

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ İLE BOR NİTRÜR
NANOÇUBUKLARIN EKSENEL TİTREŞİMİ**

Uğur UYAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2018

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ İLE BOR NİTRÜR
NANOÇUBUKLARIN EKSENEL TİTREŞİMİ**

Uğur UYAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2018

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ İLE BOR NİTRÜR
NANOÇUBUKLARIN EKSENEL TİTREŞİMİ**

**Uğur UYAN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

TEMMUZ 2018

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ İLE BOR NİTRÜR
NANOÇUBUKLARIN EKSENEL TİTREŞİMİ**

Uğur UYAN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez / / 201..... tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ömer CİVALEK (Danışman)

Doç. Dr. Mehmet AVCAR

Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ

ÖZET

YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ İLE BOR NİTRÜR NANOÇUBUKLARIN EKSENEL TİTREŞİMİ

Uğur UYAN

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Temmuz 2018, 33 sayfa

Bu tez çalışmasında aksenel çubuklar nano ölçekte modellenmiştir ve boyuna serbest titreşim analizi yapılmıştır. Bilindiği üzere sürekli sistemlerin mikro ve nano-ölçekteki modellerinin mekanik zorlar altında göstereceği davranışlar klasik elastisite teorisi ile açıklanamaz. Mikro ve nano ölçekli yapının iç karakteristik boyutları titreşim probleminin çözümüne dahil olur. Bu nedenle nanoçubukların titreşim analizi, boyut etkisi katılarak gerçekleştirilmiştir. Boyut etkisi altındaki titreşimin yönetici denklemi, yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen denklem çözülerek, nanoteknoloji disiplini içerisinde yoğun bir şekilde karşılaşılan Bor nitrür nanotüplerden modellenmiş olan farklı mesnetlenme tarzındaki çubuklara uygulanmıştır. Aksenel nanoçubukların farklı modlardaki frekans değerleri hesaplanmıştır. Titreşim frekansı değerleri üzerinde yerel olmayan ifadenin, nanoçubuk uzunluğunun ve mesnetlenme şartının etkisi araştırılmıştır.

Sayısal sonuçlar incelendiğinde varılacak en önemli sonucun yerel olmayan ifadenin artışının titreşim frekanslarını düşürmesi olduğu söylenebilir. Mod sayısı arttıkça yerel olmayan ifadenin frekansı daha fazla düşürdüğü gözlenmiştir. Öte yandan, nanoçubuk uzunluğu azaldıkça yerel olmayan ifadenin frekansı düşürücü etkisi daha fazladır. Aksenel çubuk temelli nano cihazların tasarımında boyut etkisinin dikkate alınmasının gerekli olduğu bu çalışmada varılan en önemli sonuçtur.

ANAHTAR KELİMELELER: Bor nitrür nanotüp, Boyut etkisi, Aksenel nanoçubuk, Nanoteknoloji, Titreşim, Yerel olmayan elastisite.

JÜRİ: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Doç. Dr. Mehmet AVCAR

Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ

ABSTRACT

THE AXIAL VIBRATION OF BORON NITRIDE NANORODS BASED ON NONLOCAL ELASTICITY THEORY

Uğur UYAN

MSc. Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

July 2018, 33 pages

In this thesis study, axial rods have been modelled at nano scale and its longitudinal free vibration analysis have been carried out. As is known, the behaviour of the micro and nano-scale models of continuous systems under mechanical influences cannot be explained with the classical elasticity theory. Internal characteristic sizes of micro/nano scale-structure are included to solving of vibration problem. Therefore, the vibration analysis of nanorods have been carried out by including the size effect. The size-dependent motion equation has been obtained via nonlocal elasticity theory. The obtained equation has been solved and applied to the rods with different boundary conditions which have been modelled from Boron Nitride Nanotubes (BNNT) which are encountered intensely in the discipline of nanotechnology. The size-dependent frequency values of axial nanorods have been calculated at the different modes. The influences of nonlocal expression, nanorod length and boundary condition on the vibration frequency have been investigated.

When the numerical results are examined, it can be said that the most important result is the increase of nonlocal expression decreases the frequency. As the mode number increases, it has been understood that the nonlocal expression reduces the frequency more. On the other hand, as the length of nanorod decreases, detractive effect the frequency of non-local expression is greater. It is the most important obtained result in this study that it is necessary to consider the size effect in the design of axial rod based-nano devices.

KEYWORDS: Axial nanorod, Boron nitride nanotube, Nanotechnology, Nonlocal elasticity, Size effect, Vibration.

COMMITTEE: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Assoc. Prof. Dr. Mehmet AVCAR

Asst. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

ÖNSÖZ

Son yıllarda teknolojinin daha çok gelişmesi ile insanların birçok sorununa çözüm bulunmuştur. Ayrıca teknolojideki bu gelişmeler yaşam kalitesini de yükseltmiştir. Teknolojinin gelişimi hiç durmaksızın sürmektedir ve bu hususta, küçük boyutlu maddelerin ve materyallerin teknolojisi anlamına gelen nanoteknoloji biliminin etkisinin günümüzde tartışılmaz hale geldiği vurgulanmalıdır. Nanoteknoloji bilimi, herhangi bir bilim dalının uygulamalarını fen ve mühendislik bilimleri ile birleştirerek ortaya daha fonksiyonel uygulama ve ekipmanların ortaya çıkmasını amaçlar. Maddelerin atomik boyuttaki yapısının gözlemlenmesinin ve bu boyuttaki yapıya müdahale edilebiliyor olunmasından dolayı nano ve mikro ölçekteki çalışmalar hız kazanmıştır.

Nanomekanik cihazların tasarımı oldukça önemli bir konudur ve bu cihazların dış etkiler altındaki davranışları son yıllarda bilim adamlarınca yoğun şekilde araştırılmaktadır. Ancak görülmüştür ki klasik fizik teorileri vasıtasıyla elde edilen sonuçlar bu sistemlerin tasarımları için gerçekçi sonuçlar vermemektedir. Boyut etkisine bağlı teoriler bu noktada eksikliği kapatmaktadır. Bu nedenle boyut etkisini göz önünde bulunduran yerel olmayan elastisite teorisi, tez çalışması kapsamında kullanılmıştır. Nano ölçekli eksenel çubuklar, bor nitrür nanotüp malzemesi ile modellenmiş olup bu eksenel çubukların boyut etkili bir titreşim analizi yapılmıştır.

Bu yüksek lisans tezini hazırlarken engin bilgilerine ve değerli görüşlerine başvurduğum danışmanım sayın Prof. Dr. Ömer CİVALEK'e ve desteklerini bir an dahi olsun kesmeyen aile üyelerime en içten teşekkürlerimi arz ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	2
2.1. Nanoteknoloji.....	2
2.1.1. Nanoteknolojinin tanımı.....	2
2.1.2. Nanoteknolojinin tarihçesi.....	3
2.1.3. Nanoteknolojinin uygulama alanları.....	4
2.1.4. Nanoteknolojinin elde edilme yöntemleri.....	5
2.2. Bor Nitrür Nanotüpler (BNNT).....	5
2.3. Daha Önce Yapılan Çalışmalar.....	7
3. MATERYAL VE METOT.....	9
3.1. Sürekli Yapıların Titreşimi.....	9
3.2. Eksenel Çubukların Serbest Titreşimi.....	10
3.3. Boyut Etkisine Bağlı Mekanik Analiz ve Yerel Olmayan Elastisite Teorisi.....	13
3.4. Eksenel Nanoçubukların Yerel Olmayan Serbest Titreşimi.....	15
3.5. Eksenel Nanoçubukların Sınır Koşulları.....	18
4. BULGULAR.....	22
5. SONUÇLAR.....	30
6. KAYNAKLAR.....	31
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yerel olmayan elastisite teorisi ile Bor Nitrür Nanoçubukların aksenal titreşimi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

/ /2018

Öğrencinin Adı, Soyadı ve İmzası

Uğur UYAN

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- a : Malzeme iç karakteristik uzunluğu
 c : Sönüm sabiti
 d : Dairesel kesit çapı
 e_0 : Deneysel olarak belirlenebilen malzeme sabiti
 f : Eksenel dış zor
 f_j : Kütleli kuvvet
 i : Karmaşık sayı
 k : Elastik yay sabiti
 m : Çubuk (eksenel kiriş) kütlesi
 m_0 : Birim uzunluğun kütlesi
 t : Zaman
 t_{ij} : Yerel olmayan gerilme
 u : Eksenel yer değiştirme
 u_i, u_j : Yer değiştirme vektörü
 \ddot{u}_{ij} : Hareketin ivmesi
 A : Kesit alanı
 C_i : Çözüm sabiti
 E : Elastisite modülü
 K : Kinetik enerji
 K_0 : Modifiye Edilmiş Bessel Fonksiyonu
 L : Çubuk (eksenel kiriş) kütlesi uzunluğu
 L_0 : Doğrusal diferansiyel operatörü
 N_x : Yerel olmayan eksenel kuvvet iç tesiri

P	: Eksenel iç tesir
T	: Harmonik hareket
U	: İç şekil değiştirme enerjisi
U	: Mod şekli
V	: Cismin kapladığı hacim
W	: Dış yükün işi
α	: Öklidyen formda uzaklık
β	: Yerel olmayan parametre
δ	: Varyasyon operatörü
δ_{ij}	: Kronecker Delta Sembolü
ε_{ij}	: Şekil değiştirme tansörü
λ, μ	: Lamé sabitleri
ω	: Titreşim frekansı
$\bar{\omega}$: Boyutsuz frekans
ρ	: Birim hacim ağırlığı
σ_{ij}	: Klasik gerilme

Bu tezde sayıların ondalık kısmı nokta işareti (.) ile ayrılmıştır.

Kısaltmalar

AKM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
BNNT	: Bor nitrit nanotüp
C – C	: Her iki ucu tam tutulu aksenal nanokiriş
C – F	: Bir ucu tam tutulu diğeri ucu serbest aksenal nanokiriş
CNT	: Karbon nanotüp
EKT	: Euler – Bernoulli Kiriş Teorisi
F – F	: Her iki ucu serbest aksenal nanokiriş
kg	: Kilogram
m	: Metre
nm	: Nanometre
TKT	: Timoshenko Kiriş Teorisi
TPa	: Terapascal
TTM	: Taramalı Tünelleme Mikroskobu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Makro, mikro ve nano ölçekli bazı tipik örneklerin karşılaştırılması (Gümüş 2015)	2
Şekil 2.2. Fulleren (C_{60}) yapısı (Anonymous 1).....	3
Şekil 2.3. Ksenon atomları ile nikel yüzeye yazılmış IBM yazısı (Anonymous 2).....	4
Şekil 2.4. Dört ayaklı nanoaraba (Tepe 2007)	4
Şekil 2.5. Nanoteknolojinin eldesi için genel yöntemler. Solda: Yukarıdan aşağıya, Sağda: Aşağıdan yukarıya (Rawat 2015).....	5
Şekil 2.6 Altıgenlerden oluşan düzlem (Ciofani ve Mattoli 2016).....	6
Şekil 2.7. Tek duvarlı bor nitrür nanotüplerin farklı geometrilerdeki konfigürasyonları a) Zikzak b) Koltuk c) Bükük (Yap 2009).....	7
Şekil 3.1. Serbestlik derecesine göre yapı örnekleri a) Tek serbestlik dereceli yapı b) Çok serbestlik dereceli yapı (Numanoğlu 2017)	9
Şekil 3.2. a) Eksenel titreşime maruz kalan çubuk b) Çubuktan çıkarılmış sonsuz küçük uzunluktaki parçanın serbest cisim diyagramı	10
Şekil 4.1. Farklı mesnet koşullarındaki eksenel nanokirişlerin boyutsuz titreşim frekanslarının mod sayısına göre değişimi ($e_0a/L = 0.0$)	25
Şekil 4.2. Eksenel nanokirişlerin klasik ve yerel olmayan boyutsuz titreşim frekanslarının mod sayısına göre değişimi a) C – C b) C – F	25 – 26
Şekil 4.3. Farklı mesnet koşullarındaki eksenel nanokirişlerin temel mod boyutsuz titreşim frekanslarının boyutsuz atomik parametreye göre değişimi	26
Şekil 4.4. Farklı mesnet koşullarındaki eksenel nanokirişlerin ilk beş mod boyutsuz titreşim frekanslarının boyutsuz atomik parametreye göre değişimi a) C – C b) C – F.....	27
Şekil 4.5. Farklı mesnet koşullarındaki eksenel nanokirişlerin temel modu için yerel olmayan frekanslarının yerel frekanslara oranının farklı atomik uzunluk değerleri için değişimi a) C – C b) C – F.....	28

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Serbest titreşim yapan eksenel çubukların bazı tutululuk halleri için sınır şartlar.....	18
Çizelge 4.1. Serbest titreşim analizinde kullanılan parametreler.....	22
Çizelge 4.2. Çeşitli sınır şartlardaki eksenel nanoçubukların eksenel titreşimi için ilk beş mod boyutsuz frekans değeri.....	23
Çizelge 4.3. Bor nitrür nanotüplerin her iki ucu tutulu eksenel giriş modelinin farklı boyutsuz atomik uzunluk ve giriş uzunluğu değerlerine göre temel mod frekans değerleri (THz)	24
Çizelge 4.2. Bor nitrür nanotüplerin bir ucu tutulu ve diğer ucu serbest eksenel giriş modelinin farklı boyutsuz atomik uzunluk ve giriş uzunluğu değerlerine göre temel mod frekans değerleri (THz)	24

1. GİRİŞ

Gün geçtikçe insanlar geçirmiş oldukları fani yaşantıdan daha fazla istek ve beklenti içerisine girmiştir. Bu nedenle teknoloji hızla gelişmektedir ve bu gelişime paralel olarak geçmiş olduğumuz son 15 – 20 yıllık süre zarfında, elektrik – elektronik, tıp, biyoteknoloji, havacılık, endüstri ve daha birçok sektörün gelişimi büyük yol kat etmiştir. İnsanlar daha yeni ve güçlü özelliklerle donanmış malzemeleri kullanmaya ve yaşam kalitesini daha da yükseltecek hizmetleri almaya başlamışlardır. Örnek verilecek olursa yeni nesil bilgisayar işlemcileri çok daha hızlıdır ve böylece önemli işlerimizde zaman yönetimi kolaylık kazanmıştır.

