T. C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜPLERİN SÜREKLİ ORTAM KİRİŞ MODELLERİ İLE TİTREŞİM ANALİZİ

Pınar KARAOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Metin AYDOĞDU
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

EDİRNE-2011

T. C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜPLERİN SÜREKLİ ORTAM KİRİŞ MODELLERİ İLE TİTREŞİM ANALİZİ

Pınar KARAOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
TEZ DANIŞMANI: Doç. Dr. Metin AYDOĞDU

2011
EDİRNE

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜPLERİN SÜREKLİ ORTAM KİRİŞ MODELLERİ İLE TİTREŞİM ANALİZİ

Pınar KARAOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Bu tez 4./4./2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından kabul edilmiştir.

Doç.Dr.Metin AYDOĞDU	Yrd.Doç.Dr.Vedat TAŞKIN	Yrd.Doç.Dr.Bahar UYMAZ
Danışman	Jüri Üyesi	Jüri Üyesi

İÇİNDEKİLER

Önsöz i
Özet ii
Abstract iii
Şekil Listesi iv
Çizelge Listesi vi
Simgeler Dizini vii
Kısaltmalar ix

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Problem ve Önemi 1
1.2. Önceki Çalışmalar 2
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 3

BÖLÜM 2. NANOTEKNOLOJİ VE NANOYAPILAR

2.1. Giriş 4
2.2. Nanoteknoloji 4
2.3. Karbon Nanoyapılar 6
2.3.1 Karbon nanotoplar 7
2.3.2. Karbon nanotüpler 8
2.4 Karbon nanotüpleri elde etme yöntemleri 10
2.4.1. Ark buharlaştırma yöntemi 10
2.4.2. Lazer buharlaştırma yöntemi 10
2.4.3. Mekanik öğütme 11
2.4.4. Diğer yöntemler 11
2.5. Karbon nanotüplerin çeşitleri 12
2.5.1. Tek duvarlı karbon nanotüp 12
2.5.2. Çok duvarlı karbon nanotüp 14
2.5.3. Karbon nanoçubuklar 16

BÖLÜM 3. TEK DUVARLI KARBON NANOTÜPLERİN TİTREŞİMİ VE KİRİŞ MODELLERİ

3.1. Giriş 17
3.2. N Duvarlı Karbon Nanotüpler İçin Hareket Denklemleri 17
3.3. Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerin Titreşim Analizi 19
3.4. Sonlu Farklar Yöntemi 21

BÖLÜM 4. ÇİFT DUVARLI KARBON NANOTÜPLERİN TİTREŞİM ANALİZİ

4.1. Giriş 24
4.2. Çift Duvarlı Karbon Nanotüpler 24
4.3. Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Navier Tipi Yöntemle Titreşim Analizi 25
4.4. Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Sonlu Farklar Yöntemiyle Titreşim Analizi 26
4.4.1. Uçları basit destekli olan çift duvarlı karbon nanotüpün n=4 için titreşim analizi 26
4.4.2. Uçları basit destekli olan çift duvarlı karbon nanotüpün n=12 için titreşim analizi 30
4.4.3. Uçları ankastre destekli olan çift duvarlı karbon nanotüpün n=4 için titreşim analizi 33
4.4.4. Uçları ankastre olan çift duvarlı karbon nanotüpün n=12 için titreşim analizi 35
4.5. Sayısal Sonuçlar ve Yorum 37
4.5.1. İç tüp ve dış tüpün değişik sınır şartlarındaki sayısal sonuçları 38

BÖLÜM 5. SONUÇLAR 43
KAYNAKLAR 49
ÖZGEÇMİŞ 51

ÖNSÖZ

Çalışmalarımda, desteğini ve emeğini sonuna kadar yılmadan ortaya koyan, güler yüzüyle ve sonsuz yardım etme isteğiyle çalışmalarımızı daha kolay hale getiren, değerli hocam Doç. Dr. Metin AYDOĞDU'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez jüri üyelerim Y.Doç.Dr.Vedat TAŞKIN ve Y.Doç.Dr. Bahar UYMAZ' a tezin düzeltilmesi konusundaki değerli katkıları için teşekkür ederim.

Bu çalışmayı hazırlamamda tüm özverisi ile desteğini hiç eksik etmeyen değerli arkadaşım Öğr. Grv.Seçkin FİLİZ'e teşekkür ediyorum.

Manevi destekleriyle bana güç veren değerli arkadaşım Seçil SEÇGİN' e teşekkür ederim.

Maddi, manevi desteklerini benden bir an olsun esirgemeyen, emeklerini hiçbir zaman ödeyemeyeceğim, canım aileme teşekkür ederim.

ÖZET

Bu çalışmada çok duvarlı karbon nanotüplerin titreşim davranışları sürekli ortam kiriş modelleri kullanılarak incelenmektedir. Klasik Euler Bernoulli kiriş teorisi N-duvarlı karbon nanotüplerin titreşimi için formüle edilmiştir. Tek duvarlı karbon nanotüplerin düşey doğrultudaki titreşimleri analitik olarak, basit destekli çok duvarlı tüplerin titreşimi ise Navier Tipi Çözüm Yöntemiyle incelenmiştir. Genel sınır şartlarındaki çok duvarlı karbon nanotüpler için bir Sonlu Farklar formülasyonu geliştirilmiştir. Genel formülasyon kullanılarak farklı sınır şartları ve geometrik parametreler için tek ve iki duvarlı karbon nanotüplerin titreşim davranışı incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Titreşim, Çift Duvarlı Karbon Nanotüpler, Euler Bernoulli Kiriş Modeli, Karbon Nanotüpler, Sonlu Farklar Metodu, Titreşim.

ABSTRACT

In this study, vibration of multi-walled carbon nanotubes is studied using continuum beam models. Classical Euler-Bernoulli beam theory is formulated for vibration of N-walled Carbon Nanotubes. The vibration of singlewalled Carbon Nanotubes is investigated analytically. Navier Type Solution method is used for the vibration of multiwalled simply supported Carbon Nanotubes. A Finite Difference method is developed for the multiwalled Carbon Nanotubes with general boundary conditions. After general formulation, the vibration of single and double-walled Carbon Nanotubes with different boundary conditions is investigated parametrically.

Keywords: Double Walled Carbon Nanotubes, Euler-Bernoulli Beam Theory, Carbon Nanotubes, Finite Difference Method, Vibration.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Grafin tabakası 8

Şekil 2.2. Karbon nanotüp 8

Şekil 2.3. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler 12

Şekil 2.4. Tek duvarlı karbon nanotüplerin geometrik modellerinin oluşumu 13

Şekil 2.5. Tek duvarlı karbon nanotüplerin geometrik modelleri 14

Şekil 2.6. Çok duvarlı karbon nanotüp modelleri 16

Şekil 2.7. Nanoçubuk modeli 17

Şekil 3.1 Karbon nanotüplerin sürekli ortam şeklinde temsili 19

Şekil 3.2. Yayılı yüklü bir karbon nanotüp 20

Şekil 3.3. Sonlu farklar yönteminde tanımlanan bir v=f(x) fonksiyonu 22

Şekil 3.4. Sınır şartlarının şematik gösterimi 25

Şekil 4.1. Çift duvarlı karbon nanotüpün şematik gösterimi 28

Şekil 4.2. 4 Parçaya ayrılmış her bir ucu basit destekli olan çift duvarlı karbon nanotüpün şematik gösterimi. 28

Şekil 4.3. 4 Parçaya ayrılmış iki nanotüpün etkileşiminin şematik gösterimi 28

Şekil 4.4. 4 Parçaya ayrılmış içteki nanotüpün şematik gösterimi 29

Şekil 4.5. İç tüpün 4 parçaya ayrılmış basit destekli halindeki düğüm noktalarının görünümü 29

Şekil 4.6. Dış tüpün 4 parçaya ayrılmış basit destekli halindeki düğüm noktalarının görünümü. 30

Şekil 4.7. İç tüpün 4 parçaya ayrılmış ankastre destekli halindeki düğüm noktalarının görünümü 34

Şekil 4.8. Çift duvarlı bir karbon nanotüpün kesit geometrisi 38

Şekil 4.9. Boyutsuz frekans parametresinin iç yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp Ankastre-Ankastre, dış tüp Ankastre-Ankastre) 42

Şekil 4.10. Boyutsuz frekans parametresinin iç yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp Ankastre-Ankastre, dış tüp Ankastre-Basit Mesnetli) 42

Şekil 4.11. Boyutsuz frekans parametresinin iç yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp Ankastre-Basit Mesnetli, dış tüp Ankastre-Basit Mesnetli) 43

Şekil 4.12. Boyutsuz frekans parametresinin iç yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp Ankastre-Ankastre, dış tüp Basit Mesnetli -Basit Mesnetli) 43

Şekil 4.13. Boyutsuz frekans parametresinin iç yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp Basit Mesnetli -Basit Mesnetli, dış tüp Basit Mesnetli -Basit Mesnetli) 44

Şekil 4.14. Boyutsuz frekans parametresinin iç yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp Basit Mesnetli -Basit Mesnetli, dış tüp Basit Mesnetli -Ankastre).... 44

Şekil 4.15. Boyutsuz frekans parametresinin iç yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp Basit Mesnetli -Basit Mesnetli, dış tüp Ankastre -Ankastre) 45

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1. Farklı sınır şartları için frekans denklemleri 20
Çizelge 3.2. Sonlu Farklar yöntemiyle sınır koşulları 23
Çizelge 4.1. B-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi……..……38
Çizelge 4.2. A-A sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi……..……38
Çizelge 4.3. A-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi……..……38
Çizelge 4.4. İç tüp B-B ve dış tüp B-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi 39
Çizelge 4.5. İç tüp A-A ve dış tüp A-A sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi 39
Çizelge 4.6. İç tüp A-B ve dış tüp A-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi 40
Çizelge 4.7. İç tüp A-A ve dış tüp B-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi 40
Çizelge 4.8. İç tüp A-A ve dış tüp A-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi 40
Çizelge 4.9. İç tüp B-B ve dış tüp A-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi 41
Çizelge 4.10. İç tüp B-B ve dış tüp A-A sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi 41
Çizelge 4.11. İç tüp A-A ve dış tüp BB sınır şartına sahip KNT'ler için Boıyutsuz Frekans Parametresinin c van der Waals Katsayısı ile değişimi……..46

SİMGELER DİZİNİ

E	Elastisite Modülü
I	Atalet Momenti
w	Çökme
ω	açısal frekans (rad/s)
L	Kirişin boyu
h	Adım uzunluğu
ε	Lineer genleme
c	van der Waals etkileşim katsayısı
w_{ij}	i:1 iken iç tüp, i:2 iken dış tüp j: düğüm noktası
a, b, c, d	Doğrusal(Lineer) fonksiyonun katsayıları
r_i	Karbon nanotüpün yarıçapları (i: 1, 2, 3, 4)
C_j (j:1,2,3,4)	Çubukta belirsiz katsayılar
Δ	Birinci ileri fark

∇	İkinci ileri fark
n	Parça sayısı
x	Boyuna Kartezyen eksen bileşeni

Kısaltmalar

A-A	Ankastre-Ankastre mesnet
A-B	Ankastre-Basit Destekli mesnet
B-A	Basit destekli-Ankastre mesnet
B-B	Basit Destekli-Basit Destekli mesnet
ÇDKNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
KNT	Karbon Nanotüp
TDKNT	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Tezin bu bölümü, üç kısımdan oluşmaktadır. 1.Kısım'da tezde incelenen problem ve önemi açıklanmakta, 2.Kısım'da konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar özetlenmektedir. 3.Kısım'da çalışmanın amacı ve kapsamı üzerinde durulmaktadır.

