmanlar, kendini temizleyen boyalar, bio aktif yüzeyler, güçlü seramik, kendini temizleyen camlar ve nanolifler.

İnşaat sektörün en önemli çalışmalarından biri de yapının temel taşı olan betonun iyileştirilmesi çalışmalarıdır. Betonun iyileştirilmesi için nanokompozit çalışmaları yapılmaktadır. Beton katkı maddesi olarak Karbon nanotüp, Nano-Alümina (  $Al_2O_3$  ), Nano Silika (  $SiO_2$  ) ve Nano-Titania (  $TiO_2$  ) nanomalzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan bu nanomalzemeler betonun yapısındaki boşlukları doldurarak betona dayanım ve güç kazandırır. Ayrıca kullanılan bu nanomalzemelerin betondaki hidratasyon hızını da artırdığı gözlenmiştir. Dolayısıyla nanomalzemelerden oluşan bir beton kompozit sınıfında oluşmuştur. Karbon nanotüp, Nano Silika (  $SiO_2$  ), Nano-Titania (  $TiO_2$  ), Nano-Alümina (  $Al_2O_3$  ), ZnO,  $WO_3$ , Ag ve  $ZrO_2$  nanopartiküllerinin yapı kompoziti olarak kullanım potansiyeli vardır.

İnşaat sektöründe; Karbon Nanotüp; asma köprülerin çelik halatlarını güçlendirmede, Karbon Nanofiber; dirençli yapısından kaynaklı don yaşanan karlı bölgelerde beton yol yapımında, Nano Silika; betondaki kompozitlerin yoğunluğunu artırmak için, Nano Kalsit parçacıkları; dolgu malzemelerini aşınmalardan korumak için, Nanokil; betonun akma ve plastik özelliklerini geliştirmekte, Titanya Nanoparçacık; fotokatalitik beton imalatında tercih edilebilir.

### **2.2.3. Türkiye’de Nanoteknoloji**

Bulduğumuz yıl itibariyle nanoteknoloji bütün gelişmiş ülkeler için büyük stratejik önem taşımaya başlamış durumdadır. Nanoteknolojinin gelecek 10 -15 yıl içerisinde

teknoloji devrimi olarak meydana çıkacağına inanılmaktadır. Teknolojiyi ön planda tutan ülkeler nanoteknolojide geri kalmamak için nanoteknoloji üzerine yoğun çalışmalar yapmaktadırlar. Ülkemizde gelecek teknolojisine ayak uydurabilmek için, genç öğrencileri geleceğin teknolojisine hazırlamak için Nanoteknoloji atölyesi vardır. Bahse konu atölye Türkiye Bilim Merkezleri Vakfı'nın Bilim Merkezine aittir.

Nanoteknolojinin 2025 yılından itibaren hayatımızı dikkate değer ölçüde etkileyeceği düşünülmektedir. Türkiye'de bu yıl itibariyle nanoteknolojik ürünleri yapabilir hale gelmek için bu teknolojiye yönelik çalışmaların temellerini oluşturabileceği adımlar atmaya başlanmıştır. Tübitak'ın 2023 Vizyon Programı'nda yol haritası oluşturulmuş ve oluşturulan bu yol haritasında nanoteknoloji yer almıştır. Bilkent Üniversitesi bünyesinde Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM) kurulmuştur. Bu merkezin amaç ve hedefi Türkiye'de nanoteknolojinin araştırma ana merkezi olmaktır. Merkez son derece modern ekipmanlarla donatılmış olup Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) tarafından 28 milyon TL'ye mal edilmiştir.

Türkiye'deki tüm araştırmacılar UNAM'ın sağladığı bu imkanlardan istediği zaman yararlanabilmektedir. Ayrıca Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Laboratuvarı, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Nanobilim Merkezi, Erciyes Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, Gazi Üniversitesi İleri Teknolojiler Araştırma ve Nanotıp Merkezi, Hacettepe Üniversitesi Nanotıp Merkezi, Atatürk Üniversitesi Nanobilim Araştırma ve Uygulama Merkezi, MTÜBİTAK MAM, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü gibi araştırma merkezleri de nanoteknoloji üzerine araştırmalar yapan diğer merkezlerdendir.

Türkiye'de nanoteknoloji eğitimi; İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans ve doktora düzeyinde nanomühendislik – nanobilim alanlarında, Bilkent Üniversitesi'nde yüksek lisans düzeyinde nanoteknoloji ve malzeme bilimi, Sabancı Üniversitesi'nde yüksek lisans ve doktora düzeyinde tezler, Ortadoğu Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans ve doktora düzeyinde mikro ve nanoteknoloji konularında, Anadolu Üniversitesi'nde yüksek lisans düzeyinde nanoteknoloji, Hacettepe Üniversitesi'nde

nanotıp ve nanoteknoloji konularıyla alakalı lisans ve yüksek lisans seviyesinde eğitim verilmektedir.

Türkiye’de nanoteknolojiyle alakalı etkinlikler de yapılmaktadır. Bunlardan bazıları 11 yıldır devam eden Nano Tr konferansları, Sabancı Center’daki Nanoteknoloji Pazarı, Yıldız Teknik Üniversitesi’nin Türkiye’de ilk kez ulusal alanda düzenlediği Ulusal Nanoteknoloji Öğrenci Kongresi gibi etkinlikler öğrencilerin, akademisyenlerin, Türkiye’nin nanoteknoloji ile alakalı ufku ve ilgisini geliştirecektir.

Türkiye’de yeni kurulan ve nanoteknoloji nano ürün konusunda ilerleme kaydetmiş onüçten fazla nanoteknoloji şirketi mevcuttur. Konuyla alakalı büyük şirketlerin nanoteknolojik ürünleri piyasaya adım atmıştır. Bilkent Üniversitesi’nde pişmaniye tekniği ile nano tel üretilmiştir. Pamukkale Üniversitesi’nde nanoteknoloji yardımıyla pamuklu kumaşların su ve deterjana ihtiyaç duymadan kendi kendini temizleyebilen ürün geliştirmiştir gibi benzer ürünler sayılabilir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi Tanımı

Nano teknolojide nano boyutlarda mekanik analizler yapıldığı için klasik elastisite teorisi yetersiz kalmaktadır. Bunun nedeni boyut etkisidir. Bu eksikliği gidermek için son yıllarda boyut etkisini de dikkate alan yüksek mertebeden elastisite teorileri geliştirilmiştir.

Yerel olmayan elastisite teorisi; bilinen klasik elastisite teorisinin yetersiz olduğu durumları çözümlmek için kullanılan elastisite teorisidir. Sürekli ortam mekaniğinde yenilikçi bir yaklaşımdır. Klasik elastisite teorisinde belli bir noktada bulunan gerilme durumları hesaplanırken bu nokta komşuluğundaki öbür noktadaki şekil değiştirilmeler gözardı edilir hesaba katılmaz. Malzemenin gerilme gibi referans büyüklük değerleri yalnızca o noktadan elde edilen değer sonuçlarından hesap edilir. Yani klasik elastisite teorisi yalnızca noktasal etkileri göz önünde bulundurarak çözüm yapar.

Cisimler şekil değiştirdiğinde ortaya çıkan cismin içerisinde geometriden kaynaklı yeni gerilmeler oluşur. Yer değiştirmelerden dolayı oluşan bu yeni gerilmelerin çözümü düzensiz bir form gösterir. Mesela yer değiştirmelerden kaynaklı oluşan bu gerilmeler cisimler şekil değiştirdiğinde, cismin içerisinde oluşan hem şekil değiştirme hemde gerilme değerleri sonsuza gitmektedir. Aynı problem yerel olmayan elastisite teorisiyle çözüldüğü zaman bu sorun ortadan kalkmaktadır. Oluşan bu durumu başka bir söyleyişle ifade etmek gerekirse; cismin içerisinde oluşan iç gerilmeler arasındaki mesafe atomik boyutta olursa bu cismin iç yapısının önemi azalır ve biz bu problemi klasik elastisite teorisiyle çözülebilir. Yalnız cisme uygulanan dış yüklerin yükselmesi durumunda cismin iç yapısı önem kazanacağından, gerilme hesabı yapılırken yerel olmayan elastisite teorisi ile problemi çözülebilir.

Yerel olmayan elastisite teorisi denklemlerinde çözüm uzayı kapsar sınırsızdır. Bu sınırsız seçenek arasından seçim yapabilmek için problemin esas istek ve şartlarına göre belirli sınır koşulları belirlenir.

Yerel olmayan elastisite teorisi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ancak bunlardan en önemlisi Türk bilim adamı olan Ahmet Cemal Eringen ( Sürekli Ortam Mekaniği, 1967), Foundation of Micropolar Thermoelasticity (Mikropoler Termoelastisitenin Temelleri, 1970) sürekli ortam mekaniğini geliştirdi, mikromorfik ve mikropoler fikirlerini ortaya attı, sürekli ortam mekaniği ve katı hal fiziği arasındaki bağı oluşturdu. Atom fiziği ve alan fiziği arasındaki ilişkiyi ortaya koydu. Ortaya atılan bu fikir yerel olmayan elastisite teorisinin temellerini atmış oldu. Doublet eksenlerinin şematik gösterimi Şekil 3.1’de görülmektedir.

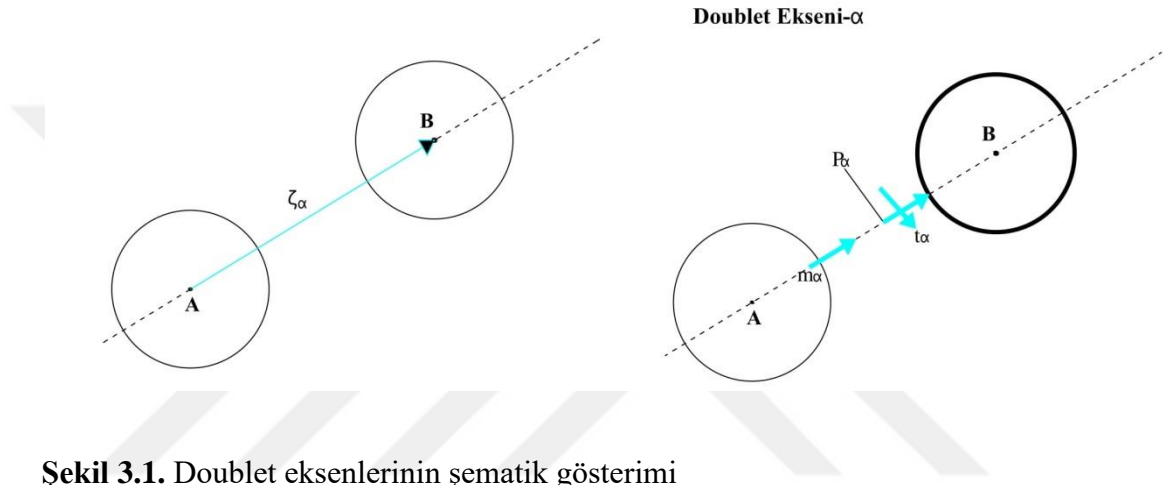
Bu teoriden başka gradyan elastisite teorisi, değiştirilmiş gerilme çifti teorisi, değiştirilmiş şekil değiştirme enerjisi elastisite teorisi, doublet mekanik teorisi vb. yüksek mertebeden elastisite teorileri öne sürülmüştür. Bu teorilerin ortak özelliği bir veya birden fazla boyut parametresi içermeleridir. Bu teorilerden bazıları cismi güçlendirici etki yaparken bazıları ise zayıflatıcı etkiye sahiptir.

Mekanik davranış olarak özetlemek gerekirse; bu teorileri kullanarak yapılan çözümlerde kritik burkulma yükleri, titreşim frekansları ve maksimum yer değiştirmeleri bu teorilerin bazılarıyla yapılan çözümlerde artarken bir diğer yöntemde azalmaktadır.

Aslında bu günümüz bilimsel verileri ile bir çelişki oluştursa da yapılan bilimsel çalışmaların sağlam verilere dayandığı görülmektedir. Günümüz teknolojisinde nano boyutlara inildikçe deneysel çalışmaların yapılması zorlaşmaktadır. Aynı zamanda nano boyutlarda yapılacak deney maliyetlerinin de arttığı kaçınılmaz bir gerçektir.

Moleküler dinamik modelleri ise bilgisayar çözümlerini çok zorlaştıracak hesaplama zahmeti ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda moleküler dinamik hesaplama yöntemi kullanıldığında çok miktarda sayısal integrasyon yapılacağı için yuvarlatma hataları ortaya çıkacaktır. Nano boyutlara inildiğinde bu hataların ihmal edilebilir tolerans sınırları içinde kalması zorlaşmaktadır. Gelişen bilgisayar teknolojileriyle hesaplama zahmetinin ortadan kalkacağı çok sayıda sayısal integrasyon yapılmasıyla ortaya çıkacak yuvarlatma hatalarının azaltılması mümkün olacaktır.

Asıl kullanışlı yöntem ise sürekli ortam mekaniğinin nano boyutlara uygulanmasıdır. Sürekli ortam mekaniği için integral ve diferansiyel temel alan çok çeşitli problemi yöneten ana denklem vardır. İntegral tabanlı denklemleri çözmek içerisindeki çekirdekten dolayı çok zor olduğundan araştırmacılar diferansiyel tabanlı problemi yöneten denklemlere yönelmektedir. Son yıllarda integral tabanlı problemi yöneten denklemleri de çözmek mümkün olmaktadır.



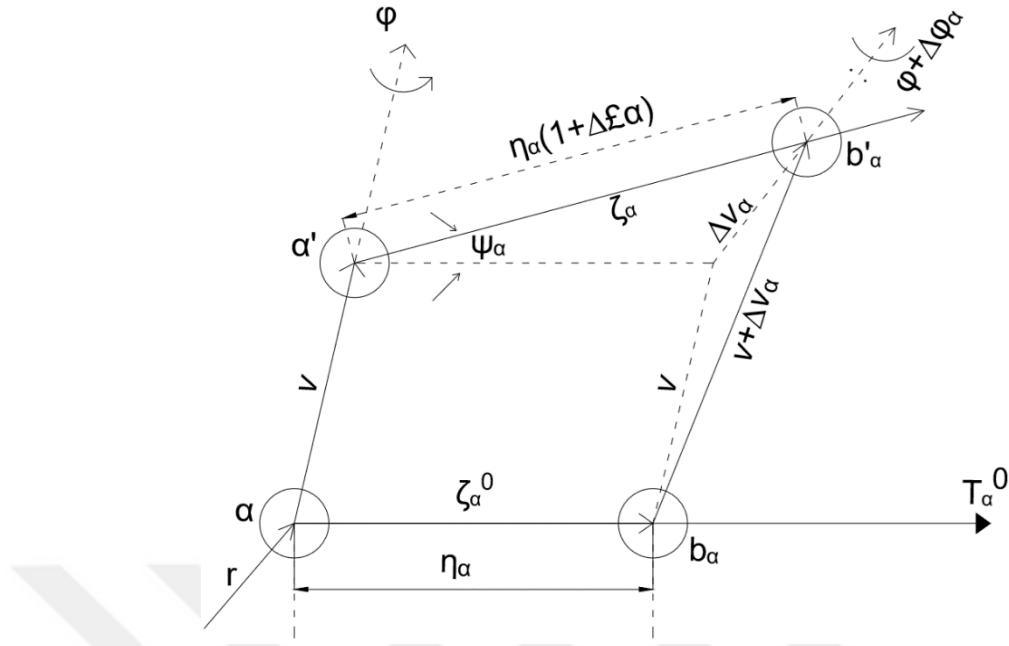
Şekil 3.1. Doublet eksenlerinin şematik gösterimi

### 3.2. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi Doublet Mekanik Yöntemi

Eğer  $v(z, t)$  a noktasının etrafındaki yer değiştirme uzayını gösterirse; basamaksal yer değiştirme aşağıdaki gibi yazılabilir. Eşil noktaların deformasyon grafiği Şekil 3.2'de görülmektedir.

$$\Delta v_\alpha = v(z + \delta_\alpha^0, t) - v(z, t) \quad (3.1)$$

Burada,  $z$  cismin durum vektörüdür ve  $\alpha$  ise eşil nokta sayısıdır. Ayrıca burada ki  $\Delta v_\alpha$  eşil ayırıcı mesafeden ( $\eta_\alpha$ ) nisbeten küçüktür. Dolayısıyla aşağıdaki eşitlik kolaylıkla yazılabilir.