Teknoloji, var olan bilgiyi işleyerek pratiğe geçirme anlamını taşır. Herhangi bir bilim dalının içeriğinden yararlanılarak bunu insanların işine yarayacak çıktılara dönüştürmek esastır. Nanoteknoloji ise nano ölçekli malzemelerin teknolojisidir ve sadece fen veya mühendislik değil, neredeyse var olan bütün bilimlerin çıktılarını teknolojinin uygulamaları ile birleştirerek insanların yaşam kalitesini ve memnuniyetini yükseltmeye çalışır.

Nano ölçekli malzemelerin üretimi öncesi tasarım aşamasında modellenilebilir olması problemi karşımıza çıkar ve bu modelleme çok karmaşık düşünceyi gerektirmez. Örnek verecek olursak karbon nanotüp veya bor nitrür nanotüp ile modellenilebilen malzemeler basitçe tek boyutluyken grafen gibi malzemeler iki boyutludur. Ancak nanoteknoloji kullanılarak imal edilen bu ürünlerin ve cihazların tasarımının yapılabilmesi için bu modellerin dış etkiler altında nasıl bir performansta ve davranışta bulunacağı, bilinmesi gereken bir noktadır. Bu etkilerden akla ilk gelenleri optik, termik, elektrik, mekanik olarak söylenebilir. Mekanik etkilerin anlaşılabilmesi adına bu tez çalışması, bor nitrür nanotüplerle modellenen eksenel çubukların titreşim probleminin çözülmesini ve anlaşılmasını amaçlamıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

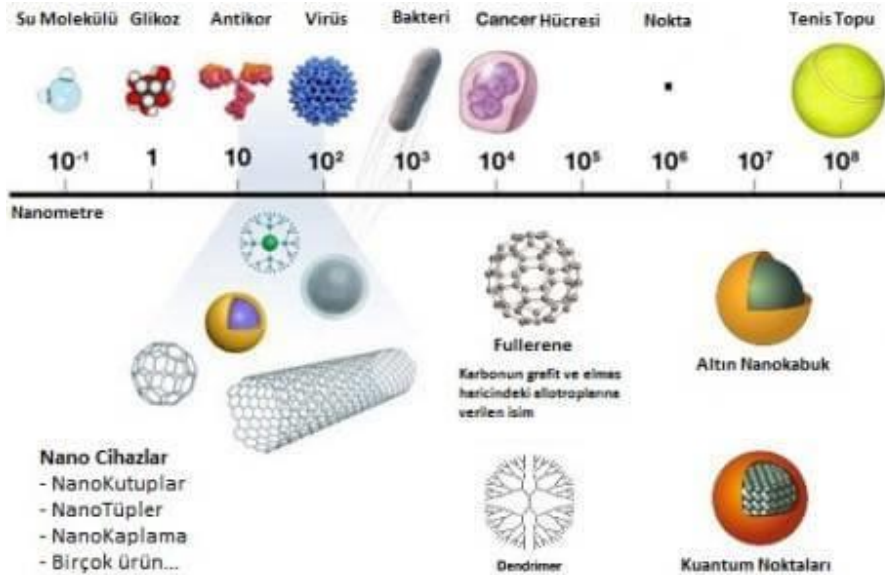
2.1. Nanoteknoloji

2.1.1. Nanoteknolojinin tanımı

Gündelik yaşantımızda kullanıma aldığımız malzemeleri ve cihazları incelediğimiz zaman bunlar öncekilerine göre daha üstün özelliklerle donanmıştır. Bu malzemeler, ekipmanlar ve cihazlar artık daha az yer kaplamakta, daha hafif ve daha dayanıklı bir halde olmaktadır. Dolayısı ile yaşantımızın daha çok kolaylaştığını söyleyebiliriz. Bilgi çağında yaşıyor olmamız ve teknolojinin gelişmesi bunun en temel nedenidir. Tabii bu durumun arkasında yatan asıl neden Nanoteknoloji biliminin duraksız gelişme göstermesidir. Nanoteknoloji, nano boyuttaki materyallerin incelenmesini konu alan bir bilim dalıdır. Kelime anlamlarını inceleyecek olursak nano, Yunanca dilinde cüce anlamına gelir, teknik anlamda ise metrenin milyonda birisine karşılık gelir. Teknoloji ise bilginin işlenerek insanların kullanımına alacağı çıktılarının üretilmesi anlamını taşır.

Nano ölçeğe inildiği zaman maddelerin daha farklı özellikleri ortaya çıkmaktadır. Ayrıca nano boyutta maddenin atomik konfigürasyonuna istenildiği gibi müdahale edilebilir. Bu iki nedenden dolayı nanoteknolojik çalışmalar oldukça ilgi çekmiştir. Bilimin temel amacı, başka bir bilimin bilgilerini, nano ölçekte işleme ile birleştirerek daha işe yarar materyallerin ve cihazların geliştirilmesidir.

Bilim dalının çalışma alanı tipik örneklerle tasvirlenebilir. Örnek verilecek olursa gözle görülemeyecek büyüklükteki su molekülü, 0.01 nm ve bakteri hücresi 1000 nm uzunlukla ifade edilebilir. Bunlar Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



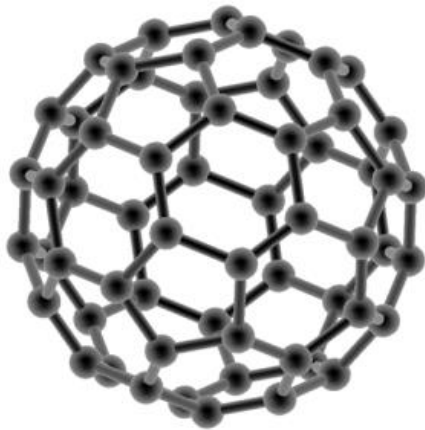
Şekil 2.1. Makro, mikro ve nano ölçekli bazı tipik örneklerin karşılaştırılması (Gümüş 2015)

Bilimin öneminin kavranması ile birçok ülke, kuruluş ve organizasyon, nanoteknoloji çalışmalarına büyük bir hız kazandırmıştır. Ülkelerin hükümet düzeyinde yapmış oldukları yatırımlar büyük meblağlarla ifade edilebilmektedir. Dünya genelinde bu alanda en fazla Ar-Ge harcaması yapan ülkeler ABD ve Japonya'dır (Kutucu 2010).

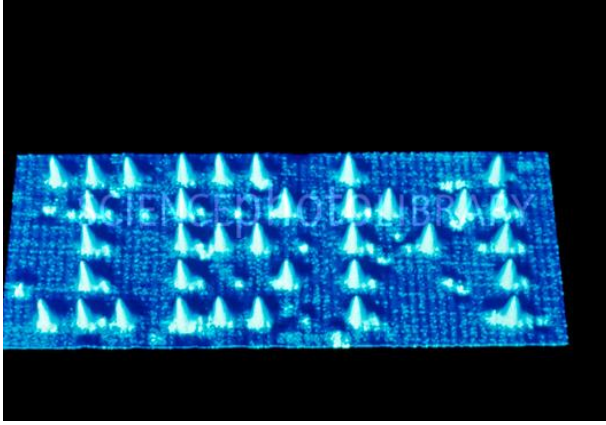
2.1.2. Nanoteknolojinin tarihçesi

Nanoteknolojik çalışmalar oldukça eski bir geçmişi günümüze taşımıştır. Bu çalışmalar için aşağıda bir kronolojik sıra sunulmuştur.

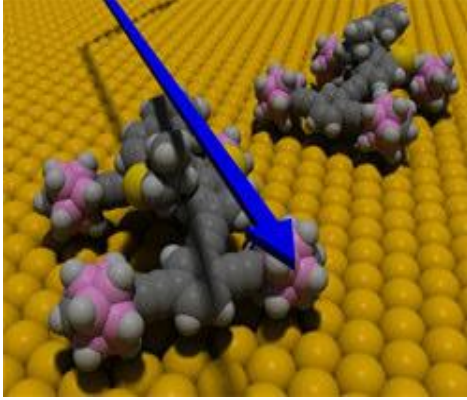
- 1959: Fizikçi R. Feynman nanoteknolojinin temelini hazırladı. Konfreanslarında cihazların atomik ölçekte boyutlarda imal edilebileceği fikrini ortaya attı.
- 1981: E. Drexler ilk nanoteknoloji makalesini yayınladı.
- 1981: IBM tarafından Taramalı Tünelleme Mikroskobu (TTM) geliştirildi.
- 1985: R. Curl, H. Croto ve R. Smalley karbon atomlarının bir araya getirdiği ve top şekline benzeyen bir yapı olan fulleren molekülünü keşfettiler. Bu keşif onlara daha sonra Nobel Kimya Ödülü'nü kazandırdı. Bu yapı Şekil 2.2.'de görülmektedir.
- 1986: Atomik kuvvet mikroskobu (AKM) icat edildi.
- 1988: E. Drexler tarafından nanoteknoloji dersi verildi.
- 1989: D. Eigler (IBM bilim adamı) nikel atomlardan oluşan yüzeye IBM yazısı yazdı. Bu yapı Şekil 2.3'de görülmektedir.
- 1991: Japon bilim adamı S. Iijima, yaptığı ark-buhar deneyleri neticesinde çok duvarlı karbon nanotüpleri keşfetti.
- 1993: Tek duvarlı karbon nanotüpler keşfedildi.
- 1996: Rice Üniversitesi'nden araştırmacılar Lazer Buhar Yöntemi'ni buldular.
- 1997: N. Seedman DNA molekülü ile nanomekanik cihaz icat etti.
- 1999: M. Reed ve J.M. Tour tek organik molekül ile elektronik anahtar yaptılar.
- 2001: Nanotüplerden transistör ve mantık devreleri yapıldı.
- 2002: Süperörgü nanoteller yapıldı.
- 2005: Dört tekerlekli nanoaraba modeli hareket ettirildi. Bu model Şekil 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2.2. Fulleren (C_{60}) yapısı (Anonymous 1)



Şekil 2.3. Ksenon atomları ile nikel yüzeye yazılmış IBM yazısı (Anonymous 2)



Şekil 2.4. Dört ayaklı nanoaraba (Tepe 2007)

2.1.3. Nanoteknolojinin uygulama alanları

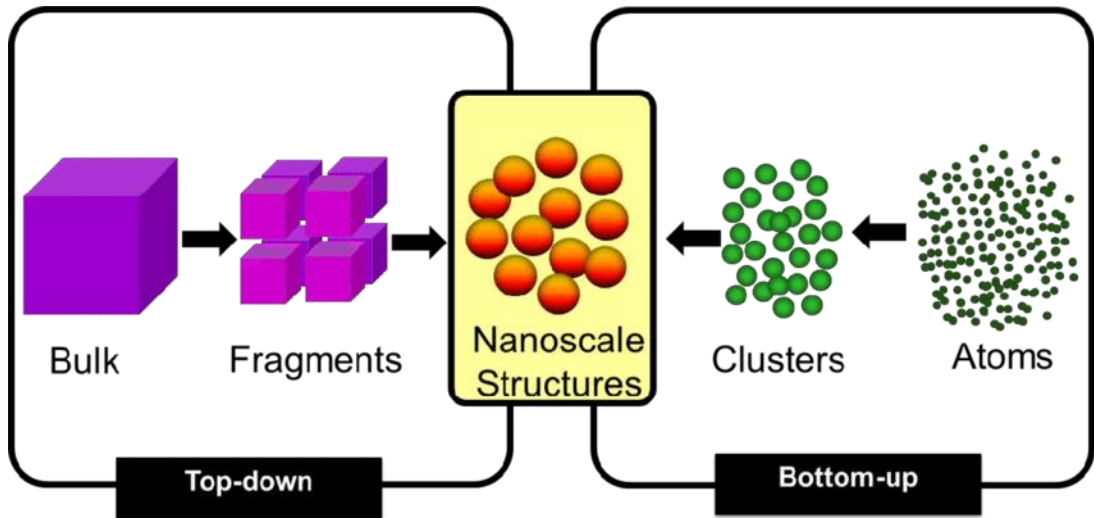
Bir şekilde her sektörün içerisinde nanoteknolojinin etkisini görüyoruz. Savunma sanayii, bilişim, havacılık, tıp, fabrikasyon, kozmetik bunlara verilebilecek örneklerden sadece birkaçıdır. Nanoteknolojinin uygulamaları için bazı örnekleri aşağıda açıklayabiliriz.