1.1.Problem ve Önemi

Bu çalışmada çok duvarlı karbon nanotüplerin (ÇDKNT), titreşim davranışı sürekli ortam kiriş modellerinden Euler-Bernoulli Kiriş Teorisi kullanılarak incelenecektir. Öncelikle N duvarlı karbon nanotüp (KNT) için hareket denklemleri elde edildikten sonra tek ve çift duvarlı KNT'ler için analitik çözümün mümkün olduğu durumlarda analitik çözüm kullanılacak aksi halde genel sınır şartları için sonlu farklar yöntemi kullanılacaktır.

KNT'lerin titreşim probleminin incelenmesi KNT'lerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde (Elastisite modülü gibi), osilatör ve algılayıcı gibi çeşitli elektro mekanik sistemlerin modellenmesinde ayrıca bazı üretim yöntemlerinde (nanokompozitlerin üretiminde ultrasonikation işleminde) kullanımları açısından önem arz etmektedir. Ayrıca KNT'ler kompozit malzemelerde katkı elemanı olarak kullanılmaktadır.

1.2. Önceki Çalışmalar

KNT lerin Iijima tarafından 1991'de keşfedilmesinin ardından, bu konuda yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmıştır. KNT'lerin üretimi, yapısı, mekanik ve elektronik özellikleri ve kullanım alanları bazı tarama makalelerinde detaylı olarak incelenmiştir (Thostenson ve ark., 2001, Delmotte ve ark., 2002, Belin ve ark., 2005).

Falvo ve ark., 1997, ÇDKNT'lerin atomik kuvvet mikroskobu ucu kullanılarak hasara uğramadan çok büyük oranlarda çökebildiğini göstermişlerdir.

Wong ve ark., 1997, atomik kuvvet mikroskobunu kullanarak silikon karbit nano çubukların ve ÇDKNT'lerin mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Yapılan ölçümler sonucunda, çok duvarlı tüplerin silikon karbit nanoçubukların 2 katı rijitliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Çökmenin devam ettirilmesi sonucunda silikon karbit nanoçubukların kırıldığı, buna karşılık ÇDKNT'lerin enteresan bir elastik burkulma gösterdikleri gözlenmiştir.

Harik, 2001, sürekli ortam kiriş modellerinin KNT'lerin burkulmasının modellenmesinde hangi şartlar altında kullanılabileceğini araştırmıştır.

Bu şartlar;

1. Homojenleştirme kriteri; L (uzunluk) /a (Karbon bağ uzunluğu) > 10
2. Boyut oranı; L /d < 1/10
3. Lineer genleme kriteri; $\varepsilon << 1$

şeklinde ifade edilmiştir.

KNT lerin titreşimlerinin sürekli ortam modelleri ile yapılan incelemelerinde kiriş, kabuk ve kafes sistem modelleri kullanılmıştır (Ru, 2000a, 2000b, Yoon ve ark., 2002, 2003a,2003b, 2004, 2005, Aydogdu ve Ece 2007, Aydogdu 2008a, 2008b, Aydogdu ve ark, 2008c, Wang ve ark., 2005). Yoon ve ark. Klasik kiriş teorilerini kullanarak KNT lerin titreşim, dalga yayılması ve akışkan ileten KNT lerin davranışlarını kiriş modellerini kullanarak incelemişlerdir. Aydogdu, 2008 yüksek mertebe teorilerden olan Reddy kiriş teorisi ile çok duvarlı KNT lerin titreşimini basit destekli sınır şartları için incelemiştir. Wang ve Varadan, 2005 çok duvarlı KNT lerin titreşimlerini Timoshenko

kiriş teorisini kullanarak incelemişlerdir. İnceleme farklı sınır şartları için yapılmıştır. KNT lerin incelenmesinde kabuk modellerini kullanan çalışmalar için He ve ark., 2006 ve Wang ve ark.2005 çalışmaları örnek olarak gösterilebilir. Karbon nanotüplerin ve kompozitlerinin titreşimleri Gibson ve ark, 2007 tarafından yazılan tarama makalesinde özetlenmiştir. Kafes modelleri Li ve Chou,2004 tarafından KNT lerin statik ve dinamik davranışlarının incelenmesinde kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda genellikle analitik çözüme fırsat veren basit mesnetli KNT lerin titreşim problemi çalışılmıştır. Literatür incelendiğinde ÇDKNT lerin titreşimleri üzerine yapılan genel bir formülasyon mevcut değildir. Sonlu farklar yöntemi KNT lerin incelenmesinde kullanılmamıştır. Bu çalışmanın temel amacı literatürdeki bu boşluğu doldurmaktır.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Son yıllarda nanoteknoloji alanında ve özellikle KNT'ler konusunda yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. KNT'lerin burkulma ve titreşim problemleri ile ilgili sürekli ortam ve moleküler dinamik modelleme ile ilgili pek çok çalışma olmasına rağmen sürekli ortam modelleri genelde basit destekli sınır şartları ile sınırlandırılmıştır. Bu çalışmanın amacı, bu boşluğu doldurmak amacıyla sürekli ortam kiriş modelleri ile KNT'lerin titreşim problemini genel sınır şartlarında incelemektir.

Çalışmanın içeriği yukarıda belirlenen amaca ulaşmak maksadıyla aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

Öncelikle KNT'ler arası van der Waals kuvvetleri dikkate alınarak n duvarlı tüpler için hareket denklemleri elde edilmiştir. Ardından, tek ve çok duvarlı tüplerin titreşim davranışı farklı sınır şartları için incelenmiştir. Sonuçlar tablo ve grafikler halinde elde edilerek yorumlanmıştır. Bu çözümler sırasında basit destekli KNT'ler için analitik Navier tipi çözüm yöntemi kullanılmış, analitik çözümü mümkün olmayan genel sınır şartları için Sonlu Farklar Yönteminden yararlanılmıştır.

BÖLÜM 2

NANOTEKNOLOJİ VE KARBON NANOYAPILAR

2.1. Giriş

Tezin bu bölümünde, teknolojiyi nano boyuta taşıyan nanoteknoloji ve bu teknolojide geniş bir uygulama alanı bulan karbon nano yapılar tanımlanmaktadır. Teknolojinin neden nano boyuta inmeye ihtiyaç duyduğu ve bunun ne gibi getirilerinin olabileceği açıklanmaya çalışılmıştır. Nanoteknolojinin tarihsel gelişimi, bu gelişime katkı sağlayan bilimsel atılımlar sırası ile verilmiştir.

Karbon elementinin nanoteknolojideki önemi açıklanarak karbon nanoyapılar ayrı ayrı incelenmiştir. Bu yapılar arasında en büyük ilgiyi gören karbon nano tüpler, kullanım alanları, üretim yöntemleri ve çeşitleri ile birlikte açıklanmıştır.

2.2. Nanoteknoloji

Nano Teknolojisi aşırı küçük yapısal maddelerin üretimi, araştırılması ve bunlardan yararlanmanın teknikleri üzerinde çalışır. “Nano” sözcüğü Yunancadan alınmıştır ve “Cüce” anlamına da gelmektedir. Bir Nanometre (nm = Metrenin Milyarda Biri) bir milimetrenin milyonda biri kadar bir uzunluktur ve yaklaşık olarak bir insan saç telinin on binde biri kadar bir kalınlığa tekabül eder. Bu uzunluk terimi atom ve moleküllerin içindeki en küçük mesafeleri tanımlamak için kullanılır. Dört ila altı atom yan yana sıraladığında bu uzunluğa eşit bir uzunluk meydana getirirler. Nano mertebesindeki parçacıklar (Nano parçacıkları) veya polimerler (100 nm ‘den

küçüktürler) bu teknolojinin yapı taşlarını teşkil ederler. Atomsal düzeydeki malzemelerin amaca yönelik yapılandırılmalarında ve bu kadar küçük boyuttaki özel görüngülerden yararlanma birçok alanda yeni imkânların doğmasına yol açmıştır. Bu alanlardan bazıları şunlardır: Enerji, çevre tekniği, Bilişim Teknolojileri, Tıp, Eczacılık vs. Atomsal düzeyde kimya, biyoloji ve fizik arasında sınır yoktur (**http://nanoteknolojinedir.com/?p=16).**

Nanoteknoloji vizyonunun ortaya çıkışını, 1959 yılında fizikçi Richard Feynman'ın malzeme ve cihazların moleküler boyutlarda üretilmesi ile başarılabilecekler üzerine yapmış olduğu ünlü konuşmasına kadar dayandırabiliriz, (There is Plenty of Room at the Bottom). Bu konuşmasında Feynman minyatürize edilmiş enstrümanlar ile nano yapıların ölçülebileceği ve yeni amaçlar doğrultusunda kullanılabileceğinin altını çizmiştir.

Araştırmacıların daha küçük boyutlarda çalışmaya başlamasıyla birlikte bir çok problem de ortaya çıkmaya başlamıştır. Boyutlar küçüldükçe, yapılan çalışmaları izlemek zorlaşmıştır. 1981 yılında IBM tarafından yeni bir mikroskop türü Taramalı tünelleme mikroskobu, Scanning Tunneling Microspcope (STM) geliştirildi. Bu önemli ilerlemede pay sahibi olan araştırmacılar bu buluşları ile 1986'da Nobel Fizik ödülünü aldılar. Aynı zamanlarda STM mikroskopunun bir türevi olan Atomic Force Microscope (AFM) geliştirildi. Feynman'ın bahsetmiş olduğu enstrümanların (scanning electron microscope, atomic force microscope, near field microscope vb.) 1980'lerde geliştirilmesi ve eşzamanlı olarak gelişen bilgisayar kapasiteleri ile nano skalasında ölçüm ve modelleme yapılması mümkün olmuştur.

1990'ların başında Rice Üniversitesinde Richard Smalley öncülüğündeki araştırmacılar 60 karbon atomunun simetrik biçimde sıralanmasıyla elde edilen futbol topu şeklindeki fullerene molekülleri geliştirildi. Elde edilen molekül 1 nanometre büyüklüğünde ve çelikten daha güçlü, plastikten daha hafif, elektrik ve ısı geçirgen bir yapıya sahipti. Bu araştırmacılar 1996 yılında Nobel Kimya ödülünü aldılar. 1991 yılında Japon NEC firması araştırmacılarından birinin, Sumio Iijima'nın, karbon nano tüpleri bulduğunu duyurdu. Karbon nano tüpler, fullerene molekülünün esnetilmiş bir şekli olup benzer şekilde önemli özelliklere sahipti; çelikten 100 kat daha güçlü ve ağırlığı çeliğin ağırlığının 6'da 1'i kadardı.

90'larda ayrıca Feynman'in fikirleri Eric Drexler tarafından yazılan kitapta (Engines of Creation) geliştirildi. Drexler'ın fikirleri şüpheyle karşılanmasına karşın 1992 yılında yayınlamış olduğu kitabında (Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation) genel kavram ve düşüncelerini detaylı analiz ve tasarımlar ile ayrıntılı olarak anlatmıştır.

1999 yılında ABD'de Bill Clinton hükümeti nanoteknoloji alanında yürütülen araştırma, geliştirme ve ticarileştirme faaliyetlerinin hızını arttırma amacını taşıyan ilk resmi hükümet programını, Ulusal Nanoteknoloji Adımını (National Nanotechnology Initiative) başlattı. 2001 yılında Avrupa Birliği, Çerçeve Programına Nanoteknoloji çalışmalarını öncelikli alan olarak dahil etti. Japonya, Tayvan, Singapur, Çin, İsrail ve İsviçre benzer programlar başlatarak 21. yüzyılın ilk küresel teknoloji yarışında önlerde yer almak için çalışmalarına hız verdi (http://www.nanoturk.com/NT_tarihi.htm).