Şekil 3.2.Eşil noktaların deformasyon grafiği

$$T_\alpha = T_\alpha^0 \quad (3.2)$$

Yukarıda ki eşitlik birim vektörü temsil etmektedir. Bu durumda aşağıdaki deformasyon ilişkisi ile tanımlanabilir.

$$\epsilon_\alpha = \frac{T_\alpha \cdot \Delta v_\alpha}{\eta_\alpha} \quad (3.3)$$

Yukarıdaki eşitlik aşağıdaki kompakt form olarak bir Taylor serisinde genişletilebilir (Fatahi-Vajari, A., Imam, A. 2016).

$$\epsilon_\alpha = \sum_{\psi=1}^M \frac{(\eta_\alpha)^{\psi-1}}{\psi!} T_\alpha^0 \cdot (T_\alpha^0 \cdot \vec{\nabla})^\psi v_\alpha \quad (3.4)$$

Burada,  $\nabla$  gradyan operatörü,  $\eta_\alpha$  iç karakteristik uzunluğu temsil eder. Mikro gerilme ve mikro şekil değiştirme arasındaki matematiksel ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$p_\alpha = \sum_{\beta=1}^n A_{\alpha\beta} \epsilon_\beta \quad (3.5)$$

Burada,  $p_\alpha$  eşil eksenler üzerinde ki mikro gerilmeyi gösterir ve  $A_{\alpha\beta}$  mikro modüllerin matrisini ifade eder. Bu durumda aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$T_\alpha^0 = T_{\alpha j}^0 e_j \quad (3.6)$$

$$p_\alpha = A_0 \epsilon_\alpha \quad (3.7)$$

Ayrıca eşitliklerin arasında makro ve mikro boyutta ki gerilmeler aşağıdaki formdadır (Fatahi-Vajari, A., Imam, A. 2016).

$$\sigma^M = \sum_{\alpha=1}^n T_\alpha^0 T_\alpha^0 \sum_{\psi=1}^M \frac{(-\eta_\alpha)^{\psi-1}}{\psi} T_\alpha^0 (T_\alpha^0 \cdot \nabla)^{(\psi-1)} p_\alpha \quad (3.8)$$

Burada,  $\sigma^M$  küçük ölçekli etkiyi içeren makro gerilmeyi temsil eder. Doublet (eşil) mekaniğin denkleminde aşağıdaki formül elde edilir.

$$\nabla \sigma^M + F_i = \rho \frac{\partial^2 v_i}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

$\rho$  kütle yoğunluğunu gösterir.  $t$  zaman ve  $v$  yer değiştirme vektörünü temsil eder. Makro ve mikro gerilmeler arasındaki bağıntıdan, denklem (3.8) elde edilir. Matris formunda aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\{\sigma\} = \{M\} \{p\} \quad (3.10)$$

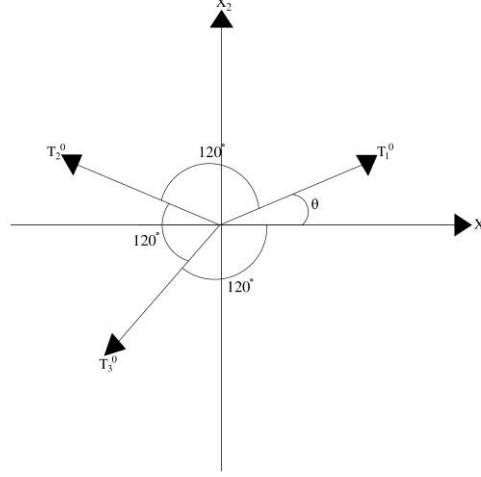
Burada,

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\{p\} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\{M\} = \begin{bmatrix} (T_{11}^0)^2 & (T_{21}^0)^2 & (T_{31}^0)^2 \\ (T_{21}^0)^2 & (T_{22}^0)^2 & (T_{23}^0)^2 \\ (T_{31}^0)^2 & (T_{32}^0)^2 & (T_{33}^0)^2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

matris açılımı şeklinde gösterilebilir. Eşil noktaların 120° derecelik açıyla grafiği Şekil 3.3' te görülmektedir.



**Şekil 3.3.** 120° derecelik açıyla üç eşil nokta

Birim matrisleri kullanarak; aşağıdaki ifade elde edilebilir (Fatahi-Vajari, A., Imam, A. 2016).

$$\epsilon_{\alpha} = T_{\alpha}^0 (\nabla_v) T_{\alpha}^0 \quad (3.14)$$

Yukarıdaki eşitlikten ve Şekil 3.2 kullanılarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{1}{2} T_{\alpha}^0 (\nabla_v + \nabla_v^T) T_{\alpha}^0 \quad (3.15)$$

Klasik elastisite teorisinde aşağıdaki denklem sıklıkla kullanılmaktadır:

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{1}{2} (\nabla_v + \nabla_v^T) \quad (3.16)$$

Burada,  $\epsilon$  doğrusal gerilme tansörünü ifade eder. (3.14) bağıntısı kullanılarak aşağıdaki matris eşitliği elde edilir.

$$\{e\} = \{M\}^T \{\epsilon\} \quad (3.17)$$

Burada,

$$\{\epsilon\} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\{e\} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

şeklinde kolon vektörlerdir.

### 3.3. Malzeme Matrisleri

Klasik elastisite teorisinde, mikro ve makro gerilme şekil değiştirme arasındaki matematiksel ilişki aşağıdaki kompakt formda gösterilir:

$$\{\sigma\} = \{D\} \{\epsilon\} \quad (3.20)$$

Burada, D matrisi aşağıda açık halde verilmiştir.

$$\{D\} = \begin{bmatrix} 4\mu \left( \frac{\lambda+\mu}{\lambda+2\mu} \right) & \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu} & 0 \\ \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu} & 4\mu \left( \frac{\lambda+\mu}{\lambda+2\mu} \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

(3.17) ve (3.21) denklemlerinden aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\{D\} = \{M\} \{A\} [M]^T \quad (3.22)$$

Doublet mekanik teorisinde, {A} aşağıdaki şekilde üçüncü dereceden simetrik bir matristir:

$$\{A\} = \begin{bmatrix} a & b & b \\ b & a & b \\ b & b & a \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

İzotropik malzeme durumunda ise bu matris, aşağıdaki forma basitleştirilebilir (Fatahi-Vajari, A., Imam, A. 2016):

$$\{M\} = \begin{bmatrix} \{\xi_{11}\} & \{\xi_{12}\} & \{\xi_{13}\} \\ \{\xi_{21}\} & \{\xi_{22}\} & \{\xi_{23}\} \\ \{\xi_{31}\} & \{\xi_{32}\} & \{\xi_{33}\} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

(3.24) denkleminde ki elemanlar aşağıda açık halde verilmiştir.

$$\{\xi_{11}\} = \cos^2 \theta \quad \{\xi_{12}\} = \cos^2(\theta + 60) \quad (3.25)$$

$$\{\xi_{13}\} = \cos^2(\theta + 120) \quad \{\xi_{21}\} = \sin^2 \theta \quad (3.26)$$

$$\{\xi_{22}\} = \sin^2(\theta + 60) \quad \{\xi_{23}\} = \sin^2(\theta + 120) \quad (3.27)$$

$$\{\xi_{31}\} = \sin \theta \cos \theta \quad \{\xi_{32}\} = \sin(\theta + 60) \cos(\theta + 60) \quad (3.28)$$

$$\{\xi_{33}\} = \sin(\theta + 120) \cos(\theta + 120) \quad (3.29)$$

Düzlem gerilme halinin kabullerinden aşağıdaki iki denklem bilinmektedir.

$$a = \frac{4}{9}\mu \left( \frac{7\lambda + 10\mu}{\lambda + 2\mu} \right) \quad (3.30)$$

$$b = \frac{4}{9}\mu \left( \frac{\lambda - 2\mu}{\lambda + 2\mu} \right) \quad (3.31)$$

Burada,  $\mu$  ve  $\lambda$  lame sabitleridir. Bu sabitler Poisson oranı ve elastisite modülü cinsinden aşağıda verilmiştir.

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.32)$$

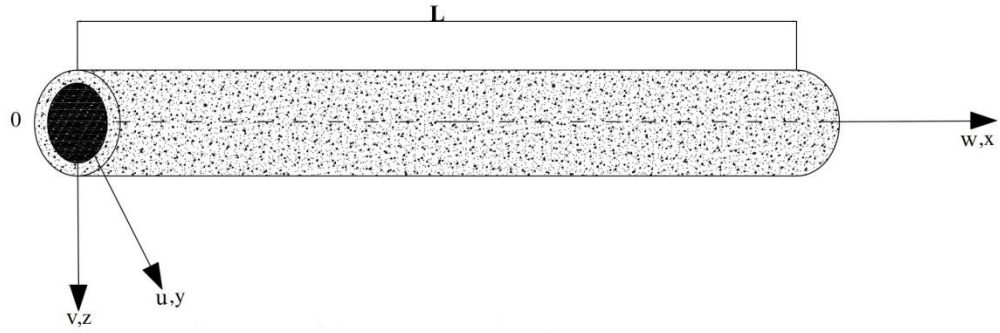
$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.33)$$

### 3.4. Tek Duvarlı Karbon Nanotüp İçin Doublet Mekanik Teorisi

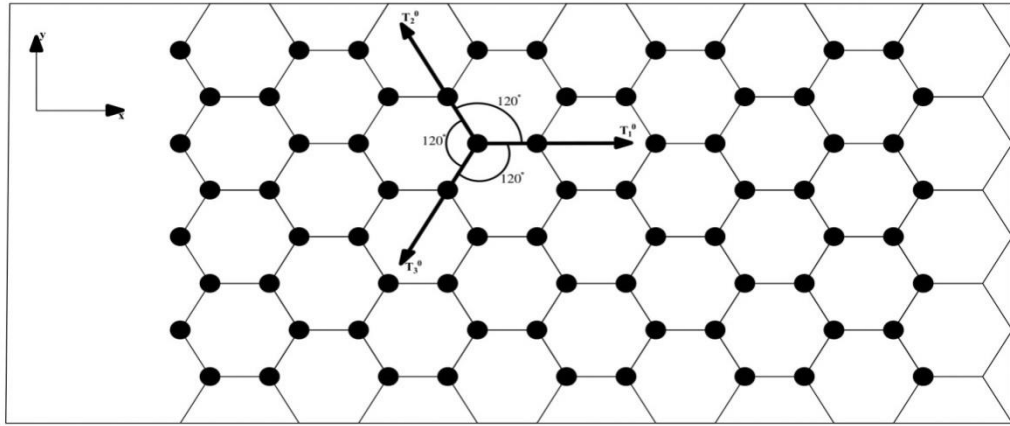
Doublet (eşil) mekanik teorisinden katı cisimlerin mikro yapısı problemin modellenmesi açısından önemlidir. Doublet mekanik teorisinde katı yapıların mikro yapısı eşil parçacıkların komşuluğunda ortaya çıkan gerilme şekil değiştirme bağıntılarının

incelenmesi şeklinde kabul yapılır. Yani mikro yapı gerilmeleri eşil parçacıkların ortak etkileşimi ile tanımlanmaktadır.

Bu bölümde Şekil 3.4.' te verilen karbon nanotüpün doublet mekanik teorisinde irdelenmesi gerçekleştirilecektir. Şekil 3.5.' te bir zigzag karbon nanotüpün açık gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.4. Nanotüpün koordinat eksenleri gösterimi



Şekil 3.5. Zigzag nanotüpün gösterimi

Bu bölümde yarıçapı  $R$ , uzunluğu  $L$ , poisson oranı  $\nu$ , elastite modülü  $E$ , kütle yoğunluğu  $\rho$ , kayma modülü  $\mu$ , en kesitin atalet momenti  $I$  ve en kesitin alanı  $A$  olan bir karbon nanotüp Doublet mekanik teorisinde incelenecektir. Şekil 3.4.' te gösterilen karbon nanotüpüde üç adet eşit açı ve uzunlukta doublet noktası vardır. Şekil 3.4.' te görülen doğrultu vektörleri açılar cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_{11}^0 = 1, \quad T_{21}^0 = -\cos 60, \quad T_{31}^0 = -\cos 60 \quad (3.34)$$

$$T_{12}^0 = 0, \quad T_{22}^0 = \cos 30 \sin \theta, \quad T_{32}^0 = -\cos 30 \sin \theta \quad (3.35)$$

$$T_{13}^0 = 0, \quad T_{23}^0 = -\cos 30 \cos \theta, \quad T_{33}^0 = \cos 30 \cos \theta \quad (3.36)$$

(3.4) denklemi aşağıdaki formda yazılabilir.

$$\epsilon_\alpha = T_\alpha^0 (\nabla_v) T_\alpha^0 + \frac{1}{2} \eta_\alpha [T_\alpha^0 (T_\alpha^0 \nabla) (T_\alpha^0 \nabla_v)] + \frac{1}{6} \eta_\alpha^2 [T_\alpha^0 (T_\alpha^0 \nabla) (T_\alpha^0 \nabla) (T_\alpha^0 \nabla_v)] \quad (3.37)$$

Yukarıdaki denklem ve (3.16) denklemi kullanılarak, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\epsilon_\alpha = T_{\alpha m}^0 T_{\alpha n}^0 (\epsilon_{mn} + \frac{1}{2} \eta_\alpha T_{\alpha s}^0 \frac{\partial \epsilon_{mn}}{\partial z_s} + \frac{1}{6} \eta_\alpha^2 T_{\alpha t}^0 T_{\alpha s}^0 \frac{\partial^2 \epsilon_{mn}}{\partial z_t \partial z_s}) \quad (3.38)$$

$$\sigma_{ij}^{(M)} = \sum_{\alpha=1}^n T_{\alpha i}^0 T_{\alpha j}^0 \left\{ \left( p_\alpha - \frac{1}{2} \eta_\alpha T_\alpha^0 (\nabla p_\alpha) + \frac{1}{6} \eta_\alpha^2 [(T_\alpha^0 \nabla) (T_\alpha^0 \nabla p_\alpha)] \right) \right\} \quad (3.39)$$