- 1. Malzeme ve imalat:** Nano yapılı polimer, seramik, boya, kir tutmayan yüzeyler, kaplama malzemeleri gibi daha fonksiyonel malzemelerin yanı sıra daha az enerjiye ve maliyete gereksinim duyacak yöntemlerin geliştirilmesi.
- 2. Sağlık:** Nanorobotların üretimi ile çok daha yeni teşhis ve müdahale yöntemlerinin ortaya çıkarılması amaçlanmaktadır. DNA modifikasyonunda kullanımı da örneklenebilir.
- 3. Havacılık:** Isıya mukavemetli nanoyapılı kaplama malzemeleri ile roket ve uzay istasyonlarının inşaatı ile beraber havacılık araçlarının üretimi.

4. **Çevre ve enerji:** Bazı nanomalzemelerin kullanımı ile daha çevreci sistemlerin kurulması amaçlanmaktadır. Hidrojen enerjisi ve güneş pillerini de bu noktada söyleyebiliriz.
5. **Elektronik:** Kapasitör, transistör, işlemci ve sensör yapımında kullanımı amaçlanmaktadır.
6. **Savunma:** Daha güçlü silah ve kamuflaj sistemleri, akıllı giyecekler ve algılayıcıların üretimi.

2.1.4. Nanoteknolojinin elde edilme yöntemleri

Nanoteknoloji kullanılarak daha üstün nitelikli ürün ve malzeme üretimi çalışmaları *aşağıdan yukarıya* ve *yukarıdan aşağıya* olmak üzere iki farklı başlık altında toplanmaktadır. Aşağıdan yukarıya yaklaşımına göre nanoyapı, atomların bir araya gelmesinden oluşur ve birimden bütüne gitme olayı temsil edilir. Bilgisayar çipi örnek olarak verilebilir. Yukarıdan aşağıya yaklaşımına göre, oluşturulacak olan yapının oluşturulması için yeni bir yapı oluşturulur. Örneğin bilgisayar çipi oluşturmak için önce “bulk” denilen malzeme oluşturulur. Bir nevi bütünden birime gitme durumu söz konusudur. Nanoteknolojinin eldesi şematik olarak Şekil 2.5’te görülmektedir.

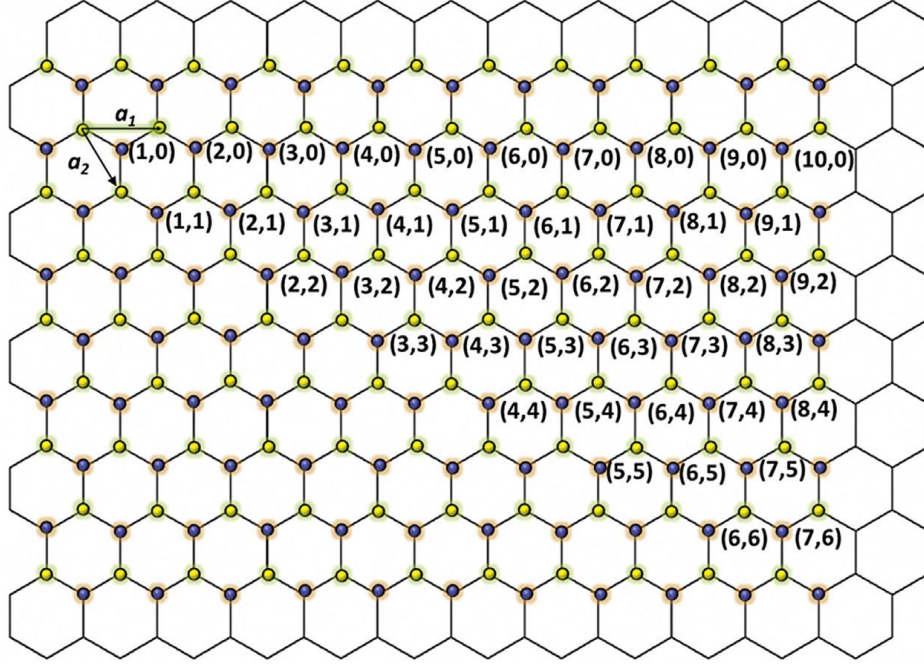


Şekil 2.5. Nanoteknolojinin eldesi için genel yöntemler. Solda: Yukarıdan aşağıya, Sağda: Aşağıdan yukarıya (Rawat 2015)

2.2. Bor Nitrür Nanotüpler (BNNT)

Bazı nanoyapıların tek veya farklı element atomlarının bir araya geldikten sonra çeşitli konfigürasyonlar gösterecek şekilde bağlanarak meydana geldiği bilinmektedir. Bunlara en temel örnek karbon nanotüp yapısıdır. Karbon nanotüp yapısında sadece karbon atomları bir araya gelerek altıgen oluşturacak şekilde bağlanırlar ve bu altıgenler

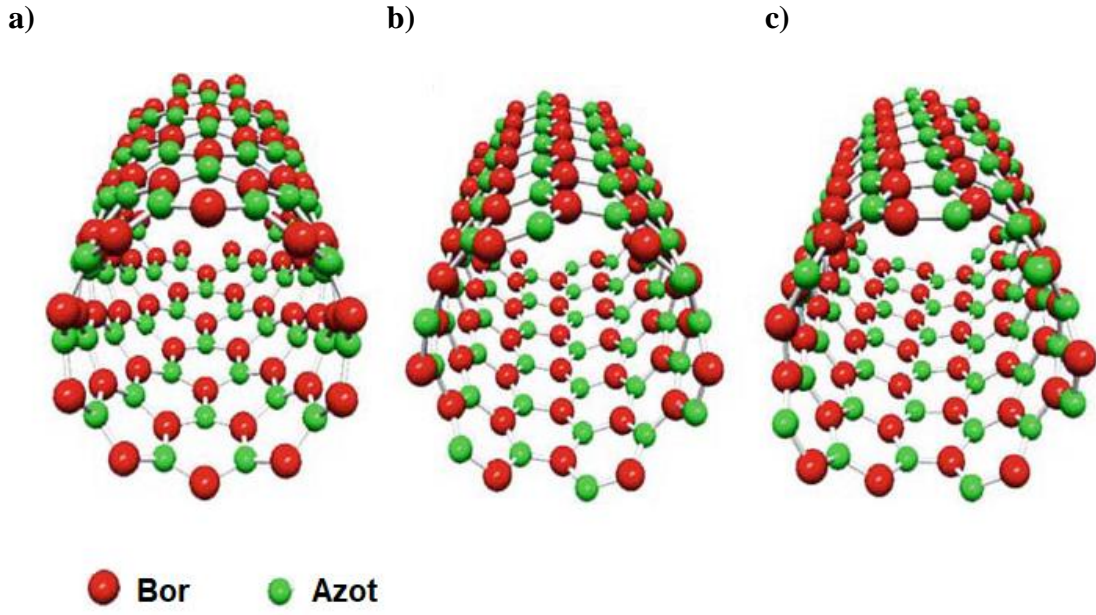
birbiri ile bir düzlem oluştururlar. Bu düzlemsel yapı uzayda sarılarak silindirik bir yapı meydana getirir ve bu yapı basit bir tüp yapısını tanımlar. Altıgenlerden meydana gelen düzlemsel yapı farklı geometrik biçimlerde sarılabilir. Bu sarılma bir düzlem üzerinde referans alınan bir doğrultuya bağlı gerçekleşir. Bahsedilen düzlem yapısı Şekil 2.6.'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Altıgenlerden oluşan düzlem (Ciofani ve Mattoli 2016)

Bu altıgen düzlemi üzerinde dikey bir doğrultu alındığını düşünelim. Düzlem dikey doğrultu, başka bir deyişle nanotüp eksenini etrafında sarılırsa ortaya çıkan yapı *koltuk nanotüp* olarak adlandırılır. Eğer sarılma doğrultusu, altıgenlerin kısa köşegenlerini birbirine bağlayan hat üzerinde gerçekleşirse oluşacak tüp konfigürasyonu *zıgzak* ve son olarak bu iki doğrultu arasında alınacak olan rastgele bir doğrultuda sarılma gözleniyorsa *bükük* nanotüp ortaya çıkar. Sarılma çeşidi, mekanik ve fiziksel özellikleri etkilemektedir.

Bor Nitrür Nanotüpler (BNNT), bor (B) ve azot (N) atomlarının uzayda birbirine bağlanarak oluşturduğu yapının sarılması ile meydana gelmektedir. Bu yapıda farklı element atomları bir araya gelmiştir. Bu tür yapılarda sarılma ile oluşan yapı *duvar* olarak adlandırılır. Bir tüp yapısında duvarlar tek veya çok sayıda bulunabilir. Farklı geometrideki tek duvarlı BNNT yapıları tipik olarak Şekil 2.7.'de resmedilmiştir.



Şekil 2.7. Tek duvarlı bor nitrür nanotüplerin farklı geometrilerdeki konfigürasyonları
a) Zikzak b) Koltuk c) Bükük (Yap 2009)

BNNT yapıları tıp, otomotiv, savunma sanayii, optik gibi birçok endüstride kullanıma sahiptir. Bu yapıların karbon nanotüplerle yaklaşık olarak aynı güçte olduğu bilinmektedir. Bu yapılar polimer yapılarla bağ kurarak kompozit malzemeler oluşturabilmektedir (Anonim 1). Ancak karbon nanotüp yapıları polimerlerle iyi bağ kuramadıkları için oluşan kompozitin özellikleri kötü yönde etkilenmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda BNNT ile yapılan ve epoksiyle üretilen malzemelerin KNT ve epoksi ile yapılan malzemelerden %20 daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Ayrıca BNNT ile üretilen malzemeler KNT ile üretilenlerden daha yüksek sıcaklıklarda daha kararlı kalmaktadır (Anonim 2).

2.3. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Sürekli sistemlerin yerel olmayan elastisite teorisi ile mekanik analizlerine dair birçok çalışma literatürde mevcuttur. Bu çalışmalardan önemli görülenlerinin özetleri aşağıda kronolojik sırayla sunulmuştur.

Bu konuda yapılmış olan en önemli çalışmalardan bir tanesinin Reddy (2007) tarafından gerçekleştirildiği belirtilebilir. Reddy Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi (EKT), Timoshenko Kiriş Teorisi (TKT), kendi geliştirmiş olduğu teori ve Levinson Kiriş Teorisi ile yerel olmayan elastisite teorisine dayanarak her iki ucu basit mesnetli kirişlerin eğilme, titreşim ve burkulma analizlerini gerçekleştirmiştir. Yayılı yük, tekil yük altında çökme değerlerini, serbest titreşim frekanslarını ve burkulma yükü değerlerini sunmuştur.

Aydođdu (2009) nano ölçekli çubukların yerel olmayan elastisite teorisine dayalı eksenel serbest titreşim analizini gerçekleştirmiştir. İki farklı mesnet koşullarındaki nano çubuklar için frekans denklemlerini vermiştir. Farklı yerel olmayan parametre altında yerel titreşim frekanslarının yerel olmayan titreşim frekanslarına oranını çubuk uzunluğunun değişimine göre grafiksel olarak sunmuştur.

Civalek ve Demir (2011), mikrotüpçüklerin eğilme analizini yapmışlardır. Eğilme problemlerine dair yönetici denklemi elde etmişlerdir. Yayılı ve tekil yük için çözüm yapmışlardır. Ayrıca eğilme analizini Diferansiyel Kuadratür Metoduyla (DKM) da gerçekleştirmişlerdir. DKM ile elde edilen sonuçlar analitik yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Öte yandan her iki ucu basit mesnetli ve her iki ucu ankastre mesnetli kirişler için farklı yerel olmayan parametre altında statik deformasyon eğrilerini ve yayılı/tekil yük değerleri altında eğilme momenti diyagramlarını sunmuşlardır. Yerel olmayan parametre yayılı yüklü sistemlerde eğilme momentini değiştirmezken tekil yüklü sistemlerde değiştirmektedir.

Thai (2012) yapmış olduğu yerel olmayan bir kiriş teorisi geliştirmiştir. Eğilme, burkulma ve titreşim problemleri için sunulan sayısal sonuçlar farklı teorilere bu teoriye göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlar daha çok kesme deformasyonu içeren teorilerle benzerlik göstermektedir.

Li (2014) karbon nanotüplerin burulma titreşimi analizini yapmıştır. İki farklı yerel olmayan model ve yarı-sürekli modele göre bu analizleri sunmuştur. Yerel olmayan modeller güçsüz ve geliştirilmiş model olmak üzere ikiye ayrılır. Yarı-sürekli model ise atom katmanların arasındaki şekil değiştirme enerjisi etkileşimi ile alakalıdır. Tüm modellere göre frekans denklemlerini sunmuştur. Yerel olmayan modeller için atomik parametre altında ve yarı-sürekli model için bir relaksasyon katsayısı altında frekanslar grafik olarak sunulmuştur.