2.3. Karbon Nanoyapılar

Nanoteknoloji çağının başlamasında en önemli rolü karbon nano yapılar oynar. Bu nano yapılarda karbon elementi önemli bir yere sahiptir. Çünkü karbon atomları karmaşık, uzun zincirli moleküller oluşturacak biçimde birbirlerine bağlanabilir ve bunu yaparken her bir karbon atomunun, kendisine başka atomlarında bağlanmasına izin verecek şekilde boş yeri kalır. Bu özellik tüm elementler arasında karbona özgü karakteristik bir özelliktir.

Karbon, üç boyutlu (3B) yarıiletken elmas yapıdan, iki boyutlu (2B) yarı metalik grafite, bir boyutlu (lB) iletken ve yarıiletken nanotüplere ve sıfır boyutlu (OB) nanotoplara kadar farklı kararlı yapılara ve birçok ilginç özelliğe sahip bir elementtir. Karbonun lB ve OB yapıları nanometre düzeyinde oldukları için, bu sistemlere nanotüpler ve nanotoplar denir; karbon nanoyapıların aslını toplar ve tüpler oluşturur. Nanotoplar optik sınırlayıcı olarak kullanılır; bunlar malzemeleri aşırı ışıktan korumada yararlanılan kaplamalardır. Karbon toplar içeren polimerler, fotoiletkenlik özellik gösterdiği için, karbon nanotoplar fotodiyot ve transistor olarak, ayrıca güneş pillerinde

de kullanılabilir. Karbon nanotop katkılı ince polimer tabakalarının ilginç kırınım özelliği, onları önemli optik uygulamaların bir parçası haline getirmiş durumdadır.

Düzgün karbon nanotüp yapılarda atomlar birbirleri ile sp^2 şeklinde (grafit plakada olduğu gibi bağlanır) atomlar sadece altıgen geometri oluşturur ve her atomun sadece üç komşusu bulunur. Karbon tüplerin uçlarının koni şeklinde tamamlandığı durumlarda mümkündür.

2.3.1. Karbon Nanotoplar

Birkaç karbon atomunun, birbirine bağlanarak, top şeklinde oluşturdukları kafes yapılardır. 1984 yılında R.E. Smalley ve arkadaşları, Grafit kristalini lazerle eritip buharlaştırdılar. O sırada, Karbon atomlarının topaklar halinde ve farklı büyüklüklerde top biçimli kafes yapılar oluşturduğunu farkettiler. Bu Karbon topları, 20-130 kadar karbon atomu içeriyordu. Grafitin buharlaştırılması sırasında oluşan topların, %75 kadarını 60 atomlu toplar (C60), %23 kadarını da 70 atomlu toplar(C70) oluşturmaktaydı.

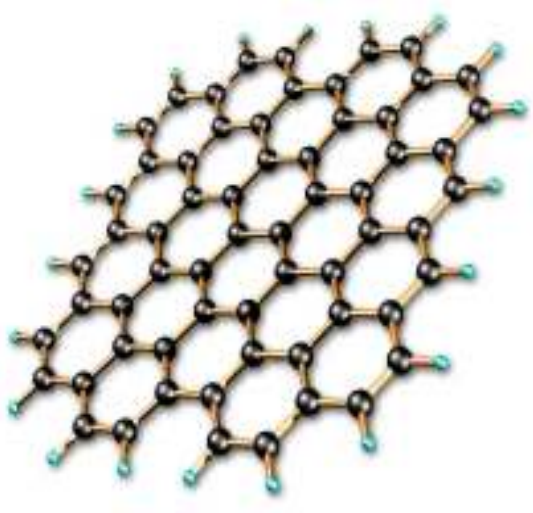
En sağlamı olan C60 Karbon toplarında, atomlar birbirleriyle sp2 şeklinde bağlanmaktadır. Bu bağ, Grafit atomlarının yaptığı bağ şekline benzemektedir. Karbon nanotopların, en çok üretilen ve yaygın olarak kullanılan biçimi, 60 karbon atomudur(C60). Bundan elde edilen küre şeklindeki C60; 12 yüzlü simetri, 12 adet beşgen ve 20 adet altıgen yüzden oluşur.

Karbon nanotoplar, genellikle küre şeklinde bir kafes yapısına sahiptir. Bu yapı ise Karbon atomlarının beşgen ve altıgen yüzeyler oluşturmalarından kaynaklanıyor. Tek duvarlı olabildikleri gibi, iç içe geçmiş soğan katmanlarına benzer bir yapıda olanları ya da ikili gruplar (dimer) halinde bulunanları da vardır.

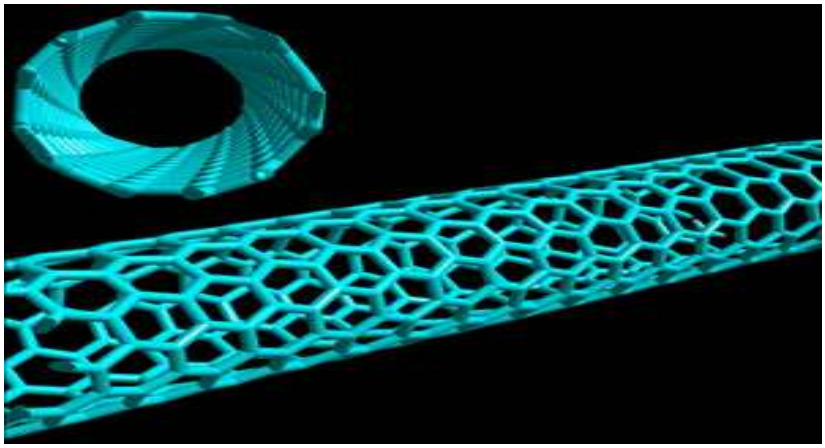
Karbon nanotoplar, hem saf olarak, hem de katkılandırılmış olarak da elde edilebilirler. Karbon toplar, yerleştirildikleri kristal yüzeylerinin, elektronik ve optik özelliklerini değiştirilebilirler. İki yüzey arasında zıplayarak hareket edebilen topların, bu özelliğinden faydalanarak, nano transistörler ve hatta tek elektron transistörler yapmak mümkündür (*www.ataunichem.net/pdf.php?type=N&item_id=1).*

2.3.2. Karbon Nanotüpler

Tek sıra karbon atomundan oluşturulan bir grafin katmanının (Şekil 2.1) silindir şeklinde bükülerek, uçlarının birleştirilmesi ile oluşturulan yapılardır (Şekil 2.2). Silindir şeklinde bir karbon allotropudur. İsminden de anlaşılacağı gibi sadece karbon atomu içerir.



Şekil 2.1. Grafin tabakası



Şekil 2.2. Karbon nanotüp

Karbon nanotüpler, silindirlerden oluşan fulleren tipi yapılardır. Karbon

nanotüplerin bilimsel macerası 1985'te 60 ya da daha fazla karbon atomunun birleştirilmesiyle oluşan futbol topu şeklindeki moleküllerin keşfiyle başlamıştır. Bu topların diğer atom veya moleküllerle yaptığı bileşiklere "fulleren" denir. Bu keşiften sonra birçok laboratuvar sıcak karbon buharını yoğunlaştırarak futbol topu şeklindeki molekülleri elde etmeye çalışmış; bu elde etme işleminden küçük değişiklerle çeşitli şekil ve boyutlarda küreye benzer yapılar elde edilmiştir. İlk tüp şeklindeki molekülleri 1991'de elektron mikroskobu uzmanı Sumia Iijima fullerenlerin ark-buharlaşması sentezi sırasında katodda biriken malzemeyi araştırma sırasında bulunmuştur. Kısa bir süre sonra Thomas Ebbeson ve Pulickel Ajayan (Iijima'nın labaratuarından) çeşitli ark-buharlaşması koşulları altında büyük miktarlarda nanotüp üretilebileceğini göstermiştir. Ama standart ark-buharlaşması metoduyla ancak çok katmanlı tüpler üretilebilmiştir. Sonraki araştırmalar sonucunda, grafit elektroduna kobalt gibi bazı metallerin eklenmesi sonucunda tek katmanlı mükemmel tüpler elde edilmiştir. 1993'de tek katmanlı nanotüplerin elde edilmesi, karbon nanotüplerin gelişmesinde büyük bir aşama olmuştur. 1996'da Rice Üniversitesi Araştırma Grubunun tek katmanlı nanotüp grupları oluşturmada daha etkin bir yöntem bulmasıyla, çok sayıda karbon nanotüp deneylerinin önü açılmış oldu. Arzu edilen nanotüpler 1200 °C fırında karbonun lazer-buharlaştırılmasıyla elde edildi. Daha sonra Montpellier Üniversitesinden Catherine Journet, Patrick Bernier ve çalışma arkadaşlarının karbon ark-buharlaşma metoduyla iyonlaşmış karbon plazmasından tek katmanlı nanotüp elde etmişlerdir. Çok katmanlı karbon nanotüplerin büyütülmesi için katalizör gerekmezken, tek katmanlı karbon nanotüpler ancak katalizör ile büyütülebilir.Karbon nanotüpler tesadüfen keşfedilmiş olmasına rağmen dünyanın dört bir yanında yoğun bir şekilde karbon nanotüplerin özelliklerinin araştırılmasına yol açtı. Gerçekten de araştırmacılar karbon nanotüplerin nano ölçekte birçok fiziksel, kimyasal, yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin olduğunu buldular (*www.kimyaevi.org/TR/Yonlendir.aspx?.).*

2.4. Karbon Nanotüpleri Elde Etme Yöntemleri

Karbon nanotüpleri elde etmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin en önemlileri; lazer buharlaştırma yöntemi ve ark buharlaştırma yöntemidir.

2.4.1 Ark Buharlaştırma Yöntemi

Nanotüp sentezi için difüzyon pompalı bir vakum hattına ve bir helyum kaynağına bağlı olan paslanmaz bir çelik vakum odası kullanılır. Bu yöntem, helyum ve argon atmosferinde iki elektrodun arasına elektrik akımı uygulamaya dayanır. Elektrotlar yüksek saflıkta iki grafit çubuktan oluşur. Anot 6 mm çapında ve uzun, katot ise çok daha kısa ve 9 mm çapındadır. Akım; çubukların çapına, aralarındaki uzaklığa ve gaz basıncına göre değişir, genellikle 50-100 A kadardır. Elektrotlar arklama sırasında birbirinden ayrı tutulmalıdır. 5000 ˚C'de grafitler buharlaşır. Anottan buharlaşan karbonun bir kısmı, katotta silindirik olarak tekrar buharlaşır. Bu silindirik tortunun merkezinde nanotüpler ve nano parçacıklar vardır. Odadaki helyum basıncı arttıkça, nanotüp sayısında önemli bir artış olmaktadır. Kobalt-Nikel katalizörü nanotüplerin oluşumunda kullanılır. Çok katmanlı nanotüpleri büyütmek için katalizör gerekmezken, tek katmanlı nanotüpler ancak katalizör ile büyültülebilir. Anotta grafit kullanıldığında karbon atomları arklanma sırasında oluşmakta ve katoda gitmekte; nanotüp ve fulleren isi oluşturmaktadır. Naftalinin anoda eklendiği deneylerde, katot çökeltisi nanotüplerin ortalama boşluk alanı grafitle kıyaslandığında iki nanometreye kadar yükselebilmektedir. Grafit üzerinde yapılan çalışmalar, kömürde bulunan demir ve sülfür gibi elementlerin aynı görevi üstlenebilceğini göstermiştir. Bu elementler çok duvarlı nanotüplerdeki tabakaların sayılarını değiştirmektedir.