İç kuvvetler dahil edilmeyerek (3.9) denklemi Kartezyen koordinat sisteminde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial \sigma_{zz}^{(M)}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zy}^{(M)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}^{(M)}}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}^{(M)}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{xy}^{(M)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xx}^{(M)}}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yz}^{(M)}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{yy}^{(M)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yx}^{(M)}}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.42)$$

(3.40), (3.41) ve (3.42) denklemlerinde içerisinde ki  $v$ ,  $\omega$  ve  $u$ , klasik elastisite teorisindeki çubuk için  $z$ ,  $x$  ve  $y$  yönlerindeki deplasmanları göstermektedir. Bu çalışmada klasik bir çubukta sadece eksenel gerilme vardır.

$$\sigma_{zz}^{(M)} \neq 0 \quad (3.43)$$

Diğer yöndeki gerilmeler sıfırdır.

$$\sigma_{ij}^{(M)} = 0 \quad (3.44)$$

(3.40) ve (3.44) eşitliği kullanılarak, aksenal yönde hareket denklemi bulunabilir.

$$\frac{\partial \sigma_{zz}^{(M)}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.45)$$

$$p_\alpha = A_0 T_{\alpha m}^0 T_{\alpha n}^0 \left( \varepsilon_{mn} + \frac{1}{2} \eta_\alpha T_{\alpha s}^0 \frac{\partial \varepsilon_{mn}}{\partial z_s} + \frac{1}{6} \eta_\alpha^2 T_{\alpha t}^0 T_{\alpha s}^0 \frac{\partial^2 \varepsilon_{mn}}{\partial z_t \partial z_s} \right) \quad (3.46)$$

Yukarıdaki denklem ve (3.39) denklemi kullanılarak; matematiksel basitleştirmeler yapıldıktan sonra; aşağıdaki gerilme ilişkisi elde edilebilir.

$$\sigma_{ij}^{(M)} = \sum_{\alpha=1}^n A_0 T_{\alpha m}^0 T_{\alpha n}^0 \left( \varepsilon_{mn} + \frac{1}{2} \eta_\alpha T_{\alpha s}^0 \frac{\partial \varepsilon_{mn}}{\partial z_s} + \frac{1}{6} \eta_\alpha^2 T_{\alpha t}^0 T_{\alpha s}^0 \frac{\partial^2 \varepsilon_{mn}}{\partial z_t \partial z_s} \right) \quad (3.47)$$

Tek aksenli gerilme halinde  $\sigma_{xx}^{(M)}$  aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}^{(M)} = & A_0 (\sum_{\alpha=1}^3 T_{\alpha 1}^4) \varepsilon_{11} + \frac{1}{12} A_0 (\sum_{\alpha=1}^3 \eta^2 T_{\alpha 2}^6) \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial z^2} + A_0 (\sum_{\alpha=1}^3 T_{\alpha 1}^2 T_{\alpha 2}^2) \varepsilon_{22} \quad (3.48) \\ & + \frac{1}{12} A_0 (\sum_{\alpha=1}^3 \eta^2 T_{\alpha 1}^4 T_{\alpha 2}^2) \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial z^2} + A_0 (\sum_{\alpha=1}^3 T_{\alpha 1}^2 T_{\alpha 3}^2) \varepsilon_{33} \\ & + \frac{1}{12} A_0 (\sum_{\alpha=1}^3 \eta^2 T_{\alpha 1}^4 T_{\alpha 3}^2) \frac{\partial^2 \varepsilon_{33}}{\partial z^2} \end{aligned}$$

Düzlem gerilme kabulü uygulanırsa;

$$-\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} = \nu = \frac{1}{3} \quad (3.49)$$

(3.48) denklemi aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$\sigma_{zz}^{(M)} = A_0 \left( \varepsilon_{11} + \frac{1}{12} \eta^2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial z^2} \right) \quad (3.50)$$

$\varepsilon_{11} = \frac{\partial v}{\partial z}$  denklemi yukarıdaki bağıntıda yerine yazılırsa; aşağıdaki problemi yöneten denklem elde edilebilir (Fatahi-Vajari, A., Imam, A. 2016).

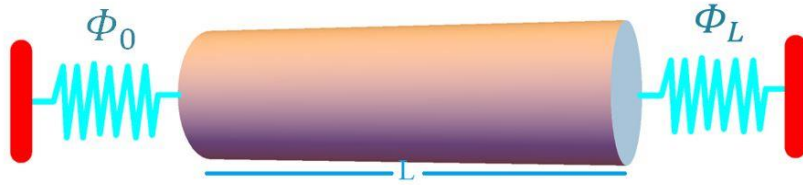
$$A_0 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{1}{12} \eta^2 A_0 \frac{\partial^4 v}{\partial z^4} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.51)$$

### 3.5. Problemin çözümü

Kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için literatürde birden fazla yöntem vardır. Bu çalışmada (3.51) denkleminde verilen kısmi diferansiyel denklem değişkenlerine ayrılarak çözülecektir. Eksenel yer değiştirme fonksiyonu olarak aşağıdaki gösterim kabul edilmiştir.

$$v(z, t) = \psi(z, t) e^{i\omega_n t} \quad (3.52)$$

Burada,  $\omega_n$  doğal titreşim frekansıdır. (3.52) denklemini (3.51) denkleminde yerine yazılırsa; aşağıdaki adi diferansiyel denklem elde edilir.



Şekil 3.6. İki ucu hareket edebilir karbon nanotüpün gösterimi

$$E \frac{d^2\psi(z)}{dz^2} + \frac{1}{12} \eta^2 E \frac{d^4\psi(z)}{dz^4} + \rho\omega_n^2 \psi(z) = 0 \quad (3.53)$$

Yukarıdaki ifade eşil mekanik teorisinde eksenel titreşim yapan bir çubuğun hareket denklemdir. Bu çalışmada hareket denkleminin çözümü için sınır koşullarının sağlatılmasında esneklik sağlaması bakımından Fourier sinus fonksiyonu ve Stoke dönüşümü birlikte kullanılacaktır. Eksenel yer değiştirme fonksiyonu üç ayrı fonksiyon şeklinde tanımlanacaktır, bunlardan iki tanesi sınırlarda olan sabit fonksiyonlardır üçüncüsü ise  $z$ 'ye bağımlı değişen bir fonksiyondur. Bu üç fonksiyon aşağıdaki üç denklemlerle gösterilmiştir.

$$\psi(z) = \psi_0 \quad z = 0, \quad (3.54)$$

$$\psi(z) = \psi_L \quad z = L, \quad (3.55)$$

$$\psi(z) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \sin\left(\frac{j\pi z}{L}\right) \quad 0 < z < L, \quad (3.56)$$

Burada, Fourier katsayısı

$$A_j = \frac{2}{L} \int_0^L \psi(z) \sin\left(\frac{j\pi z}{L}\right) dz \quad (3.57)$$

şeklindedir. Bu problem için Fourier Sinüs serisi seçilmiştir ancak bilindiği gibi Fourier Sinüs serisi bu problemin elastik sınır koşulları şartını sağlamamaktadır. Ayrıca Fourier kosinüs serisi de seçilebilirdi. Stokes dönüşümü seçilmiş olan herhangi bir Fourier serisine uygulanabileceğinden sınır koşullarının sağlatılmasına ihtiyaç yoktur. Bu çalışmanın özgün taraflarından biri de sınır koşullarının seçimlerinde sağlanan özgürlüktür.

### 3.6. Stokes' Dönüşümü

(3.56) denkleminin birinci türevi aşağıda alınmıştır.

$$\psi'(z) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{j\pi}{L} A_j \cos\left(\frac{j\pi z}{L}\right), \quad (3.58)$$

Yukarıdaki ifade Fourier kosinüs serisi ile aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\psi'(z) = \frac{b_0}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} b_j \cos\left(\frac{j\pi z}{L}\right), \quad (3.59)$$

(3.59) denklemindeki Fourier katsayıları aşağıda yazılmıştır.

$$b_0 = \frac{2}{L} \int_0^L \psi'(z) dz = \frac{2}{L} [\psi(L) - \psi(0)], \quad (3.60)$$

$$b_j = \frac{2}{L} \int_0^L \psi'(z) \cos\left(\frac{j\pi z}{L}\right) dz \quad j=1, 2, \dots \quad (3.61)$$

Yukarıdaki ifadelerde kısmi integrasyon uygulanırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$b_j = \frac{2}{L} \left[ \Psi(z) \cos\left(\frac{j\pi z}{L}\right) \right]_0^L + \frac{2}{L} \left[ \frac{j\pi}{L} \int_0^L \psi(z) \sin\left(\frac{j\pi z}{L}\right) dz \right], \quad (3.62)$$

$$b_j = \frac{2}{L} [(-1)^j \psi(L) - \psi(0)] + \frac{j\pi}{L} A_j \quad (3.63)$$

Bu prosedüre Stokes' dönüşümü adı verilir. Yüksek mertebeden türevlerde benzer şekilde bulunabilir. Aşağıda ilk dört türev bulunarak yazılmıştır.

$$\frac{d\Psi(z)}{dz} = \frac{\psi_L - \psi_0}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \cos(\beta_j z) \left( \frac{2((-1)^j \psi_L - \psi_0)}{L} + \beta_j A_j \right), \quad (3.64)$$

$$\frac{d^2\Psi(z)}{dz^2} = - \sum_{j=1}^{\infty} \beta_j \sin(\beta_j z) \left( \frac{2((-1)^j \psi_L - \psi_0)}{L} + \beta_j A_j \right), \quad (3.65)$$

$$\frac{d^3\Psi(z)}{dz^3} = \frac{\psi''_L - \psi''_0}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \cos(\beta_j z) \left( \frac{2((-1)^j \psi''_L - \psi''_0)}{L} - \beta_j^2 \frac{2((-1)^j \psi_L - \psi_0)}{L} + \beta_j A_j \right) \quad (3.66)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4\Psi(z)}{dz^4} = & - \sum_{j=1}^{\infty} \beta_j \sin(\beta_j z) \left( \frac{2((-1)^j \psi''_L - \psi''_0)}{L} - \beta_j^2 \left[ \frac{2((-1)^j \psi_L - \psi_0)}{L} + \beta_j A_j \right] \right) \end{aligned} \quad (3.67)$$

Burada,

$$\beta_j = \frac{j\pi}{L} \quad (3.68)$$

şeklindedir. (3.56), (3.65), (3.67) ve (3.68) denklemleri kullanılarak Fourier katsayısı aşağıdaki gibi bulunur.

$$A_j = \frac{2E\beta_j(\eta^2(-\lambda_2) + \lambda_1 \psi_0 + 12(-1)^j \psi_L)}{\lambda_3 L} \quad (3.69)$$

Burada,

$$\lambda_1 = \eta^2 \beta_j^2 - 12 \quad (3.70)$$

$$\lambda_2 = (-1)^j (\varphi_L \beta_j^2 - \psi''_L) + \psi''_0 \quad (3.71)$$

$$\lambda_3 = E\eta^2 \beta_j^4 - 12E\beta_j^2 + 12\rho\omega^2 \quad (3.72)$$

şeklinde verilmiştir. Bu durumda yukarıdaki ifade aksel yer değiştirme fonksiyonunda yerine yazılırsa aşağıdaki formülasyon sınır koşullarını da içerecek şekilde bulunur.

$$\Psi[z] = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2E\beta_j(\eta^2(-\lambda_2) + \lambda_1 \psi_0 + 12(-1)^j \psi_L)}{\lambda_3 L} \cdot \sin(\beta_j z) \quad (3.73)$$

L uzunluğunda ki uçları aksel yaylarla mesnetlenmiş karbon nanotüp Şekil 3.6' da gösterilmiştir. Kuvvet sınır koşulları aşağıda verilmiştir.

$$AE \left( \frac{d\psi}{dz} + \frac{1}{12} \frac{d^3\psi}{dz^3} \right) = F_0 \quad z = 0, \quad (3.74)$$

$$AE \left( \frac{d\psi}{dz} + \frac{1}{12} \frac{d^3\psi}{dz^3} \right) = F_L \quad z = L, \quad (3.75)$$

Burada,  $F_0$  ve  $F_L$  uçlarda oluşacak yay kuvvetleridir. Bu durumda (3.74), (3.75) denklemleri yay katsayıları ve sınır yer değiştirmeleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir (Fatahi-Vajari, A., Imam, A. 2016).

$$AE \left( \frac{d\psi}{dz} + \frac{1}{12} \frac{d^3\eta\psi}{dz^3} \right) = \Phi_0 \psi_0 \quad z = 0, \quad (3.76)$$

$$AE \left( \frac{d\psi}{dz} + \frac{1}{12} \frac{d^3\eta\psi}{dz^3} \right) = \Phi_L \psi_L \quad z = L, \quad (3.77)$$

Yukarıdaki denklemler ve Stoke dönüşümünden sonra bulunan (3.65)- (3.67) de göz önünde bulundurulursa; aşağıdaki sonsuz serilerden oluşan homojen denklem sistemi elde edilir.

$$\left( -\Phi_0 - \frac{AE}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2AEL(-1)^{j+1} \rho \omega^2 (\pi^2 \eta^2 j^2 - 12L^2)}{-12\pi^2 EL^2 j^2 + \pi^4 E \eta^2 j^4 + 12L^4 \rho \omega^2} \right) \psi_0 + \quad (3.78)$$

$$\left( \frac{AE}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2AEL(-1)^{j+1} \rho \omega^2 (\pi^2 \eta^2 j^2 - 12L^2)}{-12\pi^2 EL^2 j^2 + \pi^4 E \eta^2 j^4 + 12L^4 \rho \omega^2} \right) \psi_L = 0$$

$$\left( \frac{AE}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2AEL(-1)^{j+1} \rho \omega^2 (\pi^2 \eta^2 j^2 - 12L^2)}{-12\pi^2 EL^2 j^2 + \pi^4 E \eta^2 j^4 + 12L^4 \rho \omega^2} \right) \psi_0 + \quad (3.79)$$

$$\left( -\Phi_L - \frac{AE}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2AEL(-1)^{j+1} \rho \omega^2 (\pi^2 \eta^2 j^2 - 12L^2)}{-12\pi^2 EL^2 j^2 + \pi^4 E \eta^2 j^4 + 12L^4 \rho \omega^2} \right) \psi_L = 0$$

Yukarıdaki denklemlerde yay parametrelerine ( $\Phi_0 - \Phi_L$ ) sıfıra yakın çok küçük değerler verdiğimizde bu sınır koşulları serbest uca dönüşmektedir. Diğer taraftan bu yay

parametrelerine rakamsal olarak çok büyük rakamsal değerler verdiğimizde, sınır koşulları ankastre özellik göstermektedir.