Li vd. (2015) yapmış oldukları çalışmada TKT ile modellenmiş nanokirişlerin elektro ve manyetik etkiler altında mekanik analizlerini yapmışlardır. Elektrik ve manyetik yüklerin ve atomik ifadenin değişimi altında normalize kritik burkulma yüklerini ve doğal frekansları grafiksel olarak vermişlerdir.

Xu vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada nanoçubukların serbest titreşim analizini yerel olmayan elastisite – modifiye şekil değiştirme değişimi elastisite teorilerinin birleşimini kullanarak yapmışlardır. Sayısal sonuçlar yerel olmayan parametrenin yanı sıra değiştirilmiş şekil değiştirme elastisite teorisinin formülasyonu gereği ortaya çıkan boyut ölçek parametresi değerleri altında sunulmuştur.

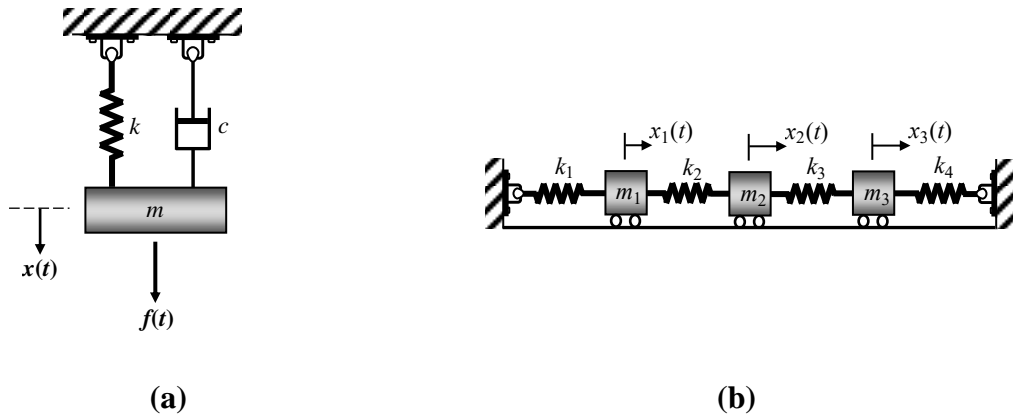
Thai vd. (2018) yerel olmayan elastisite teorisini kullanarak kesme deformasyonu teorisi üzerine bir çalışmada bulunmuşlardır. Farklı mesnet koşullarındaki kirişlerin titreşim analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Kirişlerin çökme ve eğilme momenti denklemlerini sunmuşlardır. Sayısal sonuçlarda tablolar, EKT ve TKT sonuçları ile karşılaştırma şeklinde verilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Sürekli Yapıların Titreşimi

Mühendislik mekaniği disiplini içerisinde çeşitli karakteristik özellikler gösteren yapıların dış zorlamalar veya etkiler altında gösterdikleri mukavemet halleri ele alınır. En basit örnekler verilecek olursa bu mukavemet hallerinin statik açıdan eğilme, burulma veya burkulma, dinamik açıdan ise titreşim olguları oldukları belirtilebilir.

Mekanik olarak analiz edilecek yapılar bir sınıflandırmaya göre incelenebilir ve bu sınıflandırma yapıların serbestliği ile alakalıdır. Buna göre, bir yapının hareketinin tam anlamıyla çözülebilmesi adına birbirinden bağımsız olarak belirlenebilecek olan en az nokta sayısına o yapının *serbestlik derecesi* denir. Bir yapının serbestliği bir tane ise tek serbestlik dereceli yapı, en az iki tane ise çok serbestlik dereceli yapı tanımı yapılır. Örnek verilecek olursa Şekil 3.1’de, solda görülen bir m kütlesi, c sabitli sönümleyici ve k sabitli elastik yay etkisinde verilecek başlangıç tahriki ile bir dinamik salınım yani titreşim yapar ve bu hareket sadece tek bir doğrultudadır. Öte yandan sağda görülen çok sayıda kütle, sönümler ve yaylar etkisinde salınım yaparlar. Solda görülen örnekte genel hareketin belirlenmesi tek bir kütlein hareketi ve sağda görülen örnekte üç farklı kütlein hareketi ile mümkün hale gelir. O halde solda görülen yapı tek serbestlikli iken sağda görülen yapı üç serbestliklidir.



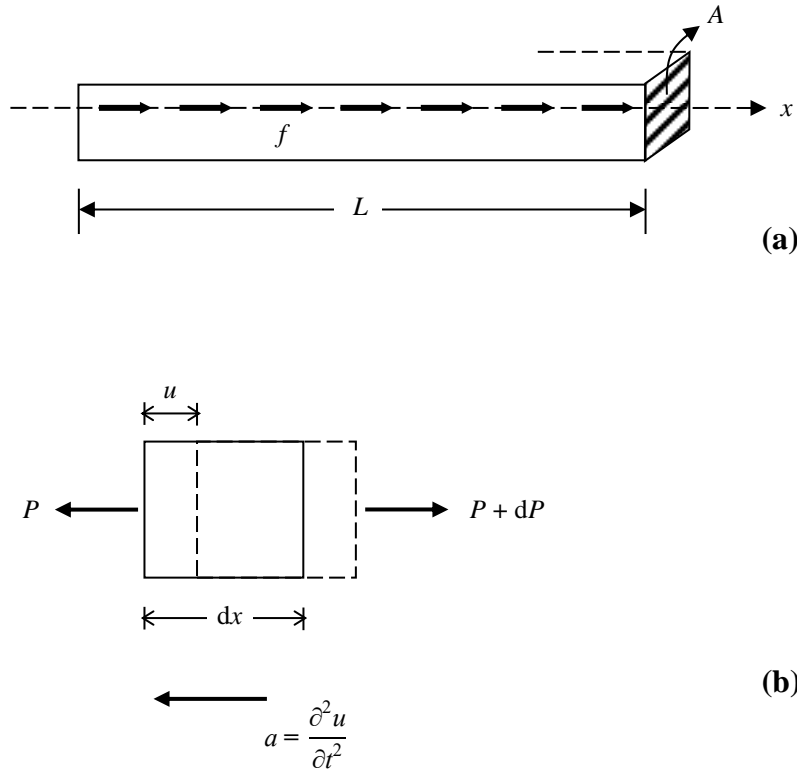
Şekil 3.1. Serbestlik derecesine göre yapı örnekleri **a)** Tek serbestlik dereceli yapı **b)** Çok serbestlik dereceli yapı (Numanoğlu 2017)

Yukarıda vermiş olduğumuz örneklerle beraber birlikte çalışan elemanlar ile kurulan kafes ve çerçeve yapıları ayrık sistemlere örnek verilebilirken eğilme kirişleri, aksel kirişler, burulma yapan shaftlar veya tüpler, ince ve gergin teller, plaklar ve kabuklar sürekli sistemlere örnek verilebilir. Sürekli sistemlerin en önemli karakteristikleri, mekanik davranışlarının sürekli matematiksel modellerle ifade edilebiliyor olmasıdır. Mesela her iki ucu basit mesnetli bir kirişin yayılı yük altında yapacağı çökme olayında kiriş elemanında sonsuz sayıda nokta çökme gerçekleştirir ve kiriş elemanının çökmesini ifade eden fonksiyon da sürekli bir matematiksel modeli teşkil eder.

Sürekli elemana etkiyen dış zorlamaların anlık veya darbeleri etkimesi durumunda bir titreşim olayından söz edilebilir ve bu titreşim olayı zorlanmış titreşim olarak nitelendirilir. Ancak, dış zorlamaların etkideği cisimlerin kendi iç dengesi altında doğal sıklığı ile görülebilen bir titreşim olgusu vardır ve bu titreşim olayı *serbest titreşim* adını alır. Serbest titreşim olayında bir titreşim mod şekli oluşur ve yukarıda verilen statik yük altındaki elastik şekil değiştirme olayına benzer şekilde, bu mod şeklinin de sürekli bir fonksiyon teşkil etmesi beklenir (Numanoğlu 2017).

3.2. Eksenel Çubukların Serbest Titreşimi

Sadece eksenel yöndeki etkilerin çeşitli şekil değişimi hali meydana getirdiği elemanlara eksenel kiriş veya çubuk adı verilmektedir. Çubukların mekanik davranışları çeşitli teorilerle açıklanmaktadır. Bu teorilerden en temeli kayma etkilerinin görülmediği kuram yani basit çubuk teorisidir. Bunun yanı sıra Love – Bishop, Mindlin – Hermann çubuk teorileri gibi çeşitli etkileri göz önüne alan teoriler mevcuttur.



Şekil 3.2. a) Eksenel titreşime maruz kalan çubuk **b)** Çubuktan çıkarılmış sonsuz küçük uzunluktaki parçanın serbest cisim diyagramı

Bu tez çalışmasında basit çubuk teorisi baz alınarak boyut etkili dinamik analiz gerçekleştirilecektir. Buna göre Şekil 3.2.'de görülen ve eksenine yönünde üniform f zorlamasına konu olan L boyundaki eksenel çubuğun serbest cisim diyagramını düşünelim. Çubuktan dx uzunluğunda bir parça yani diferansiyel eleman çıkarılsın. Bu durumda eksenel yük iç tesiri,

$$P = \sigma A = EA \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.1)$$

olacaktır. Burada P aksel yük iç tesiri, σ aksel gerilme, E elastisite modülü, A kesit alan ve u aksel deplasmandır. Bu çubuğun aksel yönde D'Alambert kuvvetleriyle dengede olduğu düşüncesiyle denge denklemi kurulacak olursa,

$$(P + dP) - P + f dx = a dM \quad (3.2)$$

a ve M sırasıyla aksel çubuğun ivmesi ve kütesidir. Bu ifadelerle ilgili olarak aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$a = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad dM = \rho A dx \quad (3.3)$$

Burada ρ elemanın birim hacim ağırlığıdır. Dış yükle alakalı seri açılımının oldukça basite indirgenmiş halinin de

$$dP = \frac{\partial P}{\partial x} dx \quad (3.4)$$

Olduğu düşünülürse, (3.3) ve (3.4) kullanılarak yazılan (3.2) denkleminde her iki taraftan diferansiyel uzunluk dx sadeleştirilecek olursa,

$$\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial P}{\partial x} + f \quad (3.5)$$

yazılır. (3.1), (3.5) denkleminde yerine koyulur, ayrıca serbest titreşimde dış zor olmayacağından dolayı

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.6)$$

yazılır ve bu denkleme aksel çubukların hareket denklemi adı verilir. Bu denkleme varyasyonel hesap yani değişim cebri ilkesiyle de ulaşmak mümkündür. Buna göre bir aksel çubuk elemanın $[t_1, t_2]$ zaman aralığındaki toplam potansiyel enerjisi Π 'nin birinci varyasyonu 0'a eşit olmalıdır. Bu durum Hamilton İlkesi olarak da bilinir. Buna göre,

$$\delta \Pi = \delta \int_{t_1}^{t_2} [K - U + W] dt = 0 \quad (3.7)$$

Burada U iç şekil değiştirme enerjisi, K kinetik enerji ve W dış yükün iş yapabilme kabiliyetidir. Bu ifadeler aşağıdaki gibi verilir.

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma_x \varepsilon_x dV = \frac{1}{2} \int_A \left(\int_0^L E \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) dA = \frac{1}{2} \int_0^L EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 dx \quad (3.8)$$

$$K = \frac{1}{2} \int_V \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 dV = \frac{1}{2} \int_A \left(\int_0^L \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 dx \right) dA = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 dx \quad (3.9)$$

$$W = \int_0^L f u dx \quad (3.10)$$

Bu ifadeleri (3.7) denkleminde yerine yerleştirecek olursak,

$$\delta \Pi = \int_{t_1}^{t_2} \left[\int_0^L \rho A \frac{\partial u}{\partial t} \delta \frac{\partial u}{\partial t} dx - \int_0^L EA \frac{\partial u}{\partial x} \delta \frac{\partial u}{\partial x} dx + \int_0^L f \delta u dx \right] dt = 0 \quad (3.11)$$

(3.11)'in düzenlenebilmesi için integral içerisindeki terimler şu şekilde düzenlenebilir:

$$\int_0^L \int_{t_1}^{t_2} \rho A \frac{\partial u}{\partial t} \delta \frac{\partial u}{\partial t} dt dx = \int_0^L \rho A \frac{\partial u}{\partial t} \delta u \Big|_{t_1}^{t_2} dx - \int_0^L \int_{t_1}^{t_2} \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \delta u dt dx \quad (3.12)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \int_0^L EA \frac{\partial u}{\partial x} \delta \frac{\partial u}{\partial x} dx dt = \int_{t_1}^{t_2} EA \frac{\partial u}{\partial x} \delta u \Big|_0^L dx - \int_{t_1}^{t_2} \int_0^L EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \delta u dx dt \quad (3.13)$$

Bu ifadeler toplu bir şekilde (3.11)'de yazıldıktan sonra oluşan denklem,

$$\int_0^L \rho A \frac{\partial u}{\partial t} \delta u \Big|_{t_1}^{t_2} dx - \int_{t_1}^{t_2} EA \frac{\partial u}{\partial x} \delta u \Big|_0^L dx - \int_0^L \int_{t_1}^{t_2} \left(\rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - f \right) \delta u dt dx = 0 \quad (3.14)$$

Şeklindedir. Bu denklemin tüm bölümleri sıfıra eşit olmak zorundadır. Dolayısı ile,

$$\delta u : \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - f = 0 \quad (3.15)$$

yazılır ve dış zorlamanın serbest titreşimde sıfıra eşit olmasından dolayı (3.6) denkleminde tekrardan ulaşılmış olur.