2.4.2 Lazer Buharlaştıma Yöntemi

1200 ˚C'de argon akışında Co ve Ni tozlarının yarı yarıya karışımlarından oluşan grafit çubuklarının lazer depolaması işlemi sırasında elde edilen ürünler fullerenleri temizlemek için 1000 ˚C'de ısıl işlemini izlerler. Hareketsiz lazer pulsu,

ikinci bir puls hedefi buharlaştırmak için izler. İki tane birbirini izleyen lazer pulsu kullanmak, karbon kiri birikintisini azaltır. İkinci lazer pulsu ilkinden gelen daha büyük parçacıkları durdurur ve onları büyüyen nanotüp yapısına ekler. Bu şekilde üretilen malzeme; çapı 10-20 nm'den 100 μm'ye varan hatta daha uzun olabilen ip demetleri halinde görülmektedir. Her ip TDKNT yapıları oluşturmaya katkıda bulunur.

2.4.3 Mekanik Öğütme

Mekanik öğütme ve ardışık tavlama karbon nanotüp üretimi için basit yöntemler olduğundan endüstriyel üretimde de ucuz yöntemler olarak düşünülebilir. Karbon nanotüplerin ve bor nitritin tozlardan ısısal tavlama ile üretilmesi son zamanlara kadar bilinmemekteydi. Mekanik öğütme işlemi oda sıcaklığında 150 saate kadar sürmektedir. Öğütmeyi takiben, elde edilen toz, 1400 ˚C'de altı saatlik nitrojen veya argon gazı akışı altında tavlanır. Bu oluşumun mekanizması bilinmemekle birlikte mekanik öğütmenin nanotüp çekirdeğini oluşturduğu tavlama işleminin nanotüp büyümesini hızlandırdığı düşünülmektedir. Tek duvarlı nanotüpler bu yöntemle hazırlanamadığı halde çok duvarlı nanotüplerin bu yöntemle oluşturulduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır.

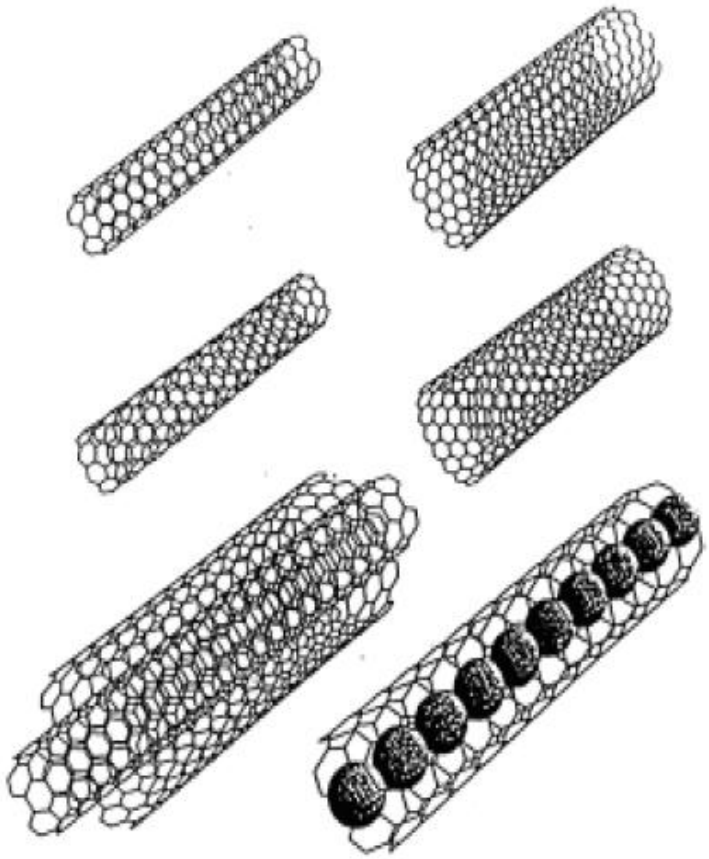
2.4.4 Diğer Yöntemler

Karbon nanotüpler alev sentezi, elektroliz, güneş enerjisi ve polimerin saf işlemi gibi yöntemlerle de üretilebilmektedir. Alev sentezi yöntemi, dört çelik bilye olan çelik pota ve içinde grafit tozuna (%99.8 saflıkta) dayanır. Potanın havası alınarak içine 300 kPa'lık Ar gazı doldurularak işlem yapılır.

Ticari kullanımda nanotüpler yapmak için onları kullanışlı parçalar şeklinde birleştirmek gerekir. Ajayan ve arkadaşları, polimer ağı şeklindeki nanotüp bileşimlerini kesme yoluyla düzenli karbon nanotüpler oluşturulmasını kapsayan basit bir yöntem geliştirmişlerdir (http://80.251.40.59/eng.ankara.edu.tr/ycenger/Bitirme%20tezi-Nanoteknoloji.htm).

2.5. Karbon nanotüplerin çeşitleri

Karbon nanotüpler, grafin tabakasının silindir şeklinde yuvarlanması ile tek duvarlı ve iç içe geçmiş silindirler şeklinde çok duvarlı olmak üzere iki tipe sahiptirler (Şekil 2.3).

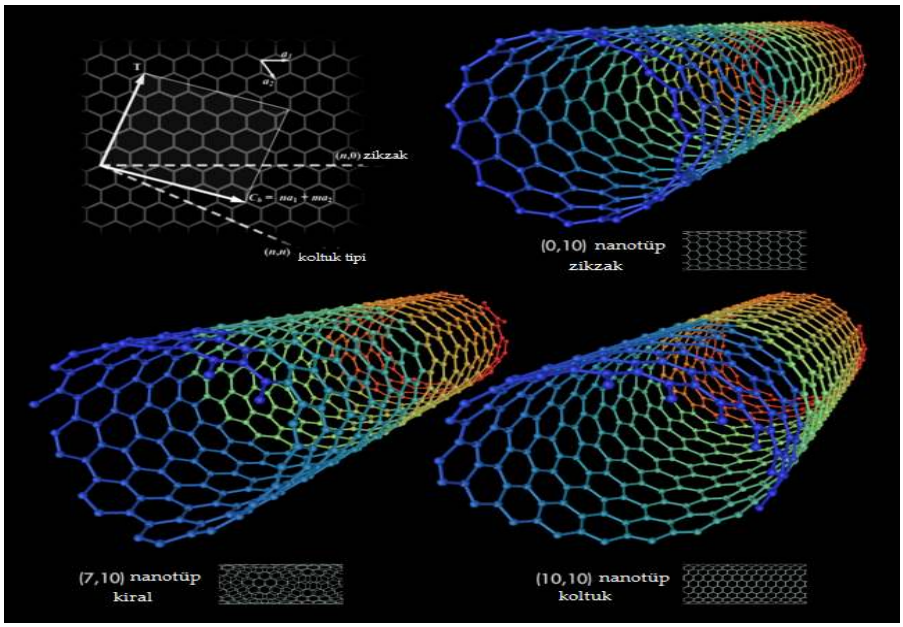


Şekil 2.3. Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler

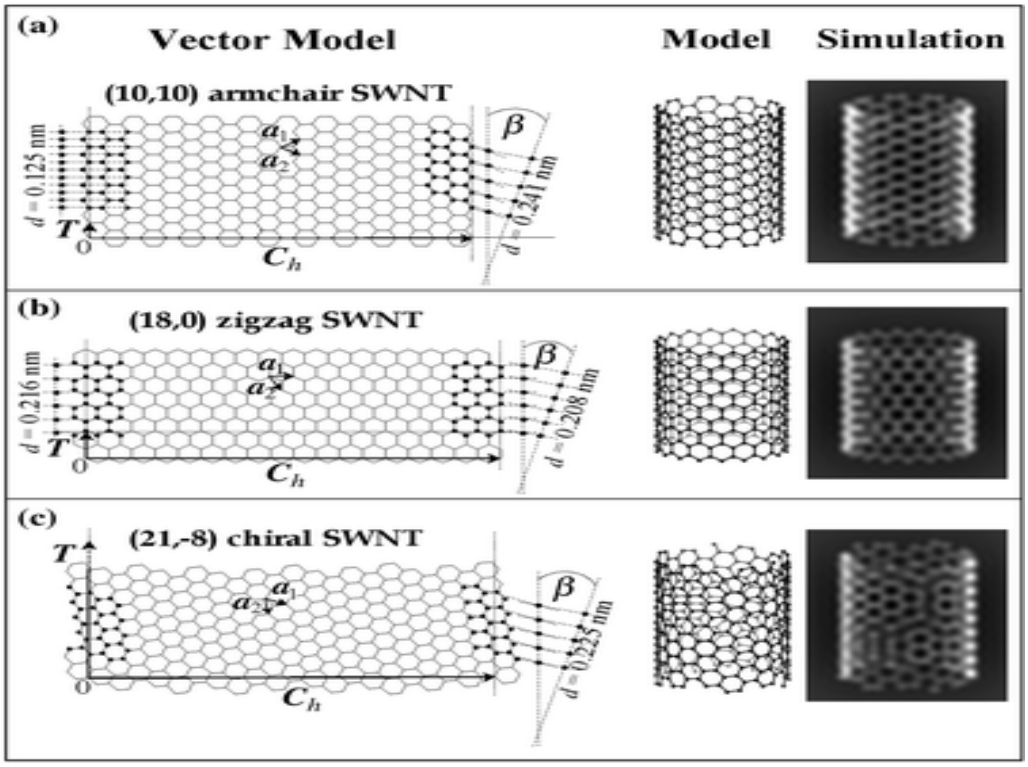
2.5.1. Tek duvarlı karbon nanotüpler

Tek bir grafin tabakasının yuvarlanmasıyla elde edilen yapılardır.

Tek duvarlı karbon nanotüpler ilginç mekanik ve elektro mekanik özelliklere sahiptir. Karbon tüplerin, makroskopik büyüklüklerde oluşmaları mümkünse de bunlar çok kırılgan; nanometre düzeyindeki boyutlara sahip tüplerse çok esnek ve sağlam özelliktedir. Şerit halinde ve helezoni şekilde de üretilebilen nanotüplerin farklı çaplarda olanları birbirine eklenebilir; eklem, bükülme veya kıvrılma yerlerinde farklı geometrik şekiller (beşgen, yedigen gibi) oluşturur Şekil 2.4, Şekil 2.5). Karbon nanotüplerin çapları nanometre, boyları mikrometre düzeyinde olabilir. Nanotüplerin çapları şimdiye kadar üretilebilen en ileri yarıiletken aygıt1arınkinden çok daha küçüktür. Karbon nanotüplerin yarıiletken teknolojisinde kullanılmaya başlanması yarı iletken teknolojisinde çok büyük bir atılıma neden olabilecektir; çünkü nanotüplerin çok ilginç elektronik özellikleri vardır. Tüpün geometrisine (çapına ve silindir yüzeyinin kıvrılma yönüne) bağlı olarak nanotüpler metal veya yarıiletkenlik özelliği gösterebilirler. Tüpün elektronik özellikleri, katkı maddesi olmaksızın yalnızca geometrik parametrelerle ayarlanabilir.