### 3.7. Özdeğer Problemi

Yukarıdaki sistem denklemleri (3.78), (3.79) matris formunda aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_0 \\ \Psi_L \end{bmatrix} = 0 \quad (3.80)$$

Burada, matrisi oluşturan elemanlar aşağıda yazılmıştır.

$$\Gamma_{11} = \left( -\Phi_0 - \frac{AE}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \left( \frac{2AEL(-1)^{j+1}\rho\omega^2(\pi^2\eta^2j^2 - 12L^2)}{-12\pi^2EL^2j^2 + \pi^4E\eta^2j^4 + 12L^4\rho\omega^2} \right) \right) \quad (3.81)$$

$$\Gamma_{12} = \left( \frac{AE}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \left( \frac{2AEL(-1)^{j+1}\rho\omega^2(\pi^2\eta^2j^2 - 12L^2)}{-12\pi^2EL^2j^2 + \pi^4E\eta^2j^4 + 12L^4\rho\omega^2} \right) \right) \quad (3.82)$$

$$\Gamma_{21} = \left( \frac{AE}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \left( \frac{2AEL(-1)^{j+1}\rho\omega^2(\pi^2\eta^2j^2 - 12L^2)}{-12\pi^2EL^2j^2 + \pi^4E\eta^2j^4 + 12L^4\rho\omega^2} \right) \right) \quad (3.83)$$

$$\Gamma_{22} = \left( -\Phi_L - \frac{AE}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \left( \frac{2AEL(-1)^{j+1}\rho\omega^2(\pi^2\eta^2j^2 - 12L^2)}{-12\pi^2EL^2j^2 + \pi^4E\eta^2j^4 + 12L^4\rho\omega^2} \right) \right) \quad (3.84)$$

(3.80) denklemi bir özdeğer problemidir. Bilindiği gibi katsayılar matrisinin determinanı sıfıra eşitlenerek bir karakteristik denklem elde edilir.

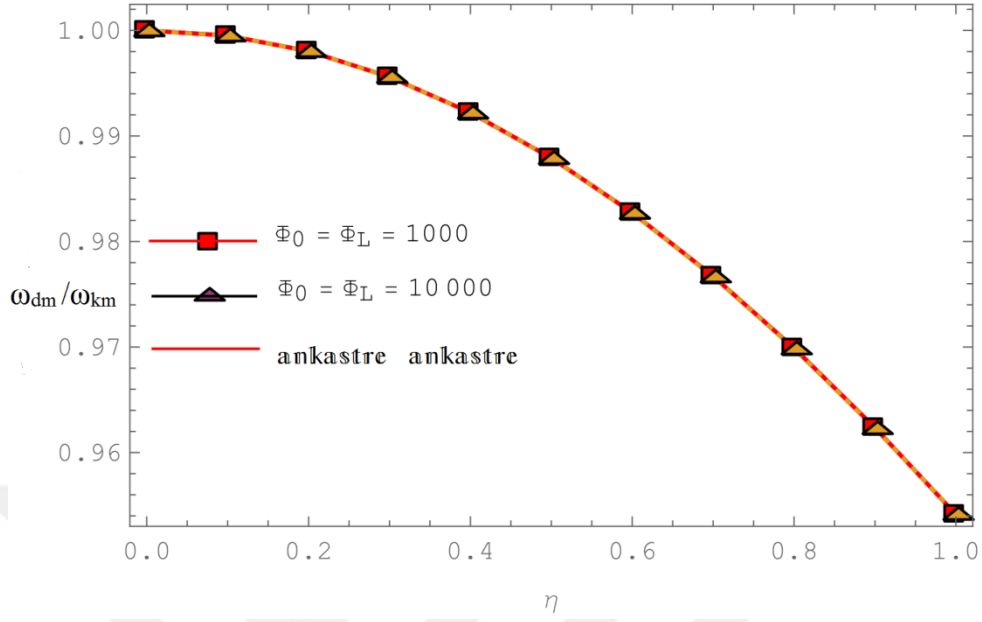
$$|\Gamma_{\eta\nu}| = 0 \quad (\eta, \nu = 1, 2) \quad (3.85)$$

(3.83) determinantının bulunmasıyla elde edilen karakteristik denklemin kökleri sistemin serbest titreşim frekanslarını vermektedir. Bu frekansların en küçüğüne sistemin Doublet mekanik teorisindeki doğal titreşim frekansı denir. Burada dikkat edilmesi gereken husus yukarıdaki formülasyonun sınır koşullarında tasarımcıya esneklik sağlamasıdır. Ayrıca literatürde bulunan çalışmaların bir çoğunda sınır koşullarını sağlayan fonksiyon önerme zorunluluğu bulunmaktadır. Bilindiği gibi sadece belirli sınır koşullarında bu fonksiyonları bulmak kolaydır. Sınır koşullarının karmaşık olması durumunda ise bu

fonksiyonu bulmak oldukça zordur hatta çoğu zaman imkansızdır. Bu çalışmada her bir sınır koşulu değişiminde yaklaşım fonksiyonunu değiştirmeye ihtiyaç olmamaktadır. Yani bu çalışmanın temel amacı bütün sınır koşulları için titreşim frekanslarını veren genel bir yöntem sunmaktır.



#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA



**Şekil 4.1.** Yapılan çalışmanın doğruluğunun ve hassasiyetinin kontrolü

Bu çalışmada önerilen analitik çözümün doğruluğunu test etmek ve sonsuz serilerde kullanılacak terim sayısını tespit etmek için ilk olarak matematiksel bir değerlendirme çalışması yapılması gerekmektedir. Bilindiği gibi (3.83) denklemi sonsuz serilerden oluşmaktadır. Bu terimler sonsuza yaklaştığında kapalı çözüm olacaktır. Ancak pratikte sonsuz terimin alınması matematiksel çözüm açısından mümkün değildir ve bilgisayar analizinde çok yüksek terim kullanmak hesaplama süresini uzatmaktadır. Dolayısıyla bu serilerin bir yerde kesilmesi ve o terim sayısı ile hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bunun için aksel yaylarla mesnetlenmiş bir karbon nanotüp ele alınmıştır ve aşağıda sıralanan numerik değerler kullanılarak analiz çalışması yapılmıştır.  $E = 1 \text{ Tpa}$ ,  $\eta = 0.147$ ,  $\rho = 2491 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Phi_0 = \Phi_L = 1000 \text{ nN/nm}$ ,  $10,000 \text{ nN/nm}$  değerler verilerek ankaastre-ankaastre sınır koşullarının frekans sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1’de görüleceği gibi yay parametrelerinin  $1000 \text{ nN/nm}$  değerinden sonra ankaastre sonuçlara çok yakın sonuçlar çıkmaktadır. Bu çalışmada 250 terim kullanılarak sonsuz serilerdeki 250 terim kullanılmıştır.

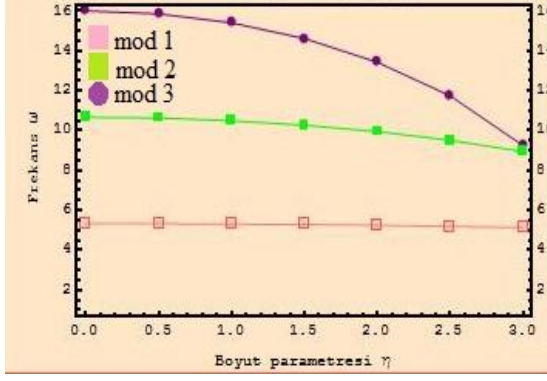
Yukarıdaki kontrol çalışmasından görüldüğü gibi yay parametresinin 1000 nN/nm den büyük olduğu durumlarda ankastre sonuçlarla benzer sonuçlar elde edilmektedir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 de  $\Phi_0 = \Phi_L = 10^9$  nN/nm alınıp, kütle yoğunluğu  $\rho = 2.01$  kg/m<sup>3</sup>, karbon nanotüp enkesit alanı  $A = \pi 1.1^2$  nm<sup>2</sup>, karbon nanotüp boyu  $L = 10$  nm, sabit kabul edilerek, elastisite modülünün farklı değerleri için frekans değerleri elde edilmiş ve söz konusu çizelgelerde verilmiştir. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 de görüldüğü gibi boyut parametresi arttıkça frekans değerleri düşmektedir. Bu düşüş yüksek modlarda daha belirgindir. Aşağıdaki çizimlerde DM kısaltması eşil mekanik teorisinde yapılan çözümleri, CM ve KM kısaltması klasik elastisite teorisinde yapılan çözümleri ifade etmektedir.

**Çizelge 4.1.** Elastisite modülünün 580 nN/nm<sup>2</sup> olması durumunda ilk üç titreşim frekansı

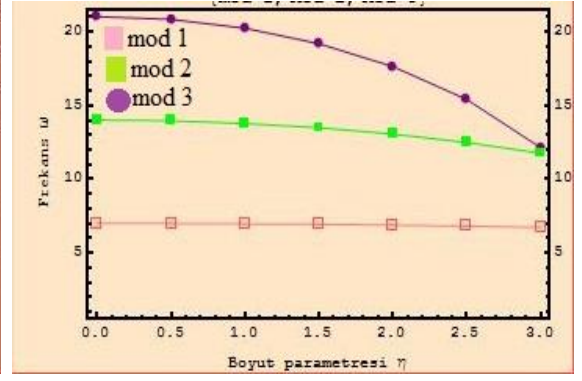
$\eta$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
0	5,34	10,67	16,01
0,5	5,33	10,63	15,86
1,0	5,31	10,49	15,41
1,5	5,29	10,27	14,62
2,0	5,25	9,95	13,43
2,5	5,19	9,51	11,74
3,0	5,13	8,95	9,25

**Çizelge 4.2.** Elastisite modülünün 2500 nN/nm<sup>2</sup> olması durumunda ilk üç titreşim frekansı

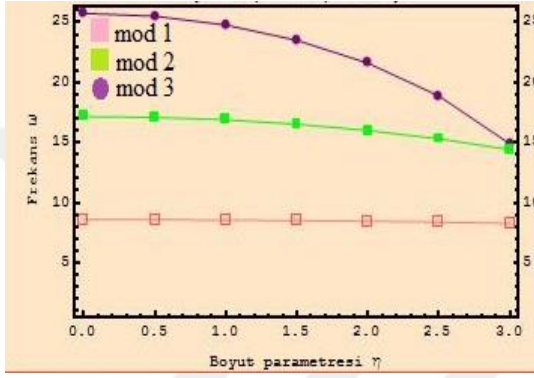
$\eta$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
0	11,08	22,16	33,24
0,5	11,07	22,07	32,93
1,0	11,03	21,79	31,98
1,5	10,98	21,32	30,34
2,0	10,90	20,65	27,89
2,5	10,79	19,75	24,37
3,0	10,66	18,59	19,20



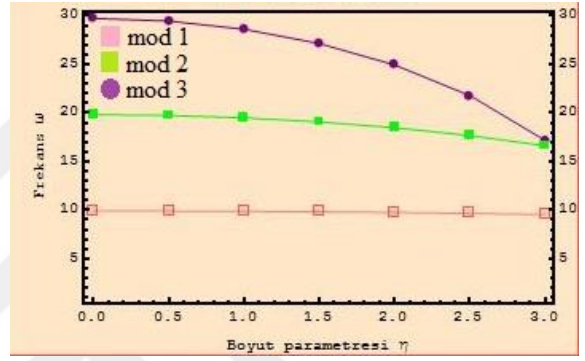
(a)  $E= 580 \text{ nN/nm}^2$



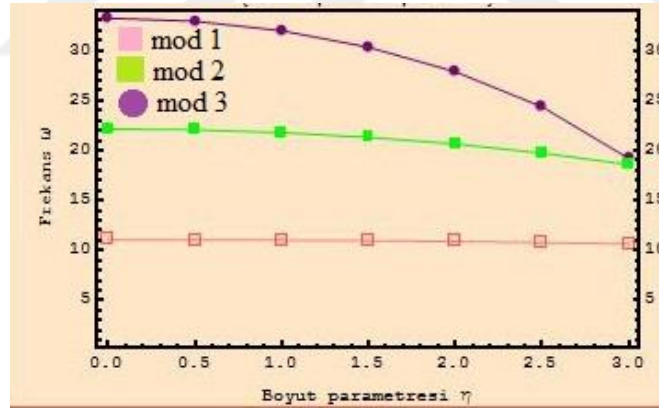
(b)  $E= 1000 \text{ nN/nm}^2$



(c)  $E= 1500 \text{ nN/nm}^2$



(d)  $E= 2000 \text{ nN/nm}^2$



(e)  $E= 2500 \text{ nN/nm}^2$

**Şekil 4.2.** Elastisite modülünün farklı değerleri için boyut parametresine bağlı frekans değerleri

Şekil 4.2 a-e' de boyut parametresinin serbest titreşim frekanslarına etkisi ilk üç mod için şematik olarak gösterilmiştir. Şekillerden görüleceği gibi boyut parametresi arttıkça ilk iki mod bu artıştan fazla etkilenmezken üçüncü modun sayısal değerleri liner olmayan şekilde azalmaktadır.

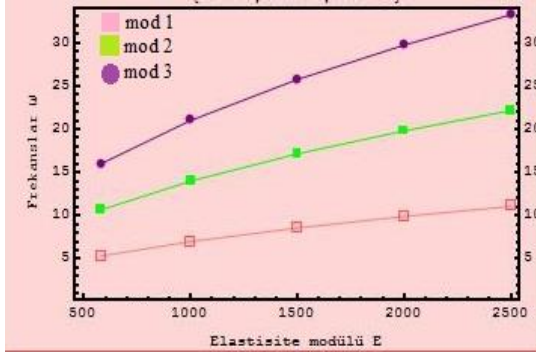
Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’ te Elastisite modülünün farklı değerleri için bu çalışmada bulunan algoritmaya göre frekans değerleri verilmiştir. Söz konusu çizelgelerden görüleceği gibi Elastisite modülü arttıkça frekanslarda artmıştır. Bu artış yüksek modlarda daha belirgindir.