Buradan itibaren hareket denkleminin çözümü yapılacaktır. Buna göre (3.6) denkleminde her iki taraftan kesit alan sadeleştirildikten sonra denklem şu şekilde yazılır:

$$c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.16)$$

Burada $c = \sqrt{E/\rho}$ olmaktadır. Bilindiği üzere burada hareket fonksiyonu $u = u(x, t)$ şeklinde iki değişkenli bir fonksiyondur ve (3.16)'da görülen kısmi diferansiyel denklemin çözümü, değişkenlerin ayrıştırılması yöntemi olarak bilinen bir metoda göre yapılır. Bu metodun çözüm şablonu,

$$u(x, t) = U(x)T(t) \quad (3.17)$$

şeklindedir. Bu ifade (3.6)'da yerine koyulduktan sonra oluşan kısmi diferansiyel denklemin her bir parçası sabit ve $-\omega^2$ terimine eşit olduğu kabulü ile

$$\frac{c^2}{U} \frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} = -\omega^2 \quad (3.18)$$

Şeklinde yazılır. (3.18) aşağıda görülen iki tane kısmi diferansiyel denkleme ayrılır:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} - \frac{\omega^2}{c^2} U = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + \omega^2 T = 0 \quad (3.20)$$

Bu denklemlerden U mod şeklini ve T harmonik hareketi belirler. Bu çalışma esnasında modal analiz ve titreşim frekanslarının analizi yapılacağı için (3.19)'un çözümünü yapmamız yeterlidir. Detayına girilmeden (3.19) diferansiyel denkleminin çözümü

$$U(x) = C_1 \cos \frac{\omega x}{c} + C_2 \sin \frac{\omega x}{c} \quad (3.21)$$

Şeklindedir. Burada ω açısal frekanstır ve sürekli sistemlerin sonsuz sayıda titreşim modu ve her moda karşılık gelen titreşim frekansı değeri vardır.

3.3. Boyut Etkisine Bağlı Mekanik Analiz ve Yerel Olmayan Elastisite Teorisi

Nanoteknoloji sonucu üretilen ürünlerin biyomedikalden havacılığa, bilişimden tıbbaya, savunma sanayiden kozmetiğe birçok alanda kullanıldığı bilinmektedir. İşlemci, sensör, mikrodevreler, piezo-elektrik materyaller gibi nano ve mikro ölçekli cihazların kullanıma alınabilmesi için tasarımlarının gerçekleştirilebiliyor olması önemlidir ve bu tasarım optik, elektrik, mekanik, termik gibi dış etmenlerin elemanda oluşturacağı etkilere mukavemet gösterebilecek biçimde yapılır. Görülmüştür ki klasik mekanik teorileri ile yapılan tasarımlar mikro ve özellikle de nano ölçekte etkisini yitirir. Bu

durumun altında, elemanın atomik iç boyutlarının etmen olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle daha doğru analizler gerçekleştirebilmek adına deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Moleküler dinamik simülasyonu gibi metotlar oldukça yüksek bilgisayar işlemcisi hacmi ve işlem maliyetinin yanı sıra yüksek uzmanlık bilgisi gerektirir ve bu nedenle çalışmalar teorik araştırmalar üzerinde gerçekleştirilmektedir (Numanoğlu 2017). Analitik çalışmalar noktasında, sürekli ortam yaklaşımları karşımıza çıkar ve bu yaklaşımlar çok çeşitlidir. Bu yaklaşımlardan en yaygın olanı Eringen'in Yerel Olmayan Elastisite Teorisidir. Eringen'in konuyla ilgili oldukça fazla çalışması bulunmaktadır ve bazılarına kaynakçada yer verilmiştir.

Makro yapılı elemanların mekanik analizleri, bu cisimlerin maruz kaldığı dış yükler ve bunların oluşturduğu iç tesirlerin dengesini temel alır. Klasik elastisite teorisi, bu cisimlerin mekanik analizlerinin bir sistematığe oturtulmasını sağlayan hükümler ve yöntemler topluluğudur.

Denge denklemleri maddenin her bir noktasında geçerlidir ve bir noktadaki gerilmeler diğer bölgelerle bağlantılı değildir. Ancak yerel olmayan elastisite teorisinde bir noktadaki gerilme ve şekil değiştirme hesap edilirken sadece bu noktada değil, elastik cismin tüm noktalarındaki gerilmeler ve şekil değiştirmeler hesaba katılır (Işık 2011). Cisimler yer değiştirdiklerinde cisimde düzensizlikler meydana gelir. Böylece şekil değiştirme enerjisi sonsuza gider. Yerel olmayan elastisite teorisi ile bu sorun ortadan kalkar (Tepe 2007).

Homojen ve izotropik cisimlerde yerel olmayan elastisite teorisi için temel denklemler

$$t_{ij} + \rho(f_j - \ddot{u}_j) = 0 \quad (3.22)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.23)$$

$$t_{ij}(x') = \int_V \alpha(|x' - x|) \sigma_{ij}(x') dV(x') \quad (3.24)$$

Burada t_{ij} yerel olmayan gerilme tansörü, ρ birim hacmin kütlesi, f_j kütleli kuvvet ve \ddot{u}_j hareketin ivmesidir. $\alpha(|x' - x|)$ Öklidyen formdaki uzaklık, $\sigma_{ij}(x')$ klasik (Cauchy) gerilme tansörü ve V cismin hacmidir. Lineer elastik cisimler için Hooke Kanunu,

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{rr} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (3.25)$$

olarak verilir. Burada λ ve μ Lamé sabitleri ve ε_{ij} klasik şekil değiştirme tansörüdür. δ_{ij} ise Kronecker Delta Sembolüdür. Tek boyutlu α fonksiyonu iki boyutlu halde

$$\alpha(|x|, \varphi) = (2\pi\varphi^2)^{-1} K_0(\sqrt{x' - x}/\varphi) \quad (3.26)$$

şeklindedir. Burada K_0 Modifiye Edilmiş Bessel Fonksiyonudur. Öte yandan

$$\varphi = e_0 \frac{a}{l} \quad (3.27)$$

şeklinde verilen bağıntı malzeme iç karakteristik uzunluğu a ve dış uzunluğu l arasındaki orandır ve e_0 malzeme cinsine göre analitik olarak belirlenebilen bir sabittir.

Yerel olmayan elastisite teorisinin diferansiyel formu gereğince (3.26) denklemi en genel halde

$$L_0 \alpha(|x' - x|, \varphi) = \delta(|x' - x|) \quad (3.28)$$

ifadesini sağlamaktadır. Burada δ ifadesi Dirac fonksiyonudur. Bu ifade, diğer bir biçimde

$$L_0 t_{ij} = \sigma_{ij} \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilir ve burada $L_0 = 1 - l^2 \varphi^2 \nabla^2$ ifadesi doğrusal diferansiyel operatörü ve ∇ ise ikinci mertebeden diferansiyel operatörüdür. (3.25) denklemi (3.29)'da yerine yazılacak olursa

$$(1 - l^2 \varphi^2 \nabla^2) t_{ij} = \lambda \varepsilon_{rr} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (3.30)$$

(3.27) ifadesi ve tek boyutta ikinci mertebeden diferansiyel operatörü bu denklemde yerine koyulacak olursa,

$$t_{ij} - \beta \frac{\partial^2 t_{ij}}{\partial x^2} = E \varepsilon_{ij} \quad (3.31)$$

elde edilir ve burada $\beta = (e_0 a)^2$ ifadesi atomik parametreyi ifade eder.

3.4. Eksenel Nanoçubukların Yerel Olmayan Serbest Titreşimi

Bu bölümde eksenel mikro ve nano ölçekli çubukların yerel olmayan elastisite teorisi ile serbest titreşimine ait hareket denklemi türetilenektir. Buna göre (3.31) denkleminin her iki tarafından alan boyunca integrali alınırsa

$$\int_A t_x dA - \beta \int_A \frac{\partial^2 t_x}{\partial x^2} dA = E \int_A \varepsilon_x dA \quad (3.32)$$

olacaktır. Eksenel normal kuvvet iç tesirine ve şekil değiştirmeye dair bünye ve denge bağıntıları,

$$N_x = \int_A t_x dA, \quad \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \frac{\partial N_x}{\partial x} = m_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.33)$$

olarak verilir. Burada $m_0 = \rho A$ olarak verilen ifade birim uzunluğa düşen kütleyi tanımlar ifadeleri denklemden yerine koyacak olursak,

$$N_x - \beta \frac{\partial^2 N_x}{\partial x^2} = EA \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.34)$$

olacaktır. Bu denklem her iki tarafından bir defa x 'e göre türetilirse aşağıdaki ifade yazılır.

$$\left(1 - \beta \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \left(m_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right) = EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3.35)$$

olacaktır. Bu denklem her iki tarafından bir defa x 'e göre türetilirse aşağıdaki ifade yazılır.

$$m_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \beta m_0 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} - EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (3.36)$$

böylelikle boyut etkisi ilave edilmiş hareket denklemini elde edilmiş olur. Bu denklemin çözümü, klasik titreşime benzer biçimde

$$u(x) = U(x) \sin(\omega t - \alpha) \quad (3.37)$$

şablonu ile yapılır. (3.36) denkleminde görülen ifadeleri oluşturabilmek adına (3.36) denkleminin ilgili kısmi türevleri şu şekildedir:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \sin(\omega t - \alpha) \quad (3.38a)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 U \sin(\omega t - \alpha) \quad (3.38b)$$

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = -\omega^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \sin(\omega t - \alpha) \quad (3.38c)$$

bu ifadeler (3.36) denkleminde yerine koyulduktan sonra

$$-m_0\omega^2 U \sin(\omega t - \alpha) + \beta m_0\omega^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \sin(\omega t - \alpha) - EA \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \sin(\omega t - \alpha) = 0 \quad (3.39)$$

Denklemin her iki tarafından harmonik ifadeler $\sin(\omega t - \alpha)$ sadeleştirilecek olursa,

$$(EA - \beta m_0\omega^2) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + m_0\omega^2 U = 0 \quad (3.40)$$

elde edilir. Bu denklem

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \eta^2 U = 0 \quad (3.41)$$

şeklinde yazılırsa ve $c = \sqrt{E/\rho}$ tanımı da kullanılırsa burada

$$\eta^2 = \frac{m_0\omega^2}{EA - \beta m_0\omega^2} = \frac{\omega^2}{c^2 - \beta m_0\omega^2} \quad (3.42)$$

olmalıdır. Mod şekli için elde edilen (3.40) diferansiyel denkleminin çözümü için çözüm şablonu

$$U(x) = B_i e^{mx} \quad (3.43)$$

olacaktır. Bu durumda (3.41) denkleminin karakteristik polinomu

$$m^2 + \eta^2 = 0 \quad (3.44)$$

olacaktır. Bu denklemin kökleri,

$$m_1 = i\eta, \quad m_2 = -i\eta \quad (3.45)$$

şeklindedir. Dolayısı ile denklemin çözümü

$$U(x) = B_1 e^{i\eta x} + B_2 e^{-i\eta x} \quad (3.46)$$

şeklindedir. Denklemin çözümü daha farklı formda verilecektir, bunun için Euler Dönüşümleri olarak bilinen

$$e^{i\eta x} = \cos \eta x + i \sin \eta x, \quad e^{-i\eta x} = \cos \eta x - i \sin \eta x \quad (3.47)$$

ifadeleri kullanılacaktır. Bu ifadeler (3.45) denkleminde yerleştirilecek olursa,

$$U = B_1 (\cos \eta x + i \sin \eta x) + B_2 (\cos \eta x - i \sin \eta x) \quad (3.48)$$

yazılır. Bu çözüm daha genel biçimde

$$U = C_1 \cos \eta x + C_2 \sin \eta x \quad (3.49)$$

olarak verilir.

3.5. Eksenel Nanoçubukların Sınır Koşulları

Klasik çözüm ile elde edilen çözüm sabitleri çubuğun uç koşulları yani tutululuk hali alakalıdır. Bazı tutululuk hallerine ait uç koşullar aşağıdaki gibidir:

Çizelge 3.1. Serbest titreşim yapan eksenel çubukların bazı tutululuk halleri için sınır şartlar

Tutululuk (Mesnetlenme) Hali	Uç koşullar	
	Geometrik Yapıda	Mekanik Yapıda
Her iki ucu tam tutulu (C – C)	$u(0,t) = 0$ $u(L,t) = 0$	–
Bir ucu tam tutulu diğer ucu serbest (C – F)	$u(0,t) = 0$	$EA \frac{\partial u(L,t)}{\partial x} = 0$
Her iki ucu serbest (F – F)	–	$EA \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = 0$ $EA \frac{\partial u(L,t)}{\partial x} = 0$

Tablodaki şartların cümleye dökülmüş halini ise şöyle açıklayabiliriz: Tutulu uçlar eksenel şekil değiştirme yapmazken serbest uçlar serbest titreşim esnasında dış tesir olmadığından iç tesir almazlar. Eksenel iç kuvvetin ilgili bağıntısından dolayı ilgili sınır şart oluşturulmuş olur.