Şekil 2.4. Tek duvarlı karbon nanotüplerin geometrik modellerinin oluşumu



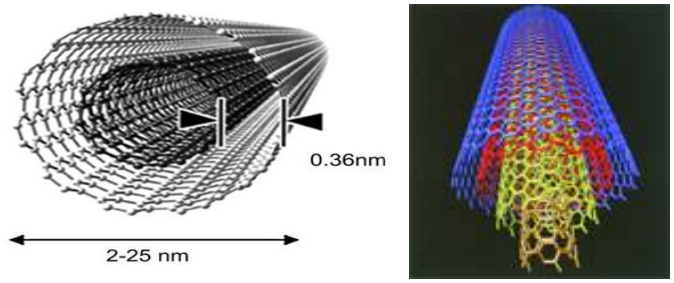
Şekil 2.5. Tek duvarlı karbon nanotüplerin geometrik modelleri

2.5.2. Çok duvarlı karbon nanotüpler

ÇDKNT'ler, bir çok eş merkezli grafin tabakalarının yuvarlanması ile oluşmuş yapılardır (Şekil 2.6). İç içe geçmiş durumdaki tüpleri van der Waals kuvvetleri birarada tutar. ÇDKNT'lerde katmanlar arası mesafe yaklaşık 0,34–0,36 nm'dir. Bu boyut grafinin tipik atomik boşluğuna yakındır. ÇDKNT'lerin boyutları yaklaşık 5-10 nm kadardır ve kullanımları TDKNT'lere oranla daha yaygındır.

İçiçe geçmiş karbon tüplerinde (çok duvarlı tüplerde) iki tüp arasındaki uzaklık, genellikle tüpü oluşturan karbon atomları arasındaki bağ uzaklığından fazladır. Eğer iç içe geçmiş tüplerde, tüplerin duvarları arasındaki uzaklık, karbon atomlarının bağ yapmalarına olanak verecek kadar azsa (0.15 nm), karbon atomları birbirleriyle (sp^3 gibi) bağlanır, başka bir deyişle, her karbon atomunun dört bağlı komşusu bulunmaktadır. Bu durumda oluşan çok duvarlı tüp yapısına "karbon nanoçubuk" denir.

Çubuklar içi tamamen boş veya içi kısmen dolu tüp yapılardan oluşmaktadır. Bu yapıların esnekliği tüplere göre daha az; ayrıca tek duvarlı tüplerden farklı mekanik ve elektronik özellikler gösterirler. Karbon nanohalkalar: Karbon nanotüplerin iki ucu birleştirilerek halka ("toroid") şeklinde yapıların oluşturulması da söz konusu olmaktadır. Bu yapılar üzerindeki çalışmalar şimdilik yalnızca teorik düzeyde olmakla birlikte, deneysel olarak da kısa zamanda yapılabileceklerine kuşkusuz olarak bakılmaktadır. Farklı iç ve dış çaptaki halkalarla çok değişik halka modelleri oluşturmak mümkündür. Her farklı halkanın, farklı özellikler göstermesi beklenmektedir. Karbon tüpleri kıvrılarak, ilginç özelliklere sahip helezoni yapılar da oluşturulabilir.



Şekil 2.6. Çok duvarlı karbon nanotüp modelleri

2.5.3. Karbon Nanoçubuklar

Çubuklar, içi tamamen veya kısmen dolu tüp yapılardan oluşmaktadır. İç içe geçmiş Karbon tüplerinde(çok duvarlı tüplerde), iki tüp arasındaki uzaklık, genellikle tüpü oluşturan Karbon atomları arasındaki bağ uzaklığından fazladır. Eğer iç içe geçmiş tüplerde, tüplerin duvarları arasındaki uzaklık, Karbon atomlarının bağ yapmalarına olanak verecek kadar azsa (< 0.15 nm), Karbon atomları birbirleriyle (sp3 gibi), bağlanmaktadır. Başka bir deyişle, her Karbon atomunun, dört bağlı komşusu bulunmakatadır. Bu durumda oluşan çok duvarlı tüp yapısına, çubuk denmektedir. Bu

yapıların esnekliği, tüplere göre daha azdır. Ayrıca tek duvarlı tüplerden farklı **mekanik** ve **elektronik** özellikler gösterirler.



Şekil 2.7. Nanoçubuk modeli

BÖLÜM 3

KARBON NANOTÜPLERİN TİTREŞİMİ VE SÜREKLİ ORTAM KİRİŞ MODELLERİ İLE ANALİZİ

3.1. Giriş

Bu bölümde KNT'lerin mekanik davranışlarının modellenmesinde kullanılan Euler-Bernoulli kiriş teorisi açıklanacaktır. TDKNT'lerin kiriş teorileriyle modellenmesi analitik olarak kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. N duvarlı tüpler için genel Euler Bernoulli kiriş teorisi oluşturulacaktır. Ardından sonlu farklar yöntemi açıklanacaktır.

3.2. N Duvarlı Karbon Nanotüpler İçin Hareket Denklemleri

KNT' lerin moleküler dinamik yöntemlerle incelenmesi atom sayısının artmasıyla güçleşmekte hatta günümüzdeki hesaplama olanaklarıyla dahi imkansız olabilmektedir. Bu nedenle KNT' lerin sürekli ortam şeklinde modellenmesi yoluna gidilmektedir. Şekil 3.1 de iki duvarlı KNT için atomik ve sürekli ortam modelleri gösterilmiştir. KNT' lerin sürekli ortam modellerinde kabuk ve kiriş modelleri daha önceki bazı çalışmalarda kullanılmıştır. Bu çalışmada sürekli ortam Euler-Bernoulli kiriş modeli kullanılacaktır. N duvarlı bir karbon nanotüp göz önüne alınsın.

Tüplere ait hareket denklemi Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E\ I_1 \frac{\partial^4 w_1(x)}{\partial x^4} + \rho A_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} = c_{12}(w_2 - w_1)$$

$$E\ I_2 \frac{\partial^4 w_2(x)}{\partial x^4} + \rho A_2 \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} = c_{12}(w_1 - w_2) + c_{23}(w_3 - w_2)$$

.

. (3.1)

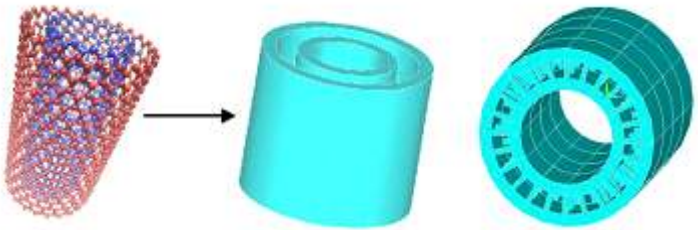
$$EI_N \frac{\partial^4 w_N(x)}{\partial x^4} + \rho A_N \frac{\partial^2 w_N}{\partial t^2} + q = c_{N-1,N}(w_N - w_{N-1}).$$

Burada E elastisite modülünü, I_i i.tüpe ait atalet momentini, w_i i.tüpün çökmesini c_{ij} i. ve j. tüp arasındaki van der Waals etkileşim katsayısını ve ρ tüpün birim uzunluk başına yoğunluğunu göstermektedir. Etkileşim katsayısı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$c_{ij} = \frac{320 \times (2r_i) erg/cm^2}{0.16(0.142nm)^2}$$

Buradaki tüp numaralandırılması en iç tüpe 1 denilerek dışarıya doğru arttırılmıştır. Böylece en dıştaki tüp N. tüp olarak adlandırılmıştır.

Bu tüplerin titreşim analizinde kullanılacak klasik sınır şartları aşağıdaki gibi verilebilir:



Şekil 3.1. Karbon nanotüplerin sürekli ortam şeklinde temsili (Batra ve Sears, 2007)

Basit Destekli(B): $w = 0, \quad \dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$

Ankastre(A): $w = 0, \ \dfrac{\partial w}{\partial x} = 0$

Serbest(S): $\dfrac{\partial^3 w}{\partial x^3} = 0, \quad \dfrac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$ (3.2)

3.3. Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerin Titreşim Analizi

Bu kısımda klasik Euler-Bernoulli Sürekli Ortam Kiriş Modeli kullanılarak TDKNT'lerin farklı sınır şartlarındaki titreşimi davranışı incelenecektir. TDKNT ler için yapılan bu incelemenin tek bir kirişin titreşiminin incelenmesinden farkı yoktur.

Bu durum için (3.1) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E\ I_1 \frac{\partial^4 w_1(x)}{\partial x^4} + \rho A_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} = 0 \tag{3.3}$$

Bu denklemin çözümü harmonik titreşim kabulü ile aşağıdaki gibi verilebilir.

$$w(x,t) = Y(x)\sin \omega t \tag{3.4}$$

Eşitlik (3.4) eşitlik (3.3)'te yerine yazılırsa

$$\frac{d^4 Y(x)}{dx^4} + \beta^2 Y(x) = 0 \tag{3.5}$$

Diferansiyel denklemi elde edilir. Buradaki boyutsuz frekans parametresi $\beta^2 = \rho\omega^2 L^4 / EI$ olarak tanımlanmıştır. (3.5) denkleminin çözümü aşağıdaki gibi verilebilir.

$$Y(x) = C1\sin \beta x + C2\cos \beta x + C3\sinh \beta x + C4\cosh \beta x \tag{3.6}$$

Burada C_i (i=1-4) bilinmeyen katsayılardır. Eşitlik (3.2) de verilen sınır şartları ve (3.6) ifadesi kullanılarak istenilen bir sınır şartına ait frekans denklemi bulunabilir.

Bilinen klasik sınır şartları için frekans denklemleri aşağıdaki tablodaki gibi verilmektedir.

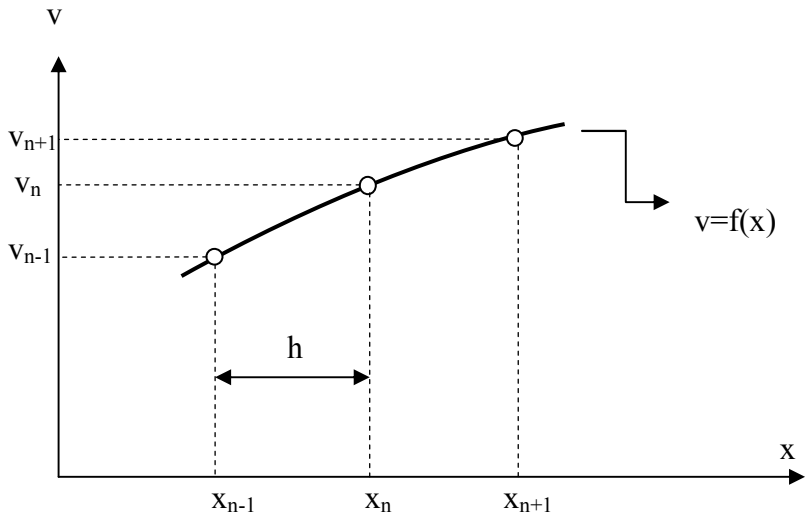
Çizelge 3.1. Farklı sınır şartlarında frekans denklemleri

Sınır şartı	Frekans denklemi
B-B	$\sin \beta = 0$
A-A	$\cos \beta \cosh \beta = 1$
S-S	$\cos \beta \cosh \beta = 1$ (yarı tanımlı sistem)
B-S	$\tan \beta = \tanh \beta$
A-S	$\cos \beta \cosh \beta = -1$
A-B	$\tan \beta = \tanh \beta$ (yarı tanımlı sistem)

TDKNT için verilen bu analitik çözümleme 2 ve daha fazla tüpten oluşan ÇDKNT'ler için genel sınır şartlarında mümkün değildir. Bu sebeple yaklaşık çözüm yöntemleri kullanılması yoluna gidilmektedir. Bu çalışmada da çok duvarlı tüpler için bir nümerik yöntem olan sonlu farklar yöntemi kullanılacaktır. Bir sonraki bölümde kısaca bu yöntem açıklanacaktır.

3.4. Sonlu Farklar Yöntemi

Diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan yaklaşık yöntemlerden birisi sonlu farklar yöntemidir (SFY). Bu yöntemi açıklayabilmek için sürekli bir v(x) fonksiyonu göz önüne alınsın (Steven ve Raymond, 2003).