**Çizelge 4.3.**  $\eta = 1,5$  nm boyut parametresi sabit değeri için Elastisite modülünün ilk üç frekans parametresine etkisi

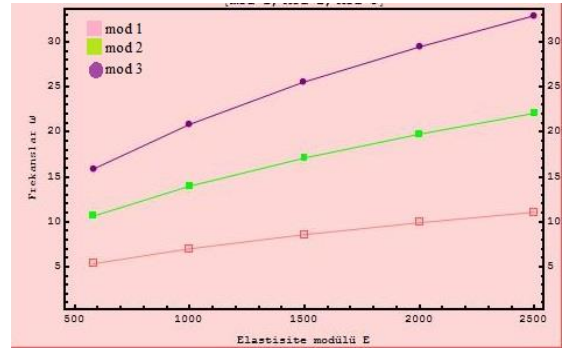
E	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
580	5,29	10,27	14,62
1000	6,94	13,49	19,19
1500	8,50	16,52	23,50
2000	9,82	19,07	27,14
2500	10,98	21,32	30,34

**Çizelge 4.4.**  $\eta = 2,5$  nm boyut parametresi sabit değeri için Elastisite modülünün ilk üç frekans parametresine etkisi

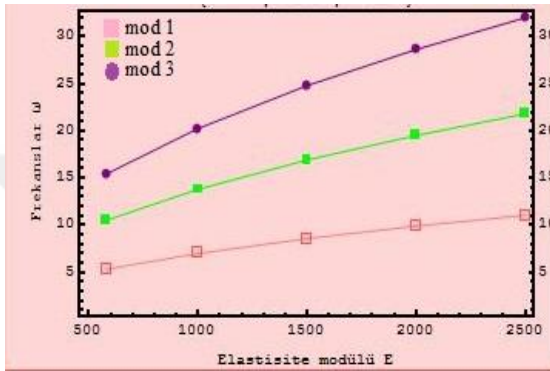
E	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
580	5,19	9,51	11,74
1000	6,82	12,49	15,41
1500	8,36	15,30	18,87
2000	9,65	17,66	21,79
2500	10,79	19,75	24,37



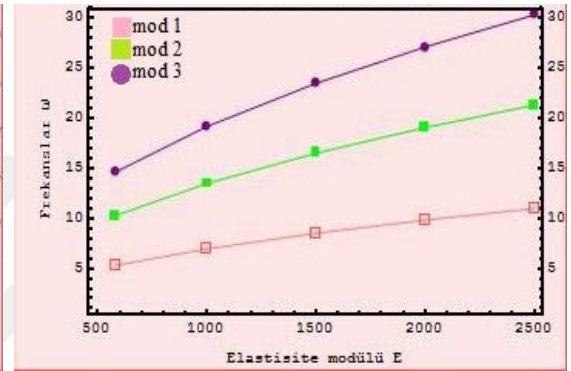
(a)  $\eta = 0$  nm



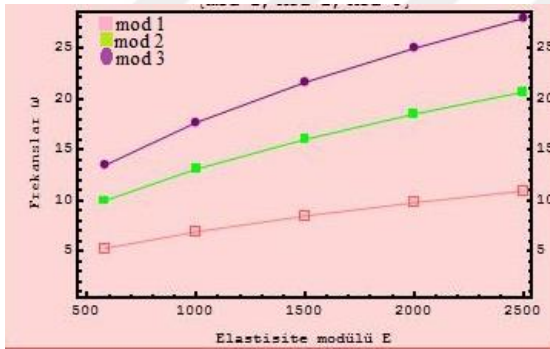
(b)  $\eta = 0.5$  nm



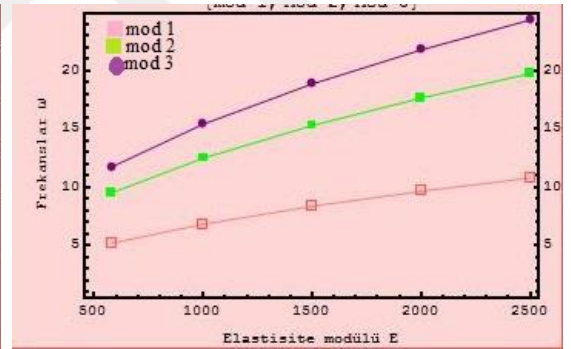
(c)  $\eta = 1.0$  nm



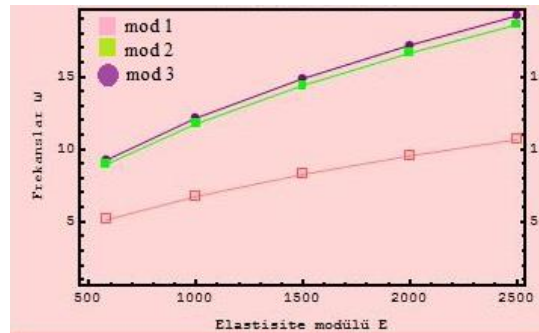
(d)  $\eta = 1.5$  nm



(e)  $\eta = 2.0$  nm



(f)  $\eta = 2.5$  nm



(g)  $\eta = 3.0$  nm

Şekil 4.3. Boyut parametresinin sabit değerleri için Elastisite modülüne bağlı frekans parametreleri değişimleri

Şekil 4.3 a-g' de boyut parametresinin sabit değerleri için Elastisite modülünün ilk üç serbest titreşim frekanslarına etkisi çalışılmıştır. Elastisite modülünün sayısal değeri arttıkça serbest titreşim frekansları da artmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur.

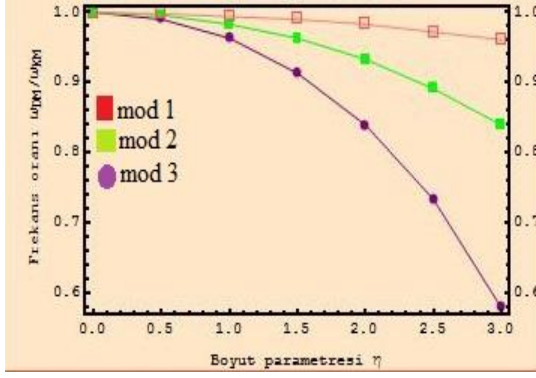
Elastisite modülünün farklı iki değeri için boyut parametresine bağlı eşil mekanik teorisinin klasik mekanik teorisine oranı Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6' da gösterilmiştir. Çizelgelerden görüldüğü gibi farklı boyut parametrelerinin ilk üç moda etkisi oldukça fazladır. Ayrıca yüksek modlarda boyut parametresinin etkisi daha fazladır. Bu durumda bulunan sonuçlar literatürle uyum sağlamaktadır. Bilindiği gibi nano boyutlara inildikçe yerel olmayan etkiler ön plana çıkmakta ve klasik elastisite teorisinin kullanılması yetersiz hale gelmiştir. Ayrıca eşil mekanik teorisi klasik mekanik teorisine göre frekans değerlerinde daha düşük değerler vermektedir. Bu oran yüksek modlarda daha etkilidir.

**Çizelge 4.5.**  $E = 1000 \text{ nN/nm}^2$  sabit Elastisite modülü değeri için farklı boyut parametrelerinin frekans oranına etkisi

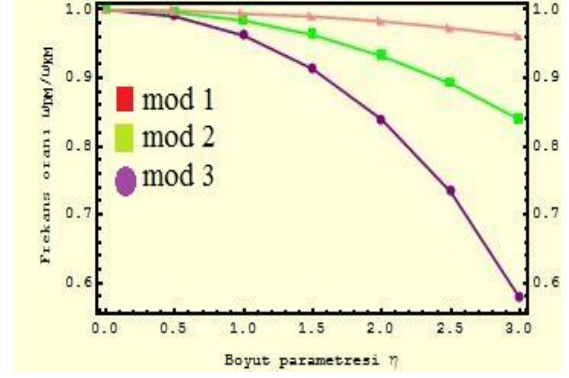
$\eta$	$\omega_{\text{doublet 1}} / \omega_{\text{klasik 1}}$	$\omega_{\text{doublet 2}} / \omega_{\text{klasik 2}}$	$\omega_{\text{doublet 3}} / \omega_{\text{klasik 3}}$
0	1	1	1
0,5	0,999	0,996	0,990
1,0	0,994	0,984	0,962
1,5	0,990	0,963	0,913
2,0	0,983	0,932	0,839
2,5	0,973	0,892	0,733
3,0	0,961	0,839	0,578

**Çizelge 4.6.**  $E = 2000 \text{ nN/nm}^2$  sabit Elastisite modülü değeri için farklı boyut parametrelerinin frekans oranına etkisi

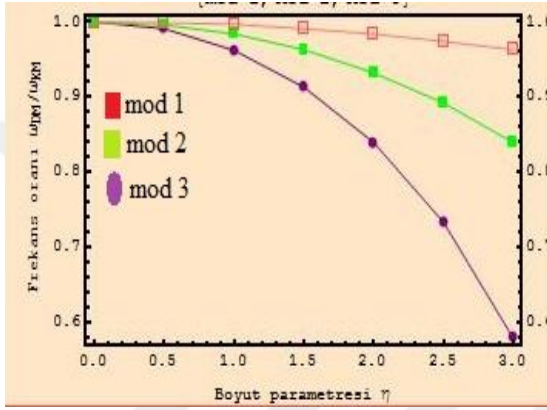
$\eta$	$\omega_{\text{doublet 1}} / \omega_{\text{klasik 1}}$	$\omega_{\text{doublet 2}} / \omega_{\text{klasik 2}}$	$\omega_{\text{doublet 3}} / \omega_{\text{klasik 3}}$
0	1	1	1
0,5	0,999	0,996	0,991
1,0	0,996	0,983	0,962
1,5	0,991	0,962	0,913
2,0	0,984	0,932	0,839
2,5	0,974	0,891	0,733
3,0	0,965	0,839	0,578



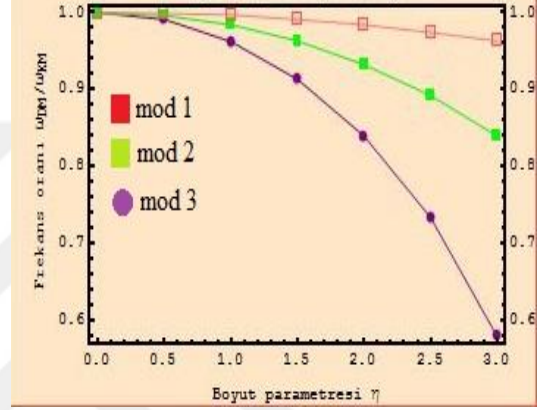
(a)  $E= 580 \text{ nN/nm}^2$



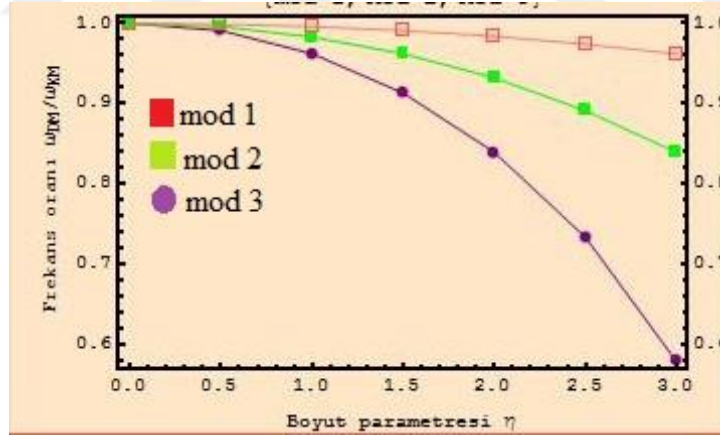
(b)  $E= 1000 \text{ nN/nm}^2$



(c)  $E= 1500 \text{ nN/nm}^2$



(d)  $E= 2000 \text{ nN/nm}^2$



(e)  $E= 2500 \text{ nN/nm}^2$

**Şekil 4.4.** Elastisite modülünün sabit değerleri için eşil mekanik teorisinin klasik elastisite teorisine oranı ve bunun ilk üç modun serbest titreşim frekanslarına etkisi

Şekil 4.4 a-e' de sabit Elastisite modülü için eşil mekanik teorisinin klasik mekanik teorisine oranı ve bunun serbest titreşim frekanslarına etkisi incelenmiştir. Şekillerden görüleceği gibi Doublet (eşil) mekanik teorisinde yapılan çözümler serbest titreşim

frekansları için daha düşük değerler vermektedir. Ortaya çıkan azalmanın boyut parametresi artığında miktar olarak daha fazla gözlemlendiği söz konusu şekillerden görülmektedir.

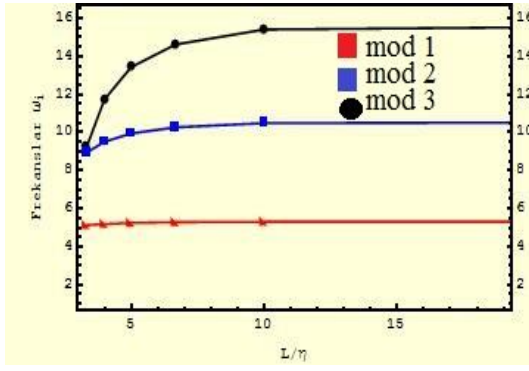
Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8 de farklı elastisite modülleri için karbon nanotüp boyunun boyut parametresine oranı ve bu oranın serbest titreşim frekanslarına etkisi tablolastırılmıştır. Çizelgelerden görüldüğü gibi  $L/\eta$  oranı düştükçe serbest titreşim frekansları azalmaktadır. Bu azalma yüksek modlarda daha belirgindir. Karbon nanotüpün boyu kıaldıkça yerel olmayan etkiler ön plana çıkmakta, boy uzadıkça klasik elastisite ve eşil elastisite sonuçları benzerlik göstermektedir.

**Çizelge 4.7.**  $E = 2000 \text{ nN/nm}^2$  sabit Elastisite modül değeri için farklı karbon nanotüp boyu boyut parametresi oranının serbest titreşim frekanslarına etkisi

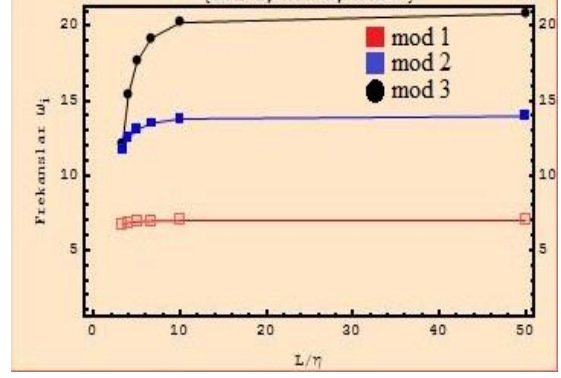
$L/\eta$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
<b>50</b>	9,90	19,74	29,45
<b>10</b>	9,87	19,49	28,61
<b>6,67</b>	9,82	19,07	27,14
<b>5</b>	9,75	18,47	24,94
<b>4</b>	9,67	17,16	21,79
<b>3,33</b>	9,54	16,63	17,18

**Çizelge 4.8.**  $E = 2500 \text{ nN/nm}^2$  sabit Elastisite modül değeri için farklı karbon nanotüp boyu boyut parametresi oranının serbest titreşim frekanslarına etkisi

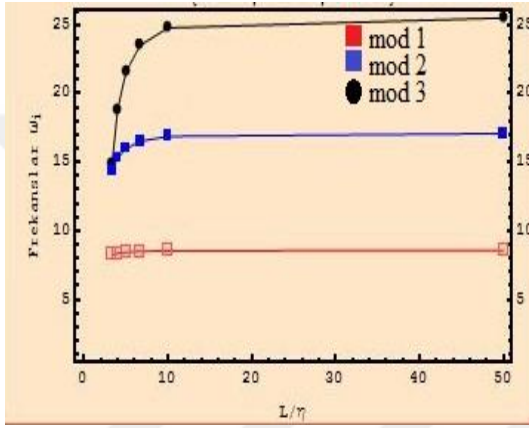
$L/\eta$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
<b>50</b>	11,07	22,07	32,93
<b>10</b>	11,03	21,79	31,98
<b>6,67</b>	10,98	21,32	30,34
<b>5</b>	10,90	20,65	27,89
<b>4</b>	10,79	19,75	24,37
<b>3,33</b>	10,66	18,59	19,20