Yerel olmayan elastisite ile serbest titreşim çözümü yapılırken eksenel deplasman veya eksenel şekil değiştirme gibi geometrik koşullar aynı kalır. Yalnız, eksenel bir iç tesiri ilgilendiren durum oluşursa, mesela zorlanmış titreşim veya iç tesir doğuracak bir eklenti (noktasal kütle veya elastik rijitlikli yay gibi) eksenel çubukta mevcutsa mekanik sınır şartları değişkenlik gösterecektir çünkü boyut etkisi eksenel normal kuvvet iç tesiri fonksiyonuna da etki eder. Buna göre (3.34) denklemi aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$N_x(x,t) = EA \frac{\partial u}{\partial x} + (e_0 a)^2 \rho A \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2} \quad (3.50)$$

denklem (3.37) ve türevlerine göre düzenlenecek olursa,

$$N_x(x, t) = EA \frac{\partial U}{\partial x} \sin(\omega t - \alpha) - (e_0 a)^2 \rho A \omega^2 \frac{\partial U}{\partial x} \sin(\omega t - \alpha) \quad (3.51)$$

elde edilir. Denklem düzenlenirse,

$$N_x(x, t) = [EA - (e_0 a)^2 \rho A \omega^2] \frac{\partial U(x)}{\partial x} \sin(\omega t - \alpha) \quad (3.52)$$

yazılır. Modal analiz yapılacağı için eksenel kuvvet fonksiyonu

$$N_x(x) = [EA - (e_0 a)^2 \rho A \omega^2] \frac{\partial U(x)}{\partial x} \quad (3.53)$$

olarak elde edilir. Buradan itibaren sınır şartların analizi yapılacaktır:

1. Her iki ucu tam tutulu eksenel nanoçubuklar: Bu eksenel çubukların sınır şartları klasik koşul ile aynıdır:

$$u(0) = 0 \quad (3.54a)$$

$$u(L) = 0 \quad (3.54b)$$

(3.54a) ifadesi (3.49)'da yerine yazılırsa $C_1 = 0$ olarak bulunur ve (3.54b) ifadesi (3.49)'da yerine yazılırsa

$$C_2 \sin \eta L = 0 \quad (3.55)$$

$C_2 = 0$ olamaz, bu durumda çubuk titreşim yapmamış demektir. Dolayısı ile

$$\sin \eta L = 0 \quad (3.56)$$

şeklinde denklem karşımıza çıkar. Bu denklemin çözümü

$$\eta = \frac{n\pi}{L} \quad (3.57)$$

şeklindedir. Bu eşitlik (3.42)'de yerine yazılacak olursa

$$\omega^2 = \frac{(n\pi c)^2}{[n\pi(e_0 a)^2] + 4L^2} \quad (3.58)$$

eşitliği elde edilir (Numanoğlu 2017). Bu denklem frekans denklemini belirtir. Burada n mod sayısıdır.

- 2. Bir ucundan tam tutulu ve diğer ucundan serbest eksenel nanoçubuklar:** Bu tip eksenel çubuklarda ise sınır şartlar $x = 0$ ucunun şekil değiştirme yapmamasının yanı sıra $x = L$ ucunda eksenel iç tesir olmaması koşuludur. O halde bunlar

$$u(0) = 0 \quad (3.59a)$$

$$\left[EA - (e_0a)^2 \rho A \omega^2\right] \frac{\partial U(L)}{\partial x} = 0 \quad (3.59b)$$

Eksenel rijitlik, atomik parametre, birim uzunluk ağırlığı ve doğal frekans sıfıra eşit olamayacağından dolayı (3.58b) şartı şöyle düzenlenebilir:

$$\frac{\partial U(L)}{\partial x} = 0 \quad (3.60)$$

(3.58a) için $C_1 = 0$ olarak bulunur. (3.59) ifadesi kullanılacak olursa

$$C_2 \eta \cos \eta L = 0 \quad (3.61)$$

C_2 ve η ifadeleri sıfıra eşit olamaz, bu nedenle anlamlı olacak olan çözüm

$$\cos \eta L = 0 \quad (3.62)$$

şeklinde dir. Bu trigonometrik denklemin çözümü

$$\eta = \frac{(2n-1)\pi}{2L} \quad (3.63)$$

olur. Dolayısı ile frekans denklemi

$$\omega^2 = \frac{[(2n-1)\pi c]^2}{[(2n-1)\pi(e_0a)^2] + 4L^2} \quad (3.64)$$

şeklinde elde edilmiştir (Numanoğlu 2017).

- 3. Her iki ucu boş eksenel nanoçubuklar:** Bu tip eksenel çubuklarda $x = 0$ ve $x = L$ ucunda eksenel zorlama olmadığından sınır şartlar

$$\left[EA - (e_0a)^2 \rho A \omega^2\right] \frac{\partial U(0)}{\partial x} = 0 \quad \text{veya} \quad \frac{\partial U(0)}{\partial x} = 0 \quad (3.65a)$$

$$\left[EA - (e_0a)^2 \rho A \omega^2\right] \frac{\partial U(L)}{\partial x} = 0 \quad \text{veya} \quad \frac{\partial U(L)}{\partial x} = 0 \quad (3.65b)$$

(3.65a) şartı (3.49)'da yerine yazılırsa $C_2 = 0$ olarak bulunur ve (3.66b) ifadesi (3.49)'da yerine yazılırsa

$$-C_1\eta \sin \eta L = 0 \quad (3.66)$$

$C_1 = 0$ olamayacağı için frekans denklemi

$$\sin \eta L = 0 \quad (3.67)$$

olarak ortaya çıkacaktır. Bu durumda frekans denklemi her iki ucu tam tutulu ile aynı olacak şekilde

$$\eta = \frac{n\pi}{L} \quad (3.68)$$

elde edilir.

4. BULGULAR

Bu tez çalışmasında bor nitrür nanotüplerin yerel olmayan elastisite teorisi ile aksenal serbest titreşim analizi yapılmıştır. Serbest titreşim analizlerine dair sayısal sonuçlar bu bölümde sunulacak olup tartışılacaktır. Tartışma neticesinde varılan sonuçlardan bir sonraki bölümde bahsedilecektir.

Mekanik analizlerde kullanılan mekanik ve geometrik özellikler Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Serbest titreşim analizinde kullanılan parametreler

<i>Geometrik özellikler</i>	
Çubuk uzunluğu, L	10 – 50 nm
Dairesel kesit çapı, d	5 nm
Atomik parametre, e_0a	0 – 25 nm
Boyutsuz Atomik parametre, e_0a/L	0 – 0.5
<i>Mekanik özellikler</i>	
Birim hacim ağırlığı, ρ	2.1 kg/m^3 (Anonymous 3)
Elastisite modülü, E	1.22 TPa (Nasreen ve Zettl 1998)

Çizelge 4.2.'de farklı sınır şartlı çubuklara ait boyutsuz frekans değerleri ϖ_i sunulmuştur. Boyutsuz frekanslar

$$\varpi_i = \omega_i L \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (4.1)$$

değerine göre sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Çeşitli sınır şartlardaki aksenal nanoçubukların aksenal titreşimi için ilk beş mod boyutsuz frekans değeri

Sınır Şart	Mod	e_0a/L					
		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
C – C	ϖ_1	3.1416	2.9972	2.6601	2.2862	1.9562	1.6871
	ϖ_2	6.2832	5.3202	3.9124	2.9446	2.3229	1.9058
	ϖ_3	9.4248	6.8587	4.4169	3.1426	2.4164	1.9564
	ϖ_4	12.5664	7.8248	4.6458	3.2219	2.4519	1.9751
	ϖ_5	15.7080	8.4356	4.7645	3.2607	2.4689	1.9840
C – F	ϖ_1	1.5708	1.5518	1.4986	1.4209	1.3300	1.2353
	ϖ_2	4.7124	4.2628	3.4293	2.7213	2.2085	1.8411
	ϖ_3	7.8540	6.1767	4.2178	3.0684	2.3822	1.9381
	ϖ_4	10.9956	7.3981	4.5515	3.1900	2.4378	1.9677
	ϖ_5	14.1372	8.1640	4.7139	3.2444	2.4618	1.9803
F – F	ϖ_1	3.1416	2.9972	2.6601	2.2862	1.9562	1.6871
	ϖ_2	6.2832	5.3202	3.9124	2.9446	2.3229	1.9058
	ϖ_3	9.4248	6.8587	4.4169	3.1426	2.4164	1.9564
	ϖ_4	12.5664	7.8248	4.6458	3.2219	2.4519	1.9751
	ϖ_5	15.7080	8.4356	4.7645	3.2607	2.4689	1.9840

Frekans değerleri incelendiği zaman C – C ve C – F çubuğunun titreşim frekansları her modda F – F ve çubuğundan yüksektir. Düşük modlarda C – C çubuğunun frekansları ile C – F çubuğunun frekansları arasındaki makas daha genişken mod sayısı yükseldikçe makas daralır.

Atomik etkinin yorumlanmasına gelince, boyutsuz atomik parametre değeri yükseldikçe titreşim frekansları düşmektedir. Atomik parametre 0 olunca çözümümüz klasik elastisite teorisine döner. Atomik parametre yükseldikçe C – C çubuğunun titreşim frekansları daha fazla düşerken C – F çubuğunun titreşim frekanslarındaki düşüş daha azdır. Atomik parametre yükseldikçe bütün çubuklar için mod frekansları birbirine yaklaşmaktadır.

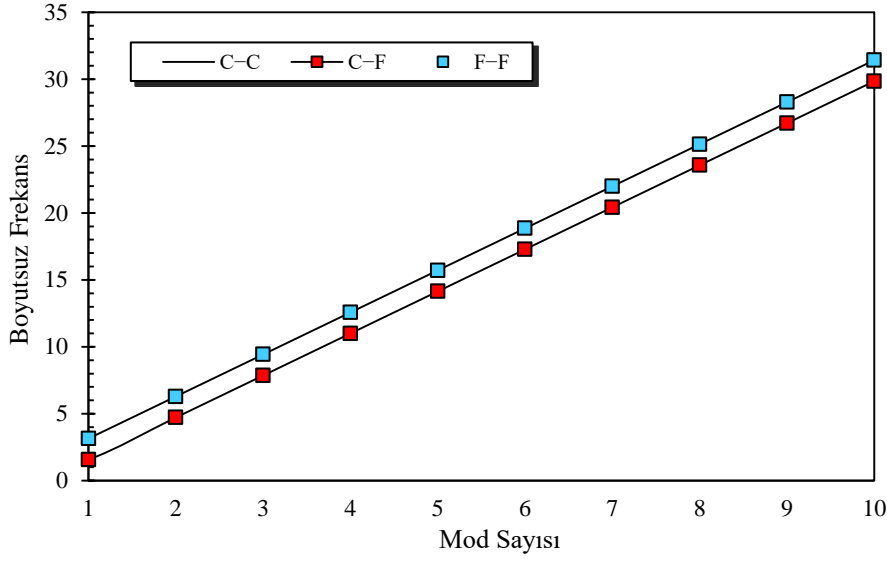
Çizelge 4.3. Bor nitür nanotüplerin her iki ucu tutulu aksenal kiriş modelinin farklı boyutsuz atomik uzunluk ve kiriş uzunluğu değerlerine göre temel mod frekans değerleri (THz)

Mod	Yerel olmayan ifade	Eksenel nanokiriş uzunluğu				
		$L = 10 \text{ nm}$	$L = 20 \text{ nm}$	$L = 30 \text{ nm}$	$L = 40 \text{ nm}$	$L = 50 \text{ nm}$
ω_1	$e_0a/L = 0.0$	1.2051	0.6026	0.4017	0.3013	0.2410
	$e_0a/L = 0.2$	1.0204	0.5102	0.3401	0.2551	0.2041
	$e_0a/L = 0.4$	0.7504	0.3752	0.2501	0.1876	0.1501
	$e_0a/L = 0.6$	0.5648	0.2824	0.1883	0.1412	0.1130
ω_2	$e_0a/L = 0.0$	2.4103	1.2051	0.8034	0.6026	0.4821
	$e_0a/L = 0.2$	1.5008	0.7504	0.5003	0.3752	0.3002
	$e_0a/L = 0.4$	0.8911	0.4455	0.2970	0.2228	0.1782
	$e_0a/L = 0.6$	0.6180	0.3090	0.2060	0.1544	0.1236
ω_3	$e_0a/L = 0.0$	3.6154	1.8077	1.2051	0.9039	0.7231
	$e_0a/L = 0.2$	1.6944	0.8472	0.5648	0.4236	0.3389
	$e_0a/L = 0.4$	0.9270	0.4635	0.3090	0.2317	0.1854
	$e_0a/L = 0.6$	0.6296	0.3148	0.2060	0.1574	0.1259

Çizelge 4.4. Bor nitür nanotüplerin bir ucu tutulu ve diğer ucu serbest aksenal kiriş modelinin farklı boyutsuz atomik uzunluk ve kiriş uzunluğu değerlerine göre temel mod frekans değerleri (THz)