Şekil 3.3. Sonlu farklar yönteminde tanımlanan bir v=f(x) fonksiyonu

Burada h adım uzunluğu, n ise düğüm noktaları olarak adlandırılır. v fonksiyonunun n düğümündeki birinci türevi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left[\frac{dv}{dx}\right]_n \approx \frac{\Delta v_n}{h} = \frac{1}{h}(v_{n+1} - v_n) \tag{3.7}$$

burada,

$$\Delta v_n = v_{n+1} - v_n \approx h\left[\frac{dv}{dx}\right]_n \tag{3.8}$$

şeklinde yazılır.

Δ, birinci ileri fark olarak adlandırılır. Benzer şekilde birinci türeve aşağıdaki gibi yaklaşır.

$$\left[\frac{dv}{dx}\right]_n \approx \frac{\nabla v_n}{h} = \frac{1}{h}(v_n - v_{n-1}) \tag{3.9}$$

∇, ikinci ileri fark olarak adlandırılır.

$$\nabla v_n = v_n - v_{n-1} \approx h\left[\frac{dv}{dx}\right]_n \tag{3.10}$$

Bu ifade de geri fark formülü ile birinci türevdir.

Merkezi fark formülleri şeçilen n sayısı kadar türevlerde yakınsama sağlar. Eğer ileri ve geri fark formüllerini toplayıp ikiye bölersek merkezi fark formülünü bulmuş oluruz. Burada merkezi fark formülü ile birinci türev şöyle ifade edilir.

$$\left[\frac{dv}{dx}\right]_n = \frac{1}{2h}(v_{n+1} - v_{n-1})$$

$$\delta v_n = \frac{1}{2}(v_{n+1} - v_{n-1}) \approx h\left[\frac{dv}{dx}\right]_n \tag{3.11}$$

şeklinde yazılır.

Birinci türevin bir daha türevi alınırsa yani ikinci türevi elde etmek istenirse,

$$h^2\left[\frac{d^2v}{dx^2}\right]_n \approx \Delta(\nabla v_n) = \nabla(\Delta v_n) = \delta^2 v_n \tag{3.12}$$

elde edilir.

(3.11) ve (3.12)'a göre denklemler tekrar düzenlenirse,

$$\delta^2 v_n = \Delta v_n - \Delta v_{n-1} = (v_{n+1} - v_n) - (v_n - v_{n-1}) \tag{3.13}$$

elde edilir. Daha da açılırsa,

$$\delta^2 v_n = v_{n+1} - 2v_n + v_{n-1} \approx h^2\left[\frac{d^2v}{dx^2}\right]_n \tag{3.14}$$

ikinci merkezi fark formülü de bulunmuş olur.

Benzer adımlar üçüncü merkezi farklar için yapılırsa,

$$\delta^3 v_n = \delta(\delta^2 v_n) = \delta v_{n+1} - 2\delta v_n + \delta v_{n-1} = \frac{1}{2}(v_{n+2} - v_n) - (v_{n+1} - v_{n-1}) + \frac{1}{2}(v_n - v_{n-2})$$

veya

$$\delta^3 v_n = \frac{1}{2}(v_{n+2} - 2v_{n+1} + 2v_{n-1} - v_{n-2}) \approx h^3\left[\frac{d^3v}{dx^3}\right]_n \tag{3.15}$$

elde edilir.

Aynı mantıkla dördüncü mertebeden sonlu farklar;

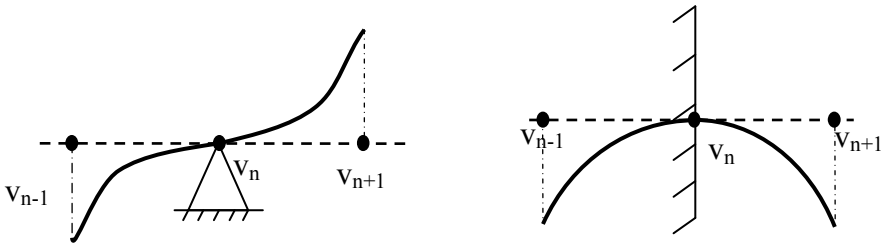
$$\delta^4 v_n = v_{n+2} - 4v_{n+1} + 6v_n - 4v_{n-1} + v_{n-2} \approx h^4 \left[\frac{d^4 v}{dx^4}\right]_n \tag{3.16}$$

şeklinde yazılır.

Bu çalışmada ankastre ve basit destekli nanotüpler için sonlu farklarla çözüm yapılacaktır. Bu şartlara ait sonlu farklar formülasyonu aşağıdaki tablo ve şekilde verilmiştir. Burada ifade edilen türevlerdeki hata $0(h^2)$ mertebesindedir.

Çizelge 3.2. Sonlu Farklar yöntemiyle sınır koşulları

Basit Destekli(B)	Ankastre(A)	Serbest (S)
$v_n=0$	$v_n=0$	$v_{n+1}-2v_n+v_{n-1}=0$
$v_{n+1}=-v_{n-1}$	$v_{n+1}=v_{n-1}$	$v_{n+2}-2v_{n+1}+2v_{n-1}-v_{n-2}=0$



a) Basit destekli sınır şartı b) Ankastre sınır şartı

Şekil 3.4. Sınır şartlarının şematik gösterim

BÖLÜM 4

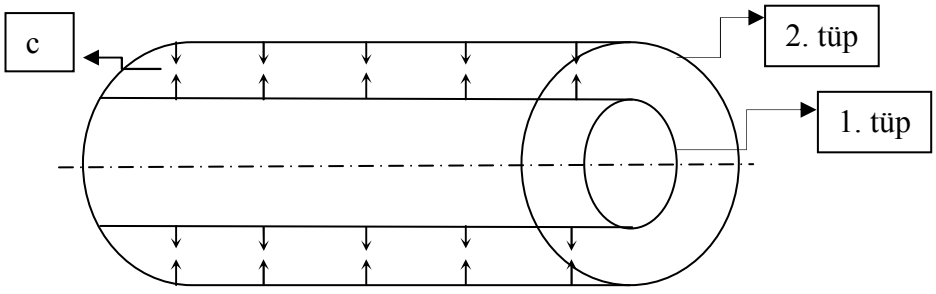
ÇİFT DUVARLI KARBON NANOTÜPLERİN TİTREŞİM ANALİZİ

4.1. Giriş

Bu bölümde çok duvarlı tüpler olarak 2 duvarlı tüplerin titreşim davranışları incelenecektir. Öncelikle tüm kenarları basit destekli ÇDKNT'lerin titreşimi Navier tipi yöntemle incelenecektir. Ardından uçları farklı sınır koşullarındaki ÇDKNT'lerin titreşimi sonlu farklar metodu (SFM) kullanarak bulunacaktır. Çok duvarlı tüplerde analitik çözüm genel sınır şartları için mümkün olmadığından bu yöntem kullanılmıştır.

4.2. Çift Duvarlı Karbon Nanotüpler

Çift duvarlı bir nanotüp şematik olarak aşağıdaki gibi gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Çift duvarlı karbon nanotüpün şematik gösterimi

Burada, c; van der Waals etkileşimini göstermektedir ve atomlar arası çekim kuvvetini ifade etmektedir. Bir başka deyişle, mekanik anlamda iki tüp arasında yay varmış gibi düşünülebilir.

İki tüp için hareket denklemlerini yazarsak;

$$E\ I_1 \frac{\partial^4 w_1(x)}{\partial x^4} + \rho A_1 \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} = c_{12}(w_2 - w_1)$$
$$E\ I_2 \frac{\partial^4 w_2(x)}{\partial x^4} + \rho A_2 \frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2} = c_{12}(w_1 - w_2) \tag{4.1}$$

elde edilir.

Bu eşitlikler analitik olarak çözülmeye çalışılacak olursa, sekizinci dereceden bir diferansiyel denklemle karşılaşılmış olur. Tüp sayısı daha da arttırılacak olursa, analitik yöntemle çözüm zorlaşmaktadır.

4.3. Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Navier Tipi Yöntemle Titreşim Analizi

Yerdeğiştirme bileşenlerinin ve düşey kuvvetin aşağıdaki form da seçilmesi (4.1) denklemini ve (4.1)'de verilen basit destekli sınır şartlarını sağlar.

$$w_i = W_i \sin \frac{\pi x}{L} \sin \omega t,\ i = 1,2 \tag{4.2}$$

(4.2)'yi, (4.1)'de yerine yazarsak aşağıdaki ifade bulunur.

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_1 + (m\pi)^4 - f^4 \dfrac{A_1}{A_2}\dfrac{I_2}{I_1} & \varepsilon_1 \\ -\varepsilon_2 & \varepsilon_2 + (m\pi)^4 + f^4 \end{vmatrix} = 0 \tag{4.3}$$

Burada ilgili parametreler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\begin{aligned} &A_1 = \pi(r_2^2 - r_1^2), \quad A_2 = \pi(r_4^2 - r_3^2), \\ &I_1 = \pi(r_2^4 - r_1^4)/4, \quad I_2 = \pi(r_4^4 - r_3^4)/4, \\ &\varepsilon_i = \frac{cL^4}{EI_i}\ i = 1,2. \quad f^4 = \frac{\rho\omega^2 A_2 L^4}{EI_2} \end{aligned} \tag{4.4}$$

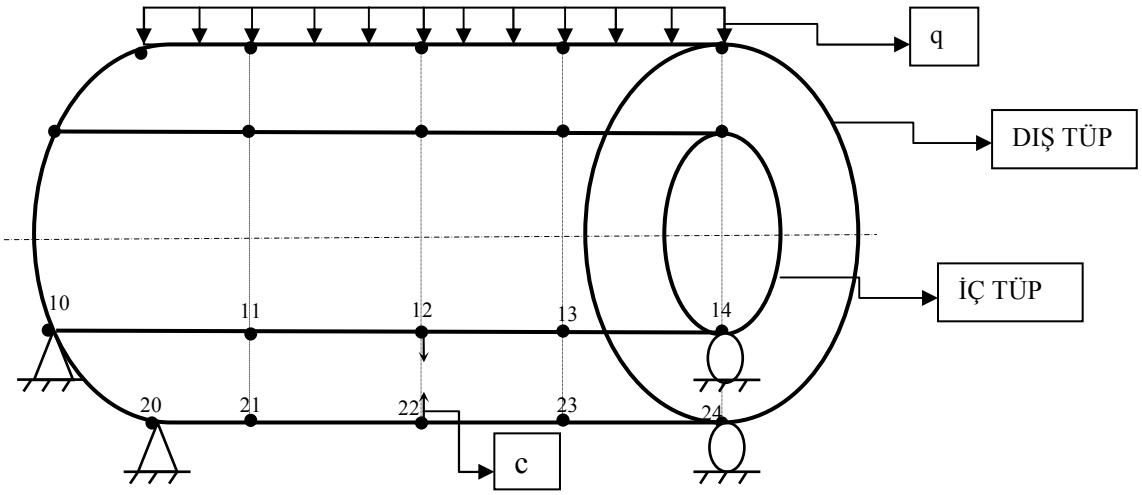
Burada f boyutsuz frekans parametresini göstermektedir. Navier tipi çözüm yöntemi sadece tüm kenarları basit destekli KNT'lere uygulandığından genel sınır şartlarındaki KNT'ler için bu çalışmada sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır.

4.4. Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin Sonlu Farklar Yöntemiyle Titreşim Analizi

Karbon nanotüplerin titreşim analizi 3. bölümde anahatları verilen sonlu farklar yöntemi kullanılarak ankastre ve basit destekli haller için ve nanotüp 4, 6, 8, 10 ve 12 parçaya bölünerek yapılacaktır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak aralık sayısının sonuçlar üzerindeki etkisi gözlenecektir.