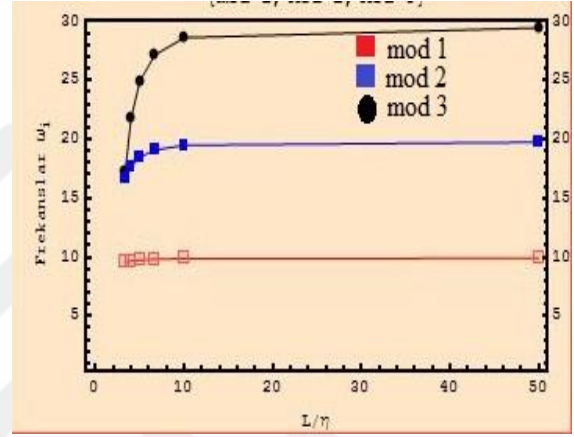
(a)  $E= 580 \text{ nN/nm}^2$



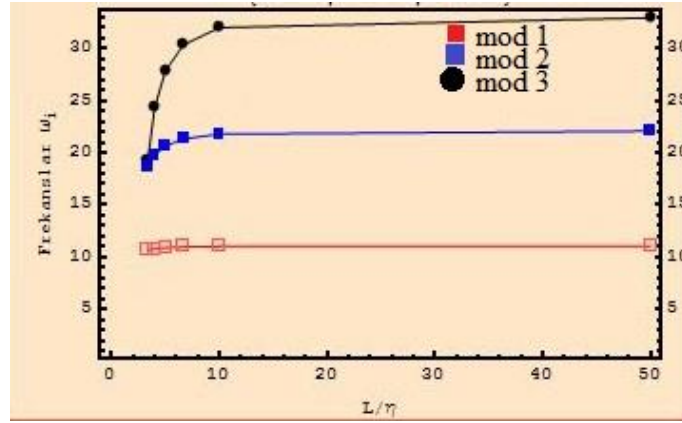
(b)  $E= 1000 \text{ nN/nm}^2$



(c)  $E= 1500 \text{ nN/nm}^2$



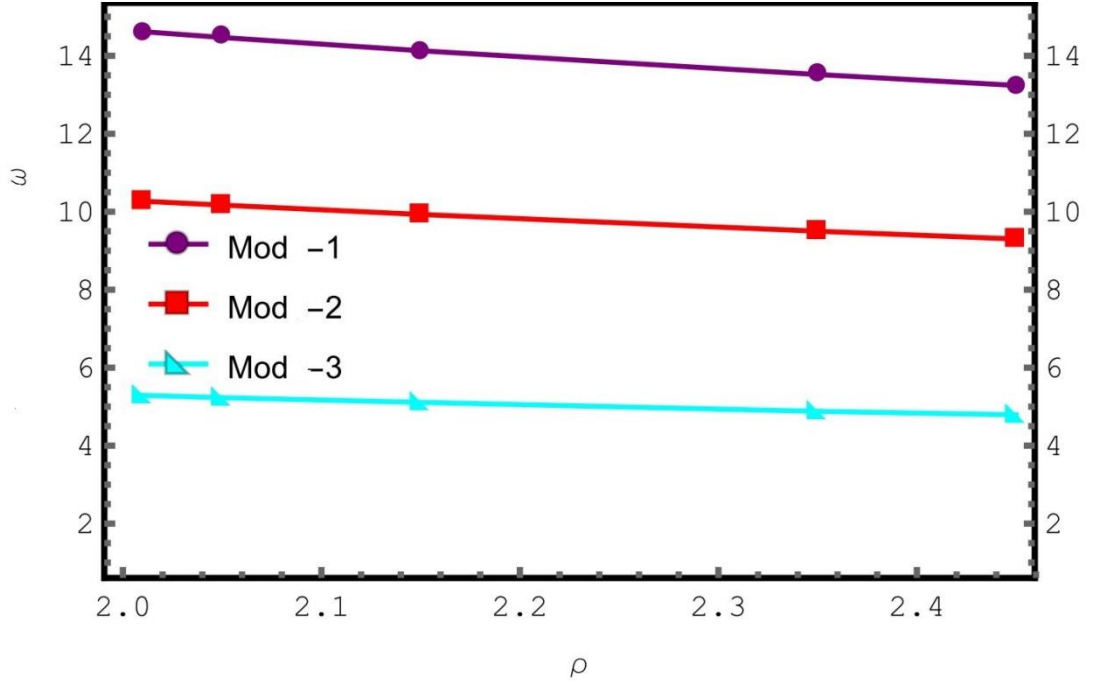
(d)  $E= 2000 \text{ nN/nm}^2$



(e)  $E= 2500 \text{ nN/nm}^2$

**Şekil 4.5.** Elastisite modülünün sabit değerleri için karbon nanotüp boyunun boyut parametresine oranı ve bu oranın ilk üç serbest titreşim frekansına bağlı değişimleri

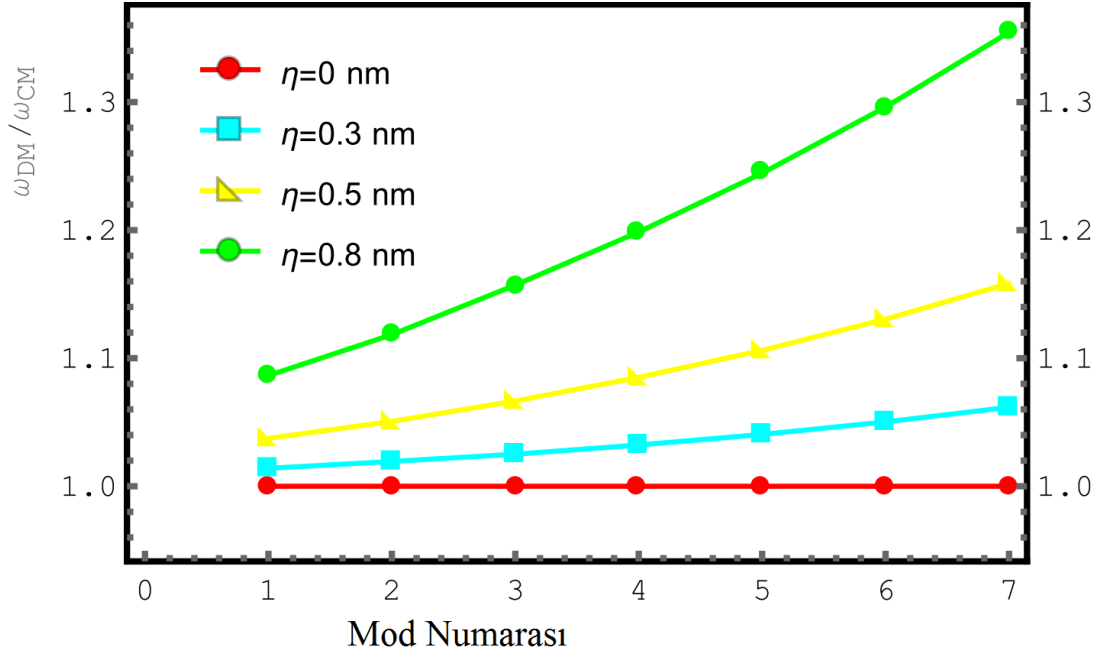
Şekil 4.5'te a-e sabit elastisite modülü için uzunluk - küçük boyut parametresi oranının serbest titreşim frekanslarına etkisi incelenmiş ve şematik olarak gösterilmiştir. Bu çizimlerde karbon nano tüpün boyu büyüdükçe eşil mekanik teorisi sonuçlarının klasik elastisite teorisi sonuçlarına hızla yaklaştığı ve bu yaklaşmanın yüksek mod frekans değerlerinde daha çabuk gerçekleştiği açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.6.** Yoğunluğa bağlı frekans değişimi (ilk üç mod için)

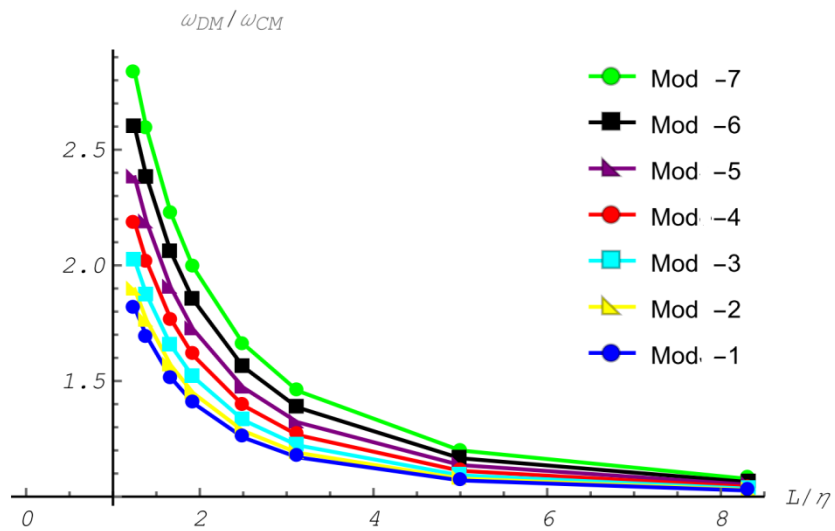
Şekil 4.6 da yoğunluğa bağlı frekans değişimleri ilk üç mod için verilmiştir. Yoğunluk arttıkça titreşim frekanslarının lineer olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Bu azalışın numerik olarak çok fazla olmadığı söz konusu şekilde görülmektedir. Üçüncü modda bu azalışın nisbeten daha az olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 4.7 de mod sayısının serbest titreşim frekanslarına etkisi gösterilmiştir.  $\eta = 0$  nm,  $\eta = 0.3$  nm,  $\eta = 0.5$  nm ve  $\eta = 0.8$  nm boyut parametresi için; doublet mekanik teorisinin klasik mekanik teorisine oranı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Boyut parametresi arttıkça yerel olmayan etkilerin daha ön plana çıktığı boyut parametresinin sıfır olduğu durumda bu etkilerin şekildeki grafikten ortadan kalktığı görülebilmektedir.



**Şekil 4.7.** Mod sayısına bağlı eşil ve klasik mekanik teorisi frekans oranı

Şekil 4.8 de karbon nanotüpün boyunun boyut parametresine oranı ve bunun titreşim frekanslarına etkisi şematik olarak çizilmiştir. Söz konusu şekilden görüleceği gibi karbon nanotüpün boyunun boyut parametresine oranı arttıkça frekans oranı doğrusal olmayan şekilde azalmaktadır. Bu oran ( karbon nanotüp boyunun boyut parametresine oranı) belli bir değeri aştıktan sonra klasik elastisite ve eşil mekanik teorisi sonuçları birbirine çok benzer çıkmaktadır.



**Şekil 4.8.** Uzunluk, boyut parametresine bağlı eşil klasik mekanik teorisi frekans oranı

## 5. SONUÇ

Literatürde Doublet (eşil) mekanik teorisi ile ilgili bir çok çalışma vardır. Eşil mekanik teoriside diğer yüksek mertebeden elastisite teorileri gibi malzemenin iç yapısıyla alakalı bağıntılar içermektedir. Bu parametreye bilindiği gibi malzeme boyut parametresi denilmektedir ve boyut parametresinin belirli bir sınır değerinden sonra klasik mekanik teorisi ile benzer sonuçlar elde edilmektedir.

Literatürde bulunan çalışmaların bir çoğunda nano boyuttaki kirişlerin mesnetleri ankastre, basit veya serbest uçludur. Bu durum diferansiyel denklemlerin çözümü için kolay olması bakımından araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak gerçek fiziksel problemlerde hiçbir zaman sınır koşulları tam ankastre veya basit mesnet olmayacaktır.

Bu çalışmada yukarıdaki paragrafta sayılan eksiklikleri gidermek amacıyla nano boyuttaki kirişlerin mesnetlenme koşulu olarak deforme olabilir sınır koşulları tercih edilmiştir. Bir karbon nanotüp uçlarından eksenel deformasyona izin verebilen eksenel yaylar ile modellenmiştir problemi yöneten kısmi diferansiyel denklem ilk olarak değişkenlerine ayrılmıştır, daha sonra bölgede eksenel yer değiştirme fonksiyonu olarak Fourier Sinüs serisi seçilmiştir. Sınır koşulları için iki ayrı parametre daha tanımlanmıştır. Sınır koşullarını istediğimiz fiziksel gerçekliğe zorlamak için bir matematiksel dönüşüm olan Stoke dönüşümü Fourier Sinüs serilerine uygulanmıştır.

Bu çalışmada elde edilen teorik olarak araştırmacıların farklı koşullar için kullanabileceği bir öz değer problemi oluşturulmuştur. Bu öz değer probleminin karakteristik denklemi eşil mekanik teorisi için serbest titreşim frekanslarını vermektedir. Oluşturulan formülasyonun doğruluğu ve güvenilirliği yay parametrelerine verilen özel değerler ile test edilmiş, tablo ve grafik olarak tez içeriğinde sunulmuştur. Bilindiği gibi uçlarda bulunan yay parametrelerine rakamsal olarak çok büyük değerler verildiğinde ankastre sınır değer sonuçları elde edilmektedir. Ayrıca yay parametrelerine sıfıra çok yakın limit değerler verildiğinde serbest uç için elde edilen sonuçlara ulaşılmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Akbaba, M. 2006.** Elastik zemin üzerinde olan çelik hasır donatılı ve çelik lif donatılı beton plakların sayısal analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Akgöz, B. 2010.** Yüksek mertebeden elastisite teorileriyle mikro ve nano yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri. *Yüksek Lisans Tezi*, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya.
- Akgöz, B., Civalek O. 2013.** Buckling analysis of linearly tapered micro-columns based on strain gradient elasticity. *Structural Engineering and Mechanics*, 48(2): 195-205.
- Akgöz, B., Civalek O. 2015.** Bending analysis of FG microbeams resting on Winkler elastic foundation via strain gradient elasticity. *Composite Structures*, 134: 294-301.
- Akkurt F.G. 2011.** Elastik zemine oturan doğru ve daire eksenli çubukların dinamik analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekanik Anabilim Dalı, Hatay.
- Aköz, A.Y., Kadioğlu F. 1997.** Elastik zemine oturan doğru ve daire eksenli kirişlerin karışık sonlu eleman çözümü. *INFO Teknik Dergi*, 101: 1373-1395.
- Aksencer, T. 2010.** Yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak nano plakların statik ve dinamik analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne.
- Akyol, A. 2007.** Elastik zemine oturan kirişlerin yönetici denklem ve sap2000 analiz programı ile karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Aluç, A. 2007.** Elastik zemine oturan iki yapıya s-h dalgası etkimesi durumunda yapı-zemin-yapı etkileşim problemi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.
- Ansari, R., Gholami, R., Sahmani, S. 2013.** Size-dependent vibration of functionally graded curved microbeams based on the modified strain gradient elasticity theory. *Arch Appl Mech*, 83: 1439-1449.
- Arda, M. 2016.** Nano ölçekli yapılarda burulma davranışının yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak statik ve dinamik analizi. *Doktora Tezi*, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne.
- Artan, R., Tepe, A. 2008.** The initial values method for buckling of nonlocal bars with application in nanotechnology. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 27(3): 469-477.
- Arı, O., Görgün, A. R., Kaya, A., Coşkun, Ö., Kaya, İ. 2012.** Karbon nanotüp malzeme ile tasarlanan heliks antenlerin performans parametrelerinin incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 2(4): 1-7.
- Attarnejad, R., Shahba, A., Jandaghi Semnani, S. 2010.** Application of differential transform in free vibration analysis of Timoshenko beams resting on two-parameter elastic foundation. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 35(2B): 125-132.
- Avcar, M. 2007.** Elastik zemin üzerinde bulunan homojen olmayan elastik kirişin stabilite ve titreşimi. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.
- Avcar, M. 2010.** Elastik zemin üzerinde bulunan her iki ucu ankastre mesnetli rastgele ve sürekli homojen olmayan kirişin serbest titreşimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1(1): 33-38.