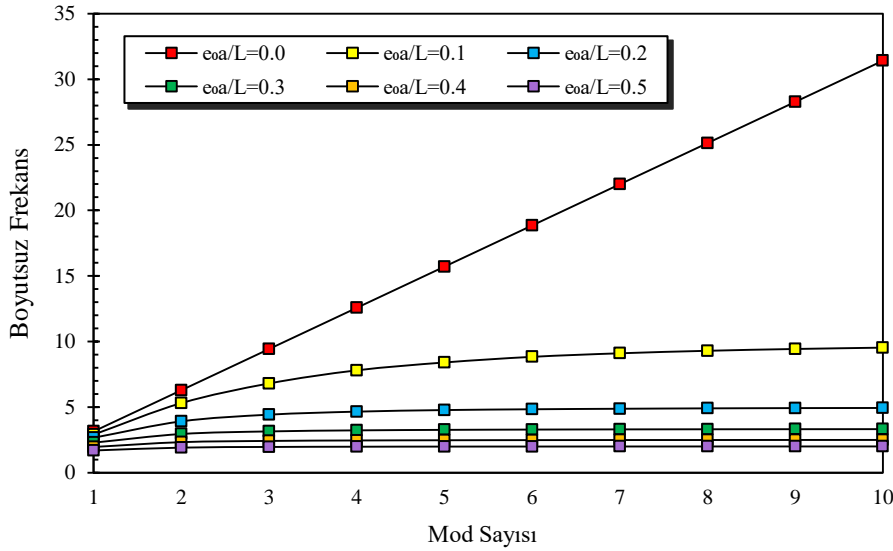
Mod	Yerel olmayan ifade	Eksenel nanokiriş uzunluğu				
		$L = 10 \text{ nm}$	$L = 20 \text{ nm}$	$L = 30 \text{ nm}$	$L = 40 \text{ nm}$	$L = 50 \text{ nm}$
ω_1	$e_0a/L = 0.0$	0.6026	0.3013	0.2009	0.1506	0.1205
	$e_0a/L = 0.2$	0.5749	0.2874	0.1916	0.1437	0.1150
	$e_0a/L = 0.4$	0.5102	0.2551	0.1701	0.1276	0.1020
	$e_0a/L = 0.6$	0.4385	0.2193	0.2009	0.1096	0.0877
ω_2	$e_0a/L = 0.0$	1.8077	0.9039	0.6026	0.4519	0.3615
	$e_0a/L = 0.2$	1.3155	0.6578	0.4385	0.3289	0.2631
	$e_0a/L = 0.4$	0.8472	0.4236	0.2824	0.2118	0.1694
	$e_0a/L = 0.6$	0.6028	0.3014	0.2085	0.1507	0.1206
ω_3	$e_0a/L = 0.0$	3.0129	1.5064	1.0043	0.7532	0.6026
	$e_0a/L = 0.2$	1.6180	0.8090	0.5393	0.4045	0.3236
	$e_0a/L = 0.4$	0.9139	0.4569	0.3046	0.2285	0.1828
	$e_0a/L = 0.6$	0.6254	0.3127	0.1096	0.1564	0.1251

Çizelge 4.3. ve Çizelge 4.4. sonuçlarına bakıldığı zaman kiriş uzunluğu arttıkça frekanslar iki mesnetlenme tipinde de düşmüştür. Bu çizelgeler asıl olarak, boyut etkisinin eleman uzunluğu üzerindeki etkisini incelemek için sunulmuştur. Sonuçlar incelendiği zaman varmış olduğumuz en önemli sonuç, eleman uzunluğu arttıkça boyut etkisinin önemi yani frekansı düşürücü etkisi azalır. Tersine de doğrudur yani atomik parametre düşük uzunluklarda daha etkilidir.



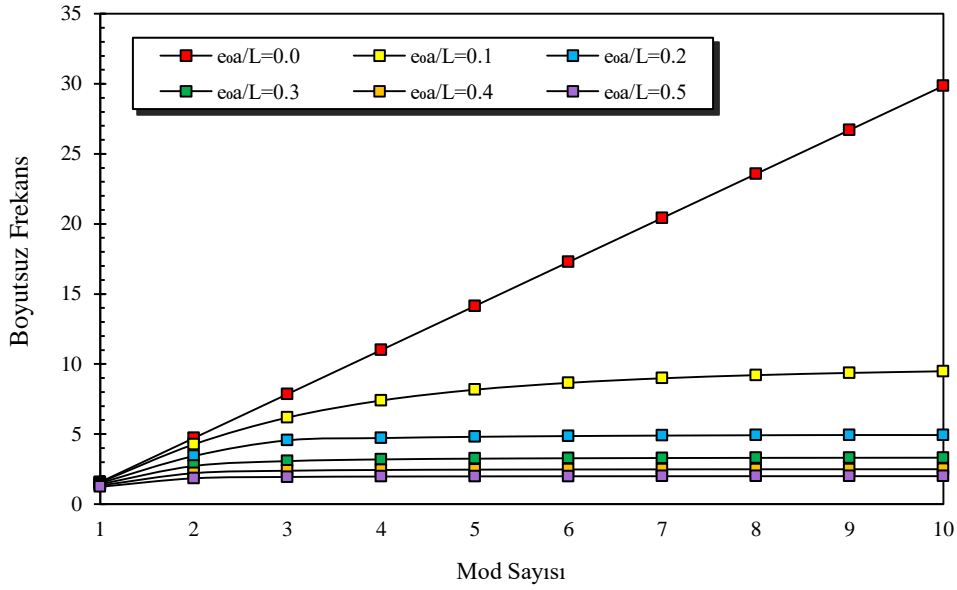
Şekil 4.1. Farklı mesnet koşullarındaki eksenel nanokirişlerin boyutsuz titreşim frekanslarının mod sayısına göre değişimi ($e_0a/L = 0.0$)

Şekil 4.1.'de farklı tutululuk hallerindeki eksenel nanokirişler için boyutsuz frekansların mod sayısı ile ilişkisi verilmiştir. Boyutsuz atomik parametre $e_0a/L = 0.0$ alındığı için analizler elastisite teorisine göre yapılmıştır. Buna göre mod sayısı arttıkça frekans değerleri artmakta olup her mod değerinde her iki ucu tam tutulu çubuklar bir ucu tutulu ve diğer ucu boş çubuktan daha yüksek boyutsuz frekans değerlerine sahiptir.



(a)

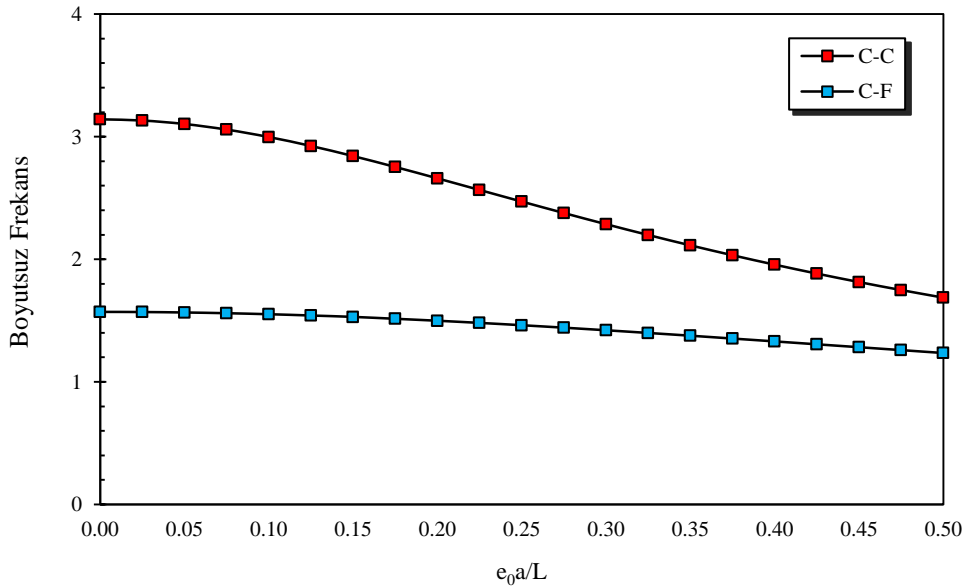
Şekil 4.2. Eksenel nanokirişlerin klasik ve yerel olmayan boyutsuz titreşim frekanslarının mod sayısına göre değişimi a) C - C



(b)

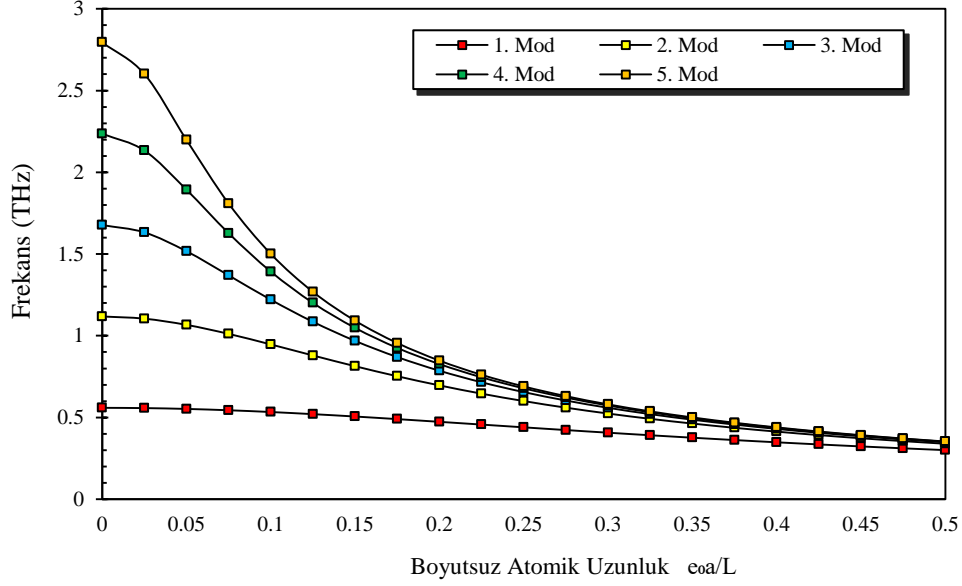
Şekil 4.2. Eksenel nanokirişlerin klasik ve yerel olmayan boyutsuz titreşim frekanslarının mod sayısına göre değişimi **b) C – F**

Şekil 4.1.'de farklı tutululuk hallerindeki eksenel nanokirişler için boyutsuz frekansların mod sayısı ile ilişkisi verilmiştir. Boyutsuz atomik parametre $e_0a/L = 0.0$ alındığı için analizler elastisite teorisine göre yapılmıştır. Buna göre mod sayısı arttıkça frekans değerleri artmakta olup her mod değerinde her iki ucu tam tutulu çubuklar bir ucu tutulu ve diğer ucu boş çubuktan daha yüksek boyutsuz frekans değerlerine sahiptir.

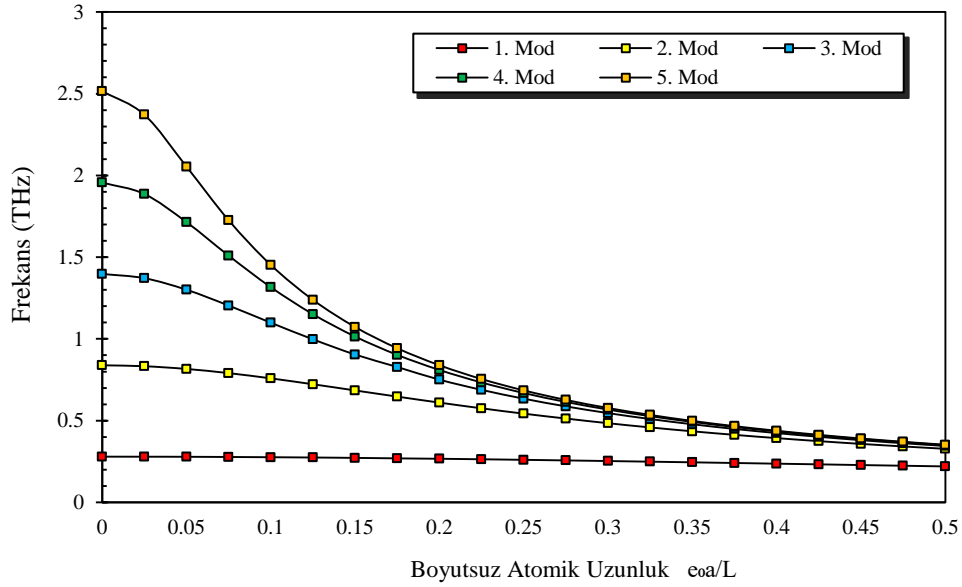


Şekil 4.3 Farklı mesnet koşullarındaki eksenel nanokirişlerin temel mod boyutsuz titreşim frekanslarının boyutsuz atomik parametreye göre değişimi

Şekil 4.3'te boyutsuz atomik uzunluğun farklı mesnet koşulu için temel mod frekanslarını nasıl etkilediği görülmektedir. Buna göre atomik parametrenin artışı her iki ucu tam tutulu çubukları daha fazla etkilemektedir.