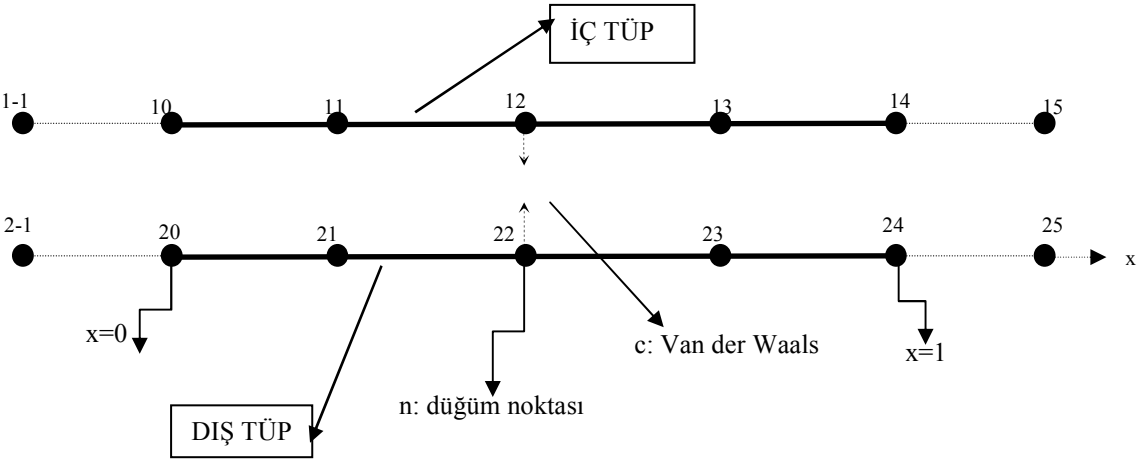
4.4.1. Uçları basit destekli olan(İç B-B, Dış B-B) çift duvarlı karbon nanotüpün 4 parça için titreşim analizi

4 parçaya bölünmüş bir ÇDKNT'ün şematik görünümü Şekil 4.2. de verilmiştir. Buradaki numaralandırmada ilk sayı tüpün numarasını ikinci sayı ise düğüm numarasını göstermektedir.



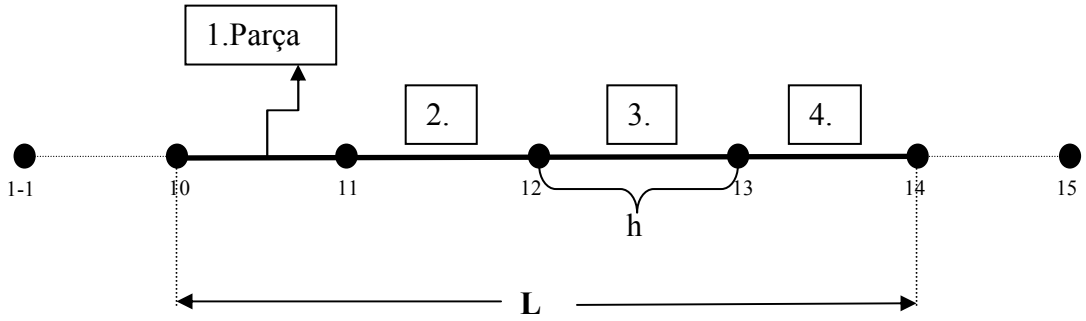
Şekil 4.2. 4 Parçaya ayrılmış her bir ucu basit destekli olan çift duvarlı karbon nanotüpün şematik gösterimi

Sınır şartlarının uygulanması sırasında kullanılacak hayali noktaların eklenmesi halindeki numaralandırma Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. 4 parçaya ayrılmış iki nanotüpün etkileşiminin şematik gösterimi

İçteki, yani birinci tüp daha yakından incelenirse, w_{mn} çökme ifadesinde m tüpün indisi, n ise hangi noktada olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.4. 4 parçaya ayrılmış içteki nanotüpün şematik gösterimi

(4.1)'de verilen çökme denklemi Sonlu Farklar yöntemi kullanılarak aşağıdaki formda yazılabilir.

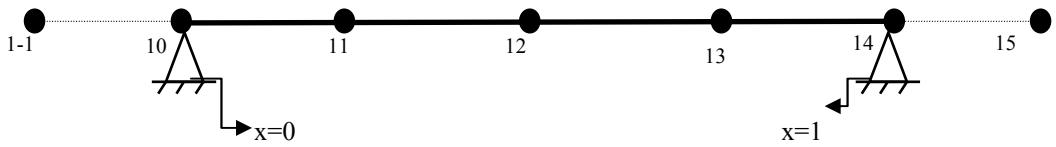
$$EI_1(w_{1n})^{(4)} - \rho\omega^2 A_1 w_{1n} = c(w_{2n} - w_{1n}) \qquad \{1.\text{tüp}\}$$

$$EI_2(w_{2n})^{(4)} - \rho\omega^2 A_2 w_{2n} = c(w_{1n} - w_{2n}) \qquad \{2.\text{tüp}\} \tag{4.5}$$

Sonlu Farklar ile 4. türev ifadesi aşağıdaki gibi idi.

$$\left[\frac{d^4 w}{dx^4}\right]_n = \frac{1}{h^4}\left[w_{n+2} - 4w_{n+1} + 6w_n - 4w_{n-1} + w_{n-2}\right] \tag{4.6}$$

Yukarıda değinilen denklemleri kullanarak titreşimi incelenir. İçteki 1. tüp incelenecek olursa, Burada, 0<x<L; h=L/4; n=1, 2, 3; $-w_{11}=w_{1-1}$, $-w_{13}=w_{15}$ ve $w_{10}=w_{14}=0$ olarak alınır.



Şekil 4.5. İç tüpün 4 parçaya ayrılmış basit destekli halindeki düğüm noktalarının görünümü

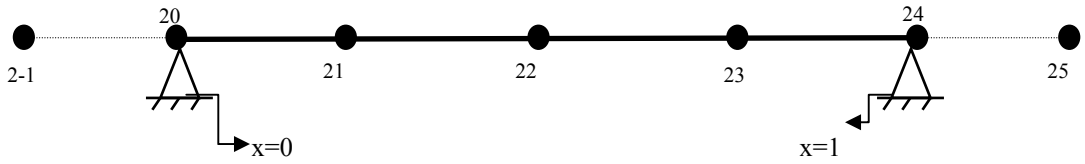
Denklem (3.16)'deki 4. Türevi sonlu farklarla tanımlayan denklem, (4.5)'te 1. tüpe uygulanırsa ve Şekil 3.3. a)'daki basit destek şartlarıyla;

$$
\begin{aligned}
&n=1 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{13}-4w_{12}+6w_{11}-4w_{10}+w_{1-1}\right]+cw_{11}-cw_{21}-\rho\omega^2 A_1 w_{11}=0\\
&n=2 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{14}-4w_{13}+6w_{12}-4w_{11}+w_{10}\right]+cw_{12}-cw_{22}-\rho\omega^2 A_1 w_{12}=0\\
&n=3 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{15}-4w_{14}+6w_{13}-4w_{12}+w_{11}\right]+cw_{13}-cw_{23}-\rho\omega^2 A_1 w_{13}=0
\end{aligned}
\tag{4.7}
$$

genel bir ifade karşımıza çıkar. Sınır şartlarını kullanırsak aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$
\begin{aligned}
&n=1 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{13}-4w_{12}+5w_{11}\right]+cw_{11}-cw_{21}-\rho\omega^2 A_1 w_{11}=0\\
&n=2 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[-4w_{13}+6w_{12}-4w_{11}\right]+cw_{12}-cw_{22}-\rho\omega^2 A_1 w_{12}=0\\
&n=3 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[5w_{13}-4w_{12}+w_{11}\right]+cw_{13}-cw_{23}-\rho\omega^2 A_1 w_{13}=0
\end{aligned}
\tag{4.8}
$$

1. tüpün titreşim denklemlerinin eldesi için yapılan hesaplar, 2. tüp için tekrarlanırsa; burada, 0<x<L; h=L/4; n=1, 2, 3; $-w_{21}=w_{2-1}$, $-w_{23}=w_{25}$ ve $w_{20}=w_{24}=0$ olarak alınır.



Şekil 4.6. Dış tüpün 4 parçaya ayrılmış basit destekli halindeki düğüm noktalarının görünümü

$$
\begin{aligned}
&n=1 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{23}-4w_{22}+6w_{21}-4w_{20}+w_{2-1}\right]+cw_{21}-cw_{11}-\rho\omega^2 A_2 w_{21}=0\\
&n=2 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{24}-4w_{23}+6w_{22}-4w_{21}+w_{20}\right]+cw_{22}-cw_{12}-\rho\omega^2 A_2 w_{22}=0\\
&n=3 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{25}-4w_{24}+6w_{23}-4w_{22}+w_{21}\right]+cw_{23}-cw_{13}-\rho\omega^2 A_2 w_{23}=0
\end{aligned}
\tag{4.9}
$$

genel ifadeyi sadeleştirirsek,

$$
\begin{aligned}
&n=1 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{23}-4w_{22}+5w_{21}\right]+cw_{21}-cw_{11}-\rho\omega^2 A_2 w_{21}=0\\
&n=2 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[-4w_{23}+6w_{22}-4w_{21}\right]+cw_{22}-cw_{12}-\rho\omega^2 A_2 w_{22}=0\\
&n=3 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[5w_{23}-4w_{22}+w_{21}\right]+cw_{23}-cw_{13}-\rho\omega^2 A_2 w_{23}=0
\end{aligned}
\qquad (4.10)
$$

elde edilir.

Bu işlemler sonucunda elde edilen (4.8) ve (4.10) eşitliklerinde verilen 6 adet 6 bilinmeyenli lineer denklem sisteminden elde edilen özdeğer problemi çözülerek boyutsuz frekans parametresi elde edilir.

4.4.2. Uçları basit destekli olan(İç B-B, Dış B-B) çift duvarlı karbon nanotüpün 12 parça için titreşim analizi

İkinci bir örnek olarak nanotüp 12 parçaya bölünmüştür. -1'den 13'e kadar toplam 14 düğüm noktası vardır.

1. tüpü incelersek; burada, $0<x<L$; $h=L/12$; $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11$; $-w_{11}=w_{1-1}$, $-w_{1(10)}=w_{1(13)}$ ve $w_{10}=w_{1(12)}=0$ olarak alınır.

$$n=1 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{13}-4w_{12}+6w_{11}-4w_{10}+w_{1-1}\right]+cw_{11}-cw_{21}-\rho\omega^2 A_1 w_{11}=0$$

$$n=2 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{14}-4w_{13}+6w_{12}-4w_{11}+w_{10}\right]+cw_{12}-cw_{22}-\rho\omega^2 A_1 w_{12}=0$$

$$n=3 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{15}-4w_{14}+6w_{13}-4w_{12}+w_{11}\right]+cw_{13}-cw_{23}-\rho\omega^2 A_1 w_{13}=0$$

$$n=4 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{16}-4w_{15}+6w_{14}-4w_{13}+w_{12}\right]+cw_{14}-cw_{24}-\rho\omega^2 A_1 w_{14}=0$$

$$n=5 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{17}-4w_{16}+6w_{15}-4w_{14}+w_{13}\right]+cw_{15}-cw_{25}-\rho\omega^2 A_1 w_{15}=0$$

$$n=6 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{18}-4w_{17}+6w_{16}-4w_{15}+w_{14}\right]+cw_{16}-cw_{26}-\rho\omega^2 A_1 w_{16}=0$$

$$n=7 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{19}-4w_{18}+6w_{17}-4w_{16}+w_{15}\right]+cw_{17}-cw_{27}-\rho\omega^2 A_1 w_{17}=0$$

$$n=8 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{1(10)}-4w_{19}+6w_{18}-4w_{17}+w_{16}\right]+cw_{18}-cw_{28}-\rho\omega^2 A_1 w_{18}=0$$

$$n=9 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{1(11)}-4w_{1(10)}+6w_{19}-4w_{18}+w_{17}\right]+cw_{19}-cw_{29}-\rho\omega^2 A_1 w_{19}=0$$

$$n=10 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{1(12)}-4w_{1(11)}+6w_{1(10)}-4w_{19}+w_{18}\right]+cw_{1(10)}-cw_{2(10)}-\rho\omega^2 A_1 w_{1(10)}=0$$

$$n=11 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{1(13)}-4w_{1(12)}+6w_{1(11)}-4w_{1(10)}+w_{19}\right]+cw_{1(11)}-cw_{2(11)}-\rho\omega^2 A_1 w_{1(11)}=0$$

(4.11)

elde edilir.