- Avcar, M. 2014.** Free vibration analysis of beams considering different geometric characteristics and boundary conditions. *International Journal of Mechanics and Applications*, 4: 94-100.
- Aya, A. S. 2017.** Eğri eksenli nano çubukların düzlem dışı statik ve dinamik problemlerinin yerel olmayan elastisite teorisi ile analitik çözümü. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Aydogdu, M., 2009.** Axial vibration of the nanorods with the nonlocal continuum rod model. *Physica E*, 41: 861-864.
- Aydogdu, M. 2012.** Axial vibration analysis of nanorods (carbon nanotubes) embedded in an elastic medium using nonlocal elasticity. *Mechanics Research Communications*, 43: 34-40.
- Ayvaz, Y., Oguzgan, K. 2002.** Application of modified Vlasov model to free vibration analysis of beams resting on elastic foundations. *Journal of Sound and Vibration*, 255(1): 111-127.
- Bağdatli, S.M., Özkaya, E., Öz, H. R. 2011.** Dynamics of axially accelerating beams with an intermediate support. *Journal of Vibration and Acoustics*, 133(3): 031013.
- Bahçivan, A., Karadağ, V. 2005.** Elastik zemin üzerindeki çubuk uygulamalarının serbest ve nondoğrusal titreşim analizi. *İTÜ Dergisi/d*, 4(4): 51-61.
- Badr, E.D.S.I. 1964.** Behavior of continuous beams on elastic foundations under different conditions of loadings. *University of Illinois at Urbana, Champaign*.
- Bartul, Z., Trenor, J. 2011.** Advances in nanotechnology. *Nova Science Publishers*, New York .
- Banerjee, J. R. 1998.** Free vibration of axially loaded composite Timoshenko beams using the dynamic stiffness matrix method. *Computers & Structures*, 69: 197-208.
- Beni, Y.T., Jafari, A., Razavi, H. 2015.** Size effect on free transverse vibration of cracked nano-beams using couple stress theory. *International Journal of Engineering*, 28(2): 296-304.
- Benzair, A., Tounsi, A., Besseghier, A., Heireche, H., Moulay, N., Boumia, L. 2008.** The thermal effect on vibration of single-walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(22): 1-10.
- Berg, G.V. 1958.** A method of stiffness coefficients for the beam on an elastic foundation. *The University of Michigan, Michigan*.
- Bert, C. W., Zeng, H. 2004.** Analysis of axial vibration of compound bars by differential transformation method. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3): 641-647.
- Bilgin, E. 2007.** Elastik zemine oturan daire eksenli kirişler için taşıma matrisi ve uygulamalar. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.
- Bozdoğan, K.B., Sezer, A., Aklık, P. 2004.** Elastik zemine oturan kirişlerin taşıma matrisi yöntemi ile birinci ve ikinci merteye statik ve stabilite analizi. *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Derg.*, 19(1): 39-48.
- Bozyiğit, B., Çatal, S., Çatal, H. H. 2015.** Timoshenko kirişlerinin serbest titreşim analizinin diferansiyel transformasyon metodu ile incelenmesi. 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 14-16 Ekim 2015, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Broekhuizen, W. 1972.** Stiffness coefficients for a beam element on an elastic foundation. *University of Texas at Arlington, Arlington*.

- Carroll, W.T. 1969.** Continuous beams on elastic foundation. *Vanderbilt University*, Nashville.
- Catal, S. 2008.** Solution of free vibration equations of beam on elastic soil by using differential transform method. *Applied Mathematical Modelling*, 32(9): 1744-1757.
- Chang, S. 1965.** Infinite beams on an elastic foundation. *University of Missouri at Rolla*, Rolla.
- Chattopadhyay, K. K., Banerjee, A.N. 2009.** Introduction to nanoscience and nanotechnology. *PHI Learning Private Limited*, New Delhi.
- Chowdhury, R., Adhikari, S., Wang, C. W., Scarpa, F. 2010.** A molecular mechanics approach for the vibration of single walled carbon nanotubes. *Comput. Mater. Sci.*, 48: 730-735.
- Civalek, Ö. 1998.** Elastik zemine oturan kirişlerin noro-fuzzy tekniği ile analizi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi*, Yıldız Teknik Üniversitesi 250-259.
- Civalek, Ö. 2004a.** Elastik zemine oturan plakların hesap yöntemlerine genel bir bakış. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 432: 45-52 .
- Civalek, Ö. 2004b.** Elastik zemine oturan plakların doğrusal olmayan analizi. *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 432: 45-54.
- Civalek, Ö. 2005.** Winkler elastik zemine oturan dairesel plakaların geometrik bakımdan doğrusal olmayan dinamik analizi. *Journal of Engineering and Natural Sciences*. Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2006/1: 56-66.
- Civalek, Ö., Ülker, M. 2006.** Polinomial diferansiyel quadrature (PDQ) ve sonlu farklar (SF) metod çifti ile elastik zemine oturan dikdörtgen plakların geometrik bakımdan doğrusal olmayan analizi. *İMO Teknik Dergi*, 246: 3739-3760.
- Civalek, Ö., Demir, Ç. 2009.** Elastik zemine oturan kirişlerin ayrık tekil konvolüsyon ve harmonik diferansiyel quadrature yöntemleriyle analizi. *BAÜ FBE Dergisi*, 11(1): 56-71.
- Contreras, M. L., Benitez, E., Alvarez, J., Rozas, R. 2009.** Algorithm for nanotubes computer generation with different configurations. *Algorithms*, 2: 108-210.
- Coşkun, I. 2000.** Non-linear vibrations of a beam resting on a tensionless Winkler foundation. *Journal of Sound and Vibration*, 236(3): 401-411.
- Çelebi, K., Keleş, İ., Tütüncü, N. 2012.** Homojen olmayan çubuğun zorlanmış titreşim analizi için kapalı-form çözümleri. *Gazi Üniv Müh.Mim.Fak.Der.*, 27(4): 753-763.
- Çıracı, S. 2005.** Metrenin bir milyarda biri. *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- Gürses, M. 2015.** Nano boyutlu sektör ve boşluklu sektör plakların lokal olmayan elastisite teorisi ile titreşim ve eğilme analizi. *Doktora Tezi*, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya.
- Demir, Ç., Civalek, Ö. 2016.** Nonlocal finite element formulation for vibration. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(2): 109-117.
- Demirdag, O., Yeşilce, Y. 2011.** Solution of free vibration equation of elastically supported Timoshenko columns with a tip mass by differential transform method. *Advances in Engineering Software*, 42(10): 860-867.
- Develi, A. G. 2007.** Elastik zemin üzerine oturan Timoshenko kirişinde titreşim problemi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.
- De Rosa, M. A. 1995.** Free vibrations of Timoshenko beams on two-parameter elastic foundation. *Computers & Structures*, 57(1): 151-156.

- Doğan, O. 1993.** Elastik zemin üzerine oturan kirişler. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Doshi, S.N. 1976.** Beams of nonuniform cross section on elastic foundation. *Ohio State University*, Columbus.
- D'Souza, F. 2008.** Fullerenes, nanotubes and carbon nanostructures – 213th ECS Meeting, 14. Sayı. *The Electrochemical Society*, Pennington.
- Duman, T. 2008.** Elastik zemine oturan radye temellerin hesabı. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Düzgün, M. 2001.** Elastik zemine oturan sürekli temellerin kuvvet yönetimi ile analizi ve sayısal hesabı için geliştirilen bilgisayar programı. *DEÜ FBE Dergisi*, 3(3): 33-50.
- Endo, M., Iijima, S. 1996.** Carbon nanotubes. *Elsevier*.
- Eisenberger, M. 1994.** Vibration frequencies for beams on variable one-parameter and two-parameter elastic foundations. *Journal of Sound and Vibration*, 176(5): 577-584.
- Elishakoff, I. 2012.** Carbon nanotubes and nanosensors: vibration, buckling and ballistic impact. *Wiley*, New York.
- Erkoç, Ş. 2001.** Karbon nanoyapılar. *Bilim ve Teknik Dergisi*, (398): 46-51.
- Eringen, A. C. 1972.** Nonlocal polar elastic continua. *International Journal of Engineering Sciences*, 10: 1-16.
- Eringen, A. C. 1983.** On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves. *J. Appl. Phys.*, 54: 4703-4710.
- Eringen, A. C., Edelen, D. G. B. 1972.** On nonlocal elasticity. *Int. J. Eng. Sci.*, 10:233-48.
- Frederick, G. B. 1954.** The influence of secondary effect on beams on elastic foundations and vibrating beams. *Virginia Polytechnic Institute*, Blacksburg.
- Fatahi-Vajari, A., Imam, A. 2016.** Axial vibration of single-walled carbon nanotubes using doublet mechanics, *Indian Journal of Physics*, 90(4): 447-445.
- Farghaly, S. H. 1994.** Vibration and stability analysis Timoshenko beams with discontinuities in cross-section. *Journal of Sound and Vibration*, 174: 591-605.
- Fulekar, M. H. 2010.** Nanotechnology: importance and applications. *I.K International Publishing House Pvt. Ltd*, New Delhi.
- Ghannadpour, S.A. M., Mohammadi, B. 2010.** Buckling analysis of micro and nanoroads/tubes based on nonlocal Timoshenko beam theory using Chebyshev polynomials. *Advanced Materials Research*, 123: 619-622.
- Gül, U., Aydoğdu, M. 2015.** Elastik zemin üzerine oturan Timoshenko kirişlerinde dalga yayılımı. Uluslararası Katılımlı 17. Makine Teorisi Sempozyumu, 14-17 Haziran 2015, İzmir.
- Güler, S. 2007.** Elastik zemine oturan çelik tel donatılı beton plakların deneysel analizi ve sayısal sonuçlarla karşılaştırmalar. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.
- Han, S. M., Benaroya, H., Wei, T. 1999.** Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories. *Journal of Sound and Vibration*, 225(5): 935-988.
- Hayes, D.R. 1976.** Buckling of beams on an elastic foundation. *North Carolina State University*, Raleigh.
- Hızal, Ç. 2012.** Elastik zemin üzerine oturan kirişlerin zorlanmış titreşimi. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İzmir.

- Hornjak, G. L., Tibbals, H. F., Dutta, J., Moore, J. J. 2009.** Introduction to nanoscience and nanotechnology, *Taylor & Francis*, London.
- Hsu, J. C., Lee, H. L., Chang, W. J. 2011.** Longitudinal vibration of cracked nanobeams using nonlocal elasticity theory, *Elsevier BV*, 11(6): 1384-1388.
- Işık, Ç. 2011.** Nano ve mikro yapıların yerel olmayan elastisite teorisi ile eğilme ve titreşim hesabı, *Yüksek Lisans Tezi*, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Işık, H. 2013.** Çift duvarlı karbon nanotüplerin bir ucu ankastre diğer ucu yaylı durumda çözümünün incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jr. Poole, C. P., Owens, F. J. 2003.** Introduction to nanotechnology, *John Wiley & Sons, Inc*, New York.
- Jones, G., Jones, M. 1997.** Analysis of beams on elastic foundations, *Telford*, London.
- Jones, M. 1997.** Analysis of beams on elastic foundations: Using finite difference theory, *Thomas Telford*, London.
- Kadioğlu, H., Yaylı, M. Ö. 2017.** Buckling Analysis of Non-Local Timoshenko Beams by Using Fourier Series. *International Journal Of Engineering & Applied Sciences*, 9 (4): 89-99.
- Kadioğlu, H. G. 2018.** Timoshenko kirişlerinin genel elastik sınır koşullarında titreşim analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Kao, R. K. C. 1968.** Beams on non-linear elastic foundation, *University of South Carolina*, Columbia.
- Kapoor, M. 2012.** Advances in nanotechnology, *Oxford Book Company*, Hindistan.
- Karaşin, A. H., Gülkan, P. 2008.** Elastik zemine oturan plakların sonlu ızgara yöntemi ile yaklaşık çözümü, *İMO Teknik Dergi*, 293: 4445-4454.
- Karkare, M. 2008.** Nanotechnology: Fundamentals and applications, *I. K International Publishing House Pvt. Ltd*, New Delhi.
- Karlıcı, D., Jovanovic D., Kozic, P., Cajic, M. 2015.** Thermal and magnetic effects on the vibration of a cracked nanobeam embedded in an elastic medium, *Journal of Mechanics of Material and Structures*, 10(1): 43-62.
- Kaya, M. O. 2006.** Free vibration analysis of a rotating Timoshenko beam by differential transform method. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 78(3): 194-203.
- Kim, H. K., Kim, M. S. 2001.** Vibration of beams with generally restrained boundary conditions using Fourier series. *Journal of Sound and Vibration*, 245(5): 771-784.
- Kılıç, V. 2006.** Elastik zemine oturan dikdörtgen plakların titreşimleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- King, V.B. 2007.** Nanotechnology Research Advances, *Nova Science Publishers*, New York.
- Kişin, E. 2006.** Elastik zemine oturan çelik lif ve çelik hasır donatılı beton plakların mekanik davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, İstanbul.
- Kocatürk, T., Şimşek, M. 2005.** Free vibration analysis of elastically supported Timoshenko beams. *Sigma*, 3: 79-93.
- Koç, Y. 2006.** Euler Bernoulli ve Timoshenko teorileri kullanılarak basit mesnetli kirişlerin serbest titreşimlerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

- Kösegil, A. 2010.** Yerel olmayan elastisite teorisinde açı ve ritz yöntemlerinin nanoteknolojiye uygulanması, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kumar, B.M., Sujith, R.I. 1997.** Exact solutions for the longitudinal vibration of non-uniform rods, *Journal of Sound and Vibration*, 207(5): 721-729.
- Kurt, E. L., Medikonda, M. 2012.** Understanding the nanotechnology revolution, *Wiley*, New York.
- Kutlu, E. 2007.** Elastik zemine oturan çelik lif donatılı beton plakların deneysel analizi ve genel bir değerlendirme, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul .
- Kutucu, B. 2010.** Nanoteknoloji ve çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul .
- Kuyumcu, Z. 2011.** Elastik zemine oturan kablolu köprülerin stokastik analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, Trabzon.
- Lai, Y.C. 1990.** Dynamic response of beams on elastic foundation, *University of Missouri*, Columbia.
- Leissa, A.W., Qatu, M.S. 2011.** Vibration of continuous systems, *McGraw Hill*, Yeni Delhi.
- Li, C. Y., Chou, T. W. 2003.** A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes, *Int. J. Solids Struct.*, 40: 2487-2499.
- Lin, S. C., Hsiao, K. M. 2001.** Vibration analysis of a rotating Timoshenko beam, *Journal of Sound and Vibration*, 240(2): 303-322.
- Lin, K.K. 1970a.** Bending of a constrained circular beam on an elastic foundation, *Kansas State University*, Kansas.
- Lin, K.K. 1970b.** Beams on one-way elastic foundations, *Kansas State University*, Kansas.
- Liu, T. W. 1988.** A generalized beam on elastic foundation model for fracture studies, *University of Hong Kong*, Pok Fu Lam.
- Loya, J., Puente, J. L., Zaera, R., Sáez, J. F. 2009.** Free transverse vibrations of cracked nanobeams using a nonlocal elasticity model, *Journal of Applied Physics*, 105,044309.
- Maddox, D. 2005.** Nanotechnology, *Blackbirch Press*, Woodbridge.
- Mahler, E., Seiler, D. 2011.** Carbon nanotube and nanocomposite research, *Nova Science Publishers*, New York.
- Malik, M., Dang, H. H. 1998.** Vibration analysis of continuous systems by differential Transformation, *Applied Mathematics and Computation*, 96(1): 17-26.
- Melerski, E.S. 2000.** Design analysis of beams, circular plates and cylindrical tanks on elastic foundations, *A.A.Balkema*, Rotterdam.
- Menceloğlu, Y., Kirca, M. 2008.** Uluslararası rekabet stratejileri: nanoteknoloji ve Türkiye, TÜSİAD Rekabet Stratejileri Dizisi 11, TÜSİAD, İstanbul.
- Meyyappan, M. 2004.** Carbon nanotubes: properties and applications, *CRC Press*, London.
- Morris, J.E., Iniewski, K. 2013.** Graphene, carbon nanotubes and nanostructures: techniques and applications, *CRC Press*, London.
- Nakamoto, T.A. 1976.** Deflections of a beam on an elastic foundation, *California State University*, Long Beach.