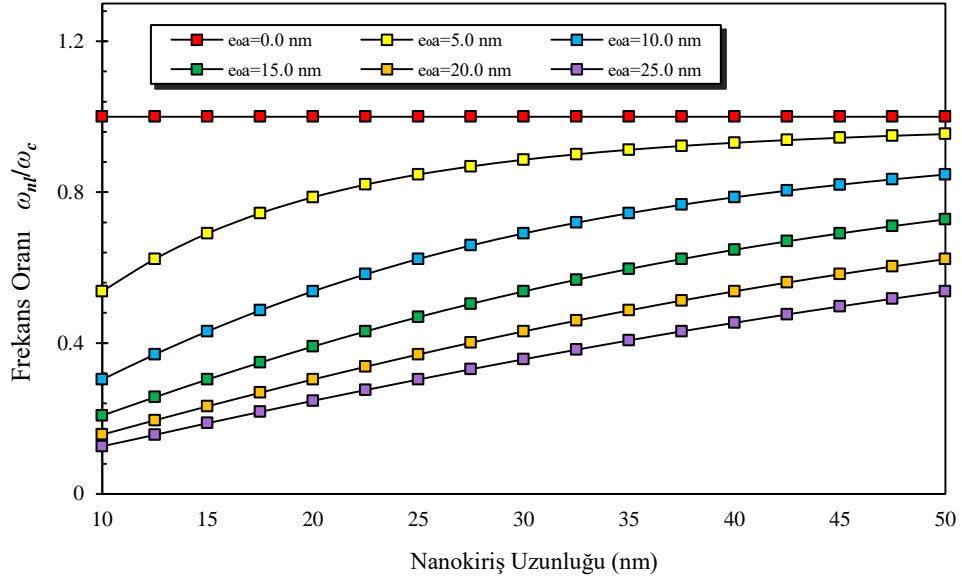


(a)

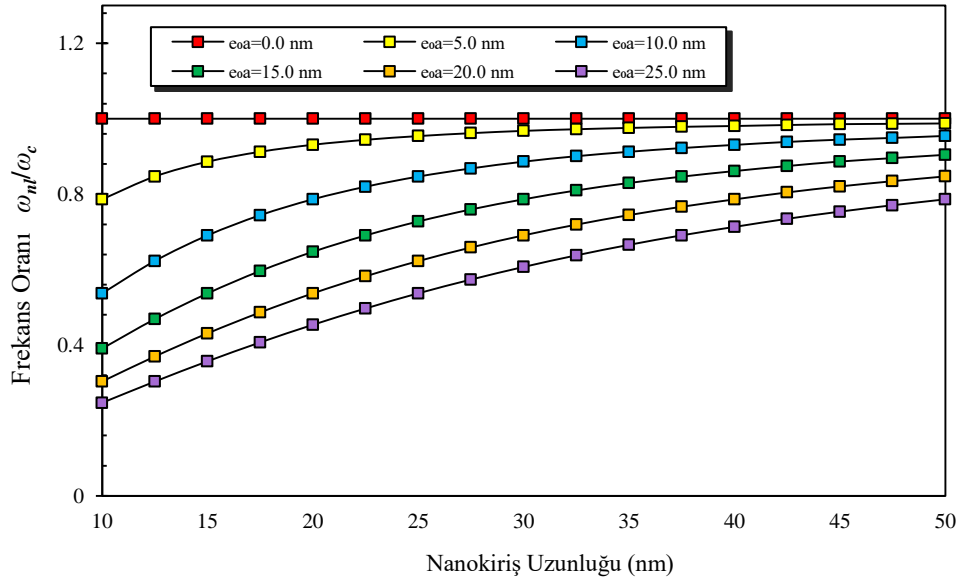


(b)

Şekil 4.4 Farklı mesnet koşullarındaki aksenal nanokirişlerin ilk beş mod boyutsuz titreşim frekanslarının boyutsuz atomik parametreye göre değişimi a) C – C b) C – F



(a)



(b)

Şekil 4.5 Farklı mesnet koşullarındaki aksenal nanokirişlerin temel modu için yerel olmayan frekanslarının yerel frekanslara oranının farklı atomik uzunluk değerleri için değişimi **a)** C – C **b)** C – F

Şekil 4.4.'te ise boyutsuz atomik uzunluğun artışına göre farklı modların frekanslarının değişimi her mesnet koşuluna göre ayrı grafiklerde sunulmuştur. Sonuçlar incelendiği zaman atomik parametre yüksek modlarda daha fazla etki göstermektedir yani burada bulunan sonuçlar Şekil 4.1. için yapılan yorumları desteklemektedir.

Son olarak Şekil 4.5. incelendiğinde farklı atomik uzunluklara göre, atomik etkili temel mod frekanslarının klasik temel mod frekanslarına oranlarının eleman uzunluğuna göre değişimi sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiği zaman, eleman uzunluğu arttıkça boyut etkisinin giderek azaldığı rahatlıkla vurgulanabilir. Yine atomik boyut etkisinin her iki ucu tam tutulu çubuğu bir ucu tam tutulu diğer ucu serbest çubuğa göre daha çok etkilediği sonucuna varılabilir.

5. SONUÇLAR

Teknolojinin gün geçtikçe ilerlemesiyle daha küçük daha hafif ve daha dayanımı yüksek malzemelerle çalışma gereksinimi duyulmaya başlanmıştır. En başta günümüzde kullandığımız telefon, bilgisayar, televizyon olmak üzere her şey küçülmekte ve tam tersine özellikleri güçlenmektedir. Doğru imalat yapılabilmesi için mekanik özelliklerini doğru analiz edilmesi en önemli faktördür. Bu küçük malzemelerle yapılan deneysel çalışmalardan ve atomik simülasyon modeller malzeme boyutu küçüldükçe farklı fiziksel özellik kazanabildiğini fark etmişlerdir. Bu nedenle sürekli ortam mekaniğinde çalışan araştırmacılar, atomlararası boyutları ile kendi boyutları karşılaştırılabilir boyutta olan bu malzemeler için klasik teorilerden farklı teoriler geliştirmişlerdir. Atomik kuvvet mikroskopunun keşfiyle, atomların yerleri değiştirilebildiğinden gün geçtikçe nanoteknolojide yerini bulabilecek çok çeşitli özelliklere sahip malzemeler de çıkmaya başlamıştır.

Bu tez çalışmasında aksenal çubuk gibi modellenebilen nano ölçekli yapıların yerel olmayan elastisite teorisine yani atomik boyut etkisine dayalı serbest aksenal titreşim analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları detaylı incelenmiştir ve bir takım genel sonuçlara varılmıştır. Bu sonuçlardan aşağıda bahsedilmiştir.

1. Her titreşim modunda C – C çubuğunun frekansları C – F çubuğundan yüksektir.
2. Atomik boyut etkisi titreşim frekanslarını azaltır ve C – C çubuğunu C – F çubuğuna göre her modda daha çok etkiler.
3. Mod sayısı arttıkça atomik boyut etkisinin frekansı düşürücü etkisi daha çok belirgin hale gelir.
4. Herhangi bir mesnet koşulunda ve herhangi bir mod sayısında, atomik parametre arttıkça frekans azalması azalarak gerçekleşir.
5. Nanokiriş uzunluğu arttıkça boyut etkisi giderek azalır ve sonuçlar üzerinde klasik elastisite teorisi geçerli olmaya başlar. Bu durum boyutları oldukça küçük nanoyapılar için önemli bir sonuçtur.

6. KAYNAKLAR

- Adhikari, S., Murmu, T. and McCarthy, M.A. 2014. Frequency domain analysis of Nonlocal rods embedded in an elastic medium. *Physica E*, 59: 33-40.
- Aydođdu, M. 2009. Axial vibration of the nanorods with the nonlocal continuum rod model. *Physica E*, 41(5): 861-864.
- Chen, Y. 2014. Nanotubes and Nanosheets. CRC Press, Boca Raton, 607 s.
- Chopra, N.G and Zettl, A. 1998. Measurement of the elastic modulus of a multiwalled boron nitride nanotube. *Solid State Communications*, 105(5): 297-300.
- Ciofani, G. and Mattoli, V. 2016. Boron Nitride Nanotubes in Nanomedicine. Elsevier, 228 s.
- Civalek, Ö. and Demir, Ç. 2011. Bending analysis of microtubules using Nonlocal Euler–Bernoulli beam theory. *Applied Mathematical Modelling*, 35(5): 2053-2067.
- Civalek, Ö. and Akgöz, B. 2010. Free vibration analysis of Microtubules as Cytoskeleton Components: Nonlocal Euler-Bernoulli Beam Modeling. *Scientia Iranica*, 17(5): 367-375.
- Çıracı, S. 2005. Nanoteknolojide yeni ufuklar, *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- Eringen, A.C. 1972a. Nonlocal polar elastic continua. *International Journal of Engineering Science*. 10(1): 1-16.
- Eringen, A.C. 1972b. On nonlocal elasticity. *International Journal of Engineering Science*. 10(3): 233-248.
- Eringen, A.C. 1983. On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves. *Journal of Applied Physics*, 54: 4703-4710.
- Erkoç, Ş. 2001. Karbon nano yapılar, *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- Gümüş, F. 2015. Nano Malzeme Nedir?. <https://www.muhendisbeyinler.net/nano-malzeme-nedir/> [Son erişim tarihi: 10.02.2017].
- Işık, Ç. 2011. Nano ve mikro yapıların yerel olmayan elastisite teorisi ile eğilme ve titreşim hesabı. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, 143s.
- Karaođlu, P. 2011. Karbon nanotüplerin sürekli ortam kiriş modelleri ile titreşim analizi. Yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi, 50 s.
- Karlicic, D., Murmu, T., Adhikari, S. and McCarthy, M. 2016. Non–local Structural Mechanics. Iste – Wiley, 354 s.

- Kösegil Toksöz, A. 2010. Yerel olmayan elastisite teorisinde Açık ve Ritz yöntemlerinin nanoteknolojiye uygulanması. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 134s.
- Kutucu, B. 2010. Nanoteknoloji ve çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 84 s.
- Li, C., 2014. Torsional vibration of carbon nanotubes: Comparison of two nonlocal models and a semi-continuum model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 82: 25-31.
- Li, Y.S., Ma, P. and Wang, W. 2015. Bending, buckling, and free vibration of magneto-electroelastic nanobeam based on nonlocal theory. *Journal of Intelligent Material Systems*, 27(9): 1-11.
- Numanoğlu, H.M. 2017. Nanoyapıların kiriş ve çubuk modelinin yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak titreşim analizi. Bitirme Tezi, Akdeniz Üniversitesi, (yayınlanmamış), 172s.
- Pakdel, A., Zhi, C., Bando Y. and Golberg, D. 2012. Low-dimensional boron nitride nanomaterials. *Materials Today*, 15(6): 256-265.
- Rawat, R.S. 2015. Dense plasma focus – from alternative fusion source to versatile high energy density plasma source for plasma nanotechnology. *Journal of Physics Conference Series*, 591: 012021.
- Reddy, J.N. 2007. Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams. *International Journal of Engineering Science*, 45(2-8): 288-307.
- Seçgin, S. 2010. Karbon nanotüplerin çökme davranışlarının sürekli ortam kiriş modelleri kullanılarak incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi, 51 s.
- Tepe, A. 2007. Nanoteknolojide nano ölçekteki yapıların yerel olmayan elastisite çerçevesinde incelenmesi. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 99 s.
- Thai, H.T. 2012. A nonlocal beam theory for bending, buckling and vibration of nanobeams. *International Journal of Engineering Science*, 52: 56-64.
- Thai, S., Thai H.T., Vo, T.P. and Patel, V.I. 2018. A simple shear deformation theory for nonlocal beams. *Composite Structures*, 183: 262-270.
- Xu, X.J., Zheng, M.L. and Wang, X.C. 2017. On vibration of nonlocal rods: Boundary conditions, exact solutions and their asymptotics. *International Journal of Engineering Science*, 119: 217-231.
- Yap, Y.K. 2009. B-C-N Nanotubes and Related Nanostructures. Springer, 299 s.
- Zhi, C., Bando, Y., Tan, C. and Golberg, D. 2005. Effective precursor for high yield synthesis of pure BN nanotubes. *Solid State Communications*, 135(1): 67-70.

Anonim 1: Bor nitrür nanotüp kompozitler karbon nanotüplerden daha iyi performans gösteriyor. <https://www.kimyahaberleri.com/bor-nitrur-nanotup-kompozitler-karbon-nanotuplerden-daha-iyi-performans-gosteriyor/> [Son erişim tarihi: 10.05.2017].

Anonim 2: Kompozit Malzemelerde Bor Nitrür Kullanımı. <https://malzemebilimi.net/kompozit-malzemelerde-bor-nitrur-kullanimi.html> [Son erişim tarihi: 10.05.2017].

Anonymous 1: Des molécules de fullerènes découvertes dans l'espace. <https://archipeldessciences.wordpress.com/2012/02/24/des-molecules-de-fullerenes-decouvertes-dans-lespace/> [Son erişim tarihi: 14.05.2017].

Anonymous 2: <https://www.sciencephoto.com/media/775019/view/ibm-atom-manipulation-demonstration-1989> [Son erişim tarihi: 14.05.2017].

Anonymous 3: Boron Nitride. https://en.wikipedia.org/wiki/Boron_nitride [Son erişim tarihi: 25.05.2017].

ÖZGEÇMİŞ

UĞUR UYAN

uuruyan@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2016 – 2018	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2011 – 2015	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Teknik Ofis Mühendisi	
2016 – Devam Ediyor	3. Havalimanı İnşaatı, İstanbul