- Nugent, G. 1975.** Beams and circular plates on elastic foundation, *Trinity College*, Dublin.
- O'Connell, M.J. 2006.** Carbon nanotubes: properties and applications, *CRC Press*, London.
- Orkov, G., Saxenhofer, H. 1967.** Beams on elastic foundation, *California Department of Water Resources*, Sacramento.
- Oruçoğlu, K. 1991.** Yerel olmayan elastisite de çatlak problemi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özdemir, Ö. 2009.** Elastik zemine oturan kirişlerin sonlu titreşimi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özdemir, O. O., Kaya, M. O. 2010.** Vibration analysis of a rotating tapered Timoshenko beam using DTM. *Meccanica*, 45(1): 33-42.
- Özgan, K., Daloğlu, A.T. 2011.** Elastik zemine oturan kalın plaklar için kayma kilitlenmesiz bir sonlu eleman modeli, *İMO Teknik Dergi*, 346: 5341-5358.
- Özgan, K., Daloğlu A.T. 2005.** Elastik zemine oturan plaklar için etkili zemin derinliği, Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, :635-647
- Pentaras, D. 2009.** Vibration, buckling and impact of carbon nanotubes, *Florida Atlantic University*, Boca Raton.
- Pilkey, W.D. 2002.** Analysis and design of elastic beams: computational methods, *John Wiley & Sons, Inc*, New York.
- Poncharal, P., Wang, Z. L., Ugarte, D., Heer, W. A. D. 1999.** Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes. *Science*, 283: 1513-1516.
- Rahmani, O., Pedram, O. 2014.** Analysis and modeling the size effect on vibration of functionally graded nanobeams based on nonlocal Timoshenko beam theory. *International Journal of Engineering Science*, 77: 55-70.
- Ramsden, J. 2011.** Nanotechnology: an introduction, *Access Online via Elsevier*, Waltham.
- Ramsden, J. 2009.** Essentials of nanotechnology, *Ventus Publishing, Bookboon.com*, Londra.
- Rao, S. S., Gupta, R. S. 2001.** Finite element vibration analysis of rotating Timoshenko beams. *Journal of Sound and Vibration*, 242(1): 103-124.
- Rao, S.S. 2007.** Vibration of continuous systems, *John Wiley and Sons Ltd*, New York.
- Ray, K.C. 1966.** Beams on elastic foundation, *Orient Longmans*, Haydarabad.
- Reddy, J. N. 2007.** Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams. *International Journal of Engineering Science*, 45(2): 288-307.
- Saito, R., Dresselhaus, G., Dresselhaus. M.S. 1998.** Physical properties of carbon nanotubes, *Imperial College Press*, Londra.
- Schodek, D. L., Ferreira, P., Ashby, M. F. 2009.** Nanomaterials, nanotechnologies and design: an introduction for engineers and architects, *Butterworth-Heinemann*, Burlington.
- Selvadurai, A. P. S. 1979.** Elastic analysis of soil-foundation interaction, *Elsevier Science*, Amsterdam.
- Setoodeh, A.R., Khosrownejad, M., Malekzadeh, P. 2011.** Exact nonlocal solution for post buckling of single-walled carbon nanotubes. *Physica E*, 43: 1730-1737.
- Sevi, A.H. 2006.** Nanoteknolojide karbon nanotüplerin dayanıklılık simülasyonları, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, İstanbul.

- Seyman, M.C. 2010.** Çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.
- Seyis, F. 2010.** Elastik zemine oturan deprem etkisindeki kalın plakların parametrik incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Singh, K.V. 2009.** Transcendental inverse eigenvalue problems in damage parameter estimation, *Journal Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(6): 1870-1883.
- Sirmen, E. 2010.** Tek ve çift duvarlı karbon nanotüpte eğilme, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.
- Smith, T. E., Herrmann, G. 1972.** Stability of a beam on an elastic foundation subjected to a follower force, *Defense Technical Information Center*, Fort Belvoir.
- Sofiyev, A. H., Avcar, M., Ozyigit, P., Adigozel, S. 2009.** The free vibration of non-homogeneous truncated conical shells on a winkler foundation, *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(1): 34-41.
- Sofiyev, A.H., Avcar, M. 2010.** The stability of cylindrical shells containing a FGM layer subjected to axial load on the pasternak foundation, *Engineering*, 2:228-236.
- Sönmezaş, M. 2007.** Elastik zemine oturan daire eksenli kirişlerin taşıma matrislerinin bulunması için bir sayısal yöntem, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, İstanbul.
- Stekel, A. 1992.** Analysis of circular cross section beams on elastic foundation, *Technion-Israel Institute of Technology*, Haifa.
- Şahin, A. 2010.** Karbon nanotüplerin burkulma yüklerinin hesabı için yaklaşık yöntem, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.
- Şahinkaya, Y. 2010.** Elastik zemine oturan düzgün yayılı yük etkisindeki kalın plakların parametrik incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Seçkin, T.C. 2007.** Elastik zemine oturan bir kirişin simetrik olmayan yükleme altındaki harmonik titreşimleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekanik Anabilim Dalı, İstanbul.
- Şık, D. 2010.** Değişken derinlikli iki parametrelili elastik zemine oturan plaklar, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul.
- Tanaka, K., Iijima, S. 2014.** Carbon nanotubes and graphene, *Elsevier*, Amsterdam
- Tanyi, G.E. 1962.** Beams partially constrained by elastic foundations, *Illinois Institute of Technology*, Chicago.
- Tchoul, M. N. 2008.** Composites of carbon nanotubes, *ProQuset LLC*, Ann Arbor
- Thai, H.T. 2012.** A nonlocal beam theory for bending, buckling, and vibration of nanobeams. *Int. J. Eng. Sci.*, 52: 56-64.
- Tepe, A. 2007.** Nanoteknolojide nano ölçekteki yapıların yerel olmayan elastisite çerçevesinde incelenmesi. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Tetik, E. 2012.** Karbon nanotüplerin fiziksel özellikleri üzerine katkılamanın etkilerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Adana.

- Timoshenko, S. P. 1937.** Vibration problems in engineering, *D. Van Nostrand*, Princeton NJ.
- Timp, G. L. 1999.** Nanotechnology, *Springer-Verlag*, New York.
- Torbacki, W., Buczkowski, R. 2014.** Finite element analysis of beams and plates on elastic foundation, *Omniscryptum GmbH & Company Kg.*, Saarbrücken.
- Tserpes, K. I., Silvestre, N. 2014.** Modeling of carbon nanotubes, graphane and their composites, *Springer*, Berlin.
- Tsudik, E. 2006.** Analysis of beams and frames on elastic foundations, *Trafford Publishing*, Bloomington.
- Tsudik, E. 2012.** Analysis of structures on elastic foundations, *Ross, J. Publishing*, U.S.A.
- Tuma, J. J., Alberti, G. 1970.** Static parameters of beams on elastic foundation, *Birkhauser Basel*, Zürich.
- Turan, M. 2012.** Elastik zemine oturan sonsuz uzun elastik kirişin hareketli yük altında dinamik davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Uyan, U. 2018.** Yerel olmayan elastisite teorisi ile bor nitrür nanoçubukların aksel titreşimi. *Yüksek Lisans Tezi*, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya.
- Vajtai, R. 2003.** Nanotechnology, 5118. Cilt, *Spte*, Bellingham.
- Varadan, V. K. 2010.** Naoscience and nanotechnology in engineering. *World Scientific*, Singapur.
- Varma, A. 2012.** Nanotechnology: Uses and applications. *Icfai University Press*, Hindistan.
- Vlasov, V. Z., Baruuch, A., Leontev, N. N. 1966.** Beams, plates and shells on elastic foundations, *Israel Program for Scientific Translations*, Kudüs.
- Viola, E., Ricci, P., Aliabadi, M. H. 2007.** Free vibration analysis of axially loaded cracked Timoshenko beam structures using the dynamic stiffness method. *Journal of Sound and Vibration*, 304(1): 124-153.
- Weberg, S. E. 1969.** Frequency analysis of a curved beam on elastic foundation. *Norges Tekniske Hogskole, Institutt for Statikk*, Geilo.
- Winkler, E. 1867.** Die lehre von der elastizität und festigkeit, Prague.
- Yang, J., Ke, L. L., Kitipornchai, S. 2010.** Nonlinear free vibration of single-walled carbon nanotubes using nonlocal Timoshenko beam theory. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 42(5): 1727-1735.
- Yanık, F. 2015.** Nano ölçekli çubukların rijit olmayan sınır şartlarında yerel olmayan elastisite teorisine göre titreşim analizleri. *Yüksek Lisans Tezi*, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Bilecik.
- Yanık, F., Yaylı, M. Ö. 2015.** Nano ölçekli çubukların rijit olmayan sınır şartlarında yerel olmayan elastisite teorisine göre titreşim analizleri. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1): 35-44.
- Yaylı, M. Ö. 2010.** Yerel olmayan elastisite teorisine göre nano ölçekteki kirişlerin doğrusal olmayan teoriye göre incelenmesi. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Yaylı, M. Ö. 2011a.** Week formulaion of finite element mothod for nonlocal bemas using additional boundary conditions, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 8(11): 2173-2180.

- Yaylı, M. Ö. 2011b.** Stability analysis of a gradient elastic beam using finite element method, *Journal of Vibration and Control*, 6(12): 2844-2851.
- Yaylı, M. Ö. 2014a.** On the axial vibration of carbon nanotubes with different boundary conditions. *IET Mikro & Nano Letters*, 9(11): 807-811.
- Yaylı, M. Ö. 2014b.** Free vibration behavior of a gradient elastic beam with varying cross section. *Shock and Vibration.*, 801696.
- Yaylı, M. Ö. 2014c.** A compact analytical method for vibration analysis of single-walled carbon nanotubes with restrained boundary conditions, *Journal of Vibration and Control*, 2014.
- Yanık, F., Yaylı, M. Ö., Kandemir, S. Y. 2015.** Longitudinal vibration of nanorods embedded in an elastic restraints at both ends. *IET Mikro & Nano Letters*, 10: 641-644.
- Yaylı, M. Ö., Çerçevik A. E. 2015.** Axial vibration analysis of cracked nanorods with arbitrary boundary conditions. *Journal of Vibroengineering*, 17(6): 2907-2921.
- Yaylı, M. Ö. 2016.** Buckling analysis of a rotationally restrained single walled carbon nanotube embedded in a elastic medium using nonlocal elasticity. *Int. J. Eng. Appl. Sci.*, 8(2): 40-50.
- Yaylı, M. Ö. 2016.** Buckling analysis of a microbeam embedded in an elastic medium with deformable boundary conditions. *IET Mikro & Nano Letters*, 11: 741-745.
- Yaylı, M. Ö. 2016.** A compact analytical method for vibration of single – walled carbon nanotubes with restrained boundry conditions. *Journal of Vibratin and Control*, 22: 2542-2555.
- Yaylı, M. Ö. 2016.** A compact analytical method for vibration of micro - sized beams with different boundry conditions. *Mechanics of Advanced Material and Structures*, 24: 496-508.
- Yaylı, M. Ö. 2017.** Buckling analysis of a cantilever single-walled carbon nanotube embedded in an medium with an attached spring. *IET Mikro & Nano Letters*, 12: 255-259.
- Yaylı, M. Ö. 2018.** Dönel yaylar ile mesnetlenmiş bir karbon nanotüpün yerel olmayan Timoshenko kiriş teorisine göre serbest titreşim analizi. BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20(2): 8-21.
- Yaylı, M. Ö., Esma A. 2019.** Longitudinal vibration of carbon nanotubes with elastically restrained ends using doublet mechanics. *Microsystem Technologies*, 10.1007/s00542-019-04512-1.
- Yazıcı, E. 2009.** Elastik zemine oturan Timoshenko kirişinin sonlu elemanlar yöntemiyle elastoplastik analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Yeşilce, Y. 2004.** Yatak katsayısı değişken elastic zemine kısmi gömülü kazıkların serbest titreşim analizleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yesilce, Y., Catal, H. H. 2011.** Solution of free vibration equations of semi-rigid connected Reddy-Bickford beams resting on elastic soil using the differential transform method. *Archive of Applied Mechanics*, 81(2), 199-213.
- Yesilce, Y., Demirdag, O. 2008.** Effect of axial force on free vibration of Timoshenko multi-span beam carrying multiple spring-mass systems. *International Journal of Mechanical Sciences*, 50(6): 995-1003.
- Yokoyama, T. 1996.** Vibration analysis of Timoshenko beam-columns on two-parameter elastic foundations. *Computers & Structures*, 61(6): 995-1007.
- Zhang, Q. 2012.** Carbon nanotubes and their applications, *Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.*, Singapore.

- Zhou, D. 2001.** Free vibration of multi-span Timoshenko beams using static Timoshenko beam functions. *Journal of Sound and Vibration*, 241: 725-734.
- Wang, C. M., Zhang, Y. Y., He, X. Q. 2007.** Vibration of nonlocal Timoshenko beams. *Nanotechnology*, 18(10): 1-9.
- Wang, C. M., Zhang, Y. Y., Ramesh, S. S., Kitipornchai, S., 2006.** Buckling analysis of micro-and nano-rods/tubes based on nonlocal Timoshenko beam theory. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 17: 3904-3909.
- Wang, R.T. 1997.** Vibration of multi-span Timoshenko beams to a moving force. *Journal of Sound and Vibration*, 207(5): 731-742.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Esmâ ASA  
Doğum Yeri ve Tarihi : Bayburt - 1988  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Bayburt Lisesi  
Lisans : Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Karacabey Belediyesi

İletişim (e-posta) : atameresma@gmail.com

Yayımları : Yaylı, M. Ö., Esmâ A. 2019. Longitudinal vibration of carbon nanotubes with elastically restrained ends using doublet mechanics. *Microsystem Technologies* 10.1007/s00542-019-04512-1.