2. tüpü incelersek;

Burada, 0<x<L; h=L/12; n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11; $-w_{21}=w_{2-1}$, $-w_{2(11)}=w_{2(13)}$ ve $w_{20}=w_{2(12)}=0$ olarak alınır.

$$n=1 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{23}-4w_{22}+6w_{21}-4w_{20}+w_{2-1}\right]+cw_{21}-cw_{11}-\rho\omega^2 A_2 w_{21}=0$$

$$n=2 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{24}-4w_{23}+6w_{22}-4w_{21}+w_{20}\right]+cw_{22}-cw_{12}-\rho\omega^2 A_2 w_{22}=0$$

$$n=3 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{25}-4w_{24}+6w_{23}-4w_{22}+w_{21}\right]+cw_{23}-cw_{13}-\rho\omega^2 A_2 w_{23}=0$$

$$n=4 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{26}-4w_{25}+6w_{24}-4w_{23}+w_{22}\right]+cw_{24}-cw_{14}-\rho\omega^2 A_2 w_{24}=0$$

$$n=5 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{27}-4w_{26}+6w_{25}-4w_{24}+w_{23}\right]+cw_{25}-cw_{15}-\rho\omega^2 A_2 w_{25}=0$$

$$n=6 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{28}-4w_{27}+6w_{26}-4w_{25}+w_{24}\right]+cw_{26}-cw_{16}-\rho\omega^2 A_2 w_{26}=0$$

$$n=7 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{29}-4w_{28}+6w_{27}-4w_{26}+w_{25}\right]+cw_{27}-cw_{17}-\rho\omega^2 A_2 w_{27}=0$$

$$n=8 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{2(10)}-4w_{29}+6w_{28}-4w_{27}+w_{26}\right]+cw_{28}-cw_{18}-\rho\omega^2 A_2 w_{28}=0$$

$$n=9 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{2(11)}-4w_{2(10)}+6w_{29}-4w_{28}+w_{27}\right]+cw_{29}-cw_{19}-\rho\omega^2 A_2 w_{29}=0$$

$$n=10 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{2(12)}-4w_{2(11)}+6w_{2(10)}-4w_{29}+w_{28}\right]+cw_{2(10)}-cw_{1(10)}-\rho\omega^2 A_2 w_{1(10)}=0$$

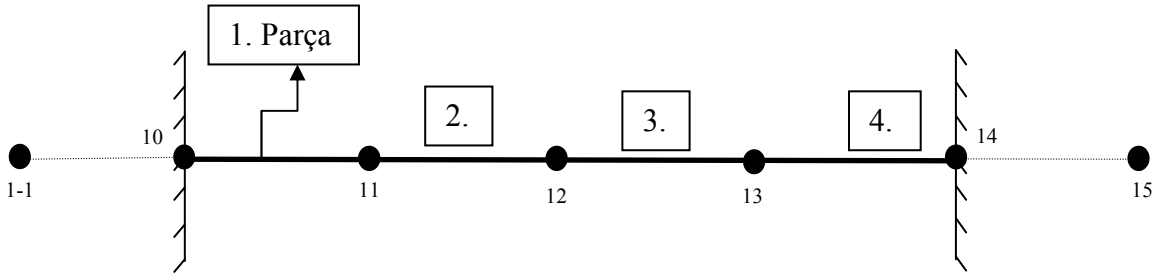
$$n=11 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{2(13)}-4w_{2(12)}+6w_{2(10)}-4w_{2(9)}+w_{2(8)}\right]+cw_{2(11)}-cw_{1(11)}-\rho\omega^2 A_2 w_{1(11)}=0$$

(4.12)

Yukarıda 4 parçaya bölünmüş KNT için elde edildiği gibi 12 parçaya bölünmüş tüp için de 12 bilinmeyenli 12 adet lineer denklem sisteminden oluşturulan özdeğer problemi çözülerek KNT'e ait frekans parametreleri bulunmuş olur.

4.4.3. Uçları ankastre olan(İç A-A, Dış A-A) çift duvarlı karbon nanotüpün 4 parça için titreşim analizi

İç ve dıştaki her iki tüpün de ankastre destekli olduğu ÇDKNT'lerde 4 ve 12 parçaya bölünmüş halleri için denklemler verilecektir.



Şekil 4.7. İç tüpün 4 parçaya ayrılmış ankastre destekli halindeki düğüm noktalarının görünümü

İlk olarak 4 parçalı ÇDKNT'lerde, içteki 1. tüp incelenecek olursa;

Burada, $0<x<L$; $h=L/4$; $n=1, 2, 3$; $w_{11}=w_{1-1}$, $w_{13}=w_{15}$ ve $w_{10}=w_{14}=0$ olarak alınır.

(3.16)'daki denklem (4.5)'da 1. tüpe uygulanırsa,

$$\begin{aligned} n=1 \text{ iken } & \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{13}-4w_{12}+6w_{11}-4w_{10}+w_{1-1}\right]+cw_{11}-cw_{21}-\rho\omega^2 A_1 w_{11}=0 \\ n=2 \text{ iken } & \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{14}-4w_{13}+6w_{12}-4w_{11}+w_{10}\right]+cw_{12}-cw_{22}-\rho\omega^2 A_1 w_{12}=0 \\ n=3 \text{ iken } & \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{15}-4w_{14}+6w_{13}-4w_{12}+w_{11}\right]+cw_{13}-cw_{23}-\rho\omega^2 A_1 w_{13}=0 \end{aligned} \tag{4.13}$$

(4.13)'i sadeleştirirsek,

$$n=1 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{13}-4w_{12}+7w_{11}\right]+cw_{11}-cw_{21}-\rho\omega^2 A_1 w_{11}=0$$
$$n=2 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[-4w_{13}+6w_{12}-4w_{11}\right]+cw_{12}-cw_{22}-\rho\omega^2 A_1 w_{12}=0$$
$$n=3 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[7w_{13}-4w_{12}+w_{11}\right]+cw_{13}-cw_{23}-\rho\omega^2 A_1 w_{13}=0$$

(4.14)

elde edilir. 2. tüp incelenecek olursa; burada, 0<x<L; h=L/4; n=1, 2, 3; $-w_{21}=w_{2\text{-}1}$, $-w_{23}=w_{25}$ ve $w_{20}=w_{24}=0$ olarak alınır.

$$n=1 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{23}-4w_{22}+6w_{21}-4w_{20}+w_{2-1}\right]+cw_{21}-cw_{11}-\rho\omega^2 A_1 w_{21}=0$$
$$n=2 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{24}-4w_{23}+6w_{22}-4w_{21}+w_{20}\right]+cw_{22}-cw_{12}-\rho\omega^2 A_1 w_{22}=0$$
$$n=3 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{25}-4w_{24}+6w_{23}-4w_{22}+w_{21}\right]+cw_{23}-cw_{13}-\rho\omega^2 A_1 w_{23}=0 \qquad (4.15)$$

elde edilir. Sınır şartları kullanılırsa denklemler aşağıdaki şekle dönüşür.

$$n=1 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{23}-4w_{22}+7w_{21}\right]+cw_{21}-cw_{11}-\rho\omega^2 A_2 w_{21}=0$$
$$n=2 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[-4w_{23}+6w_{22}-4w_{21}\right]+cw_{22}-cw_{12}-\rho\omega^2 A_2 w_{22}=0$$
$$n=3 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[7w_{23}-4w_{22}+w_{21}\right]+cw_{23}-cw_{13}-\rho\omega^2 A_2 w_{23}=0 \qquad (4.16)$$

elde edilir.

Daha önce basit destekli durum için belirtildiği gibi (4.15) ve (4.16) denklemlerinde verilen 6 adet 6 bilinmeyenli denklemden oluşturulan öz-değer problemi ile A-A mesnetli KNT için boyutsuz frekans parametreleri bulunur.

4.4.4. Uçları ankastre olan (İç Tüp A-A, Dış Tüp A-A) çift duvarlı karbon nanotüpün 12 parça için titreşim analizi

Son olarak nanotüp 12 parçaya bölünmüştür, -1'den 13'e kadar numaralandırılmış toplam 14 düğüm noktası vardır.

1. tüpü incelersek;

Burada, 0<x<L; h=L/12; n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11; $-w_{11}=w_{1-1}$, $-w_{1(10)}=w_{1(13)}$ ve $w_{10}=w_{1(12)}=0$ olarak alınır.

$$n=1 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{13}-4w_{12}+6w_{11}-4w_{10}+w_{1-1}\right]+cw_{11}-cw_{21}-\rho\omega^2 A_1 w_{11}=0$$

$$n=2 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{14}-4w_{13}+6w_{12}-4w_{11}+w_{10}\right]+cw_{12}-cw_{22}-\rho\omega^2 A_1 w_{12}=0$$

$$n=3 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{15}-4w_{14}+6w_{13}-4w_{12}+w_{11}\right]+cw_{13}-cw_{23}-\rho\omega^2 A_1 w_{13}=0$$

$$n=4 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{16}-4w_{15}+6w_{14}-4w_{13}+w_{12}\right]+cw_{14}-cw_{24}-\rho\omega^2 A_1 w_{14}=0$$

$$n=5 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{17}-4w_{16}+6w_{15}-4w_{14}+w_{13}\right]+cw_{15}-cw_{25}-\rho\omega^2 A_1 w_{15}=0$$

$$n=6 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{18}-4w_{17}+6w_{16}-4w_{15}+w_{14}\right]+cw_{16}-cw_{26}-\rho\omega^2 A_1 w_{16}=0$$

$$n=7 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{19}-4w_{18}+6w_{17}-4w_{16}+w_{15}\right]+cw_{17}-cw_{27}-\rho\omega^2 A_1 w_{17}=0$$

$$n=9 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{1(11)}-4w_{1(10)}+6w_{19}-4w_{18}+w_{17}\right]+cw_{19}-cw_{29}-\rho\omega^2 A_1 w_{19}=0$$

$$n=10 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{1(12)}-4w_{1(11)}+6w_{1(10)}-4w_{19}+w_{18}\right]+cw_{1(10)}-cw_{2(10)}-\rho\omega^2 A_1 w_{1(10)}=0$$

$$n=11 \text{ iken } \frac{EI_1}{h^4}\left[w_{1(13)}-4w_{1(12)}+6w_{1(11)}-4w_{1(10)}+w_{19}\right]+cw_{1(11)}-cw_{2(11)}-\rho\omega^2 A_1 w_{1(11)}=0$$

(4.17)

elde edilir.

2. tüpü incelersek;

Burada, 0<x<L; h=L/12; n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11; $-w_{21}=w_{2\text{-}1}$, $-w_{2(11)}=w_{2(13)}$ ve $w_{20}=w_{2(12)}=0$ olarak alınır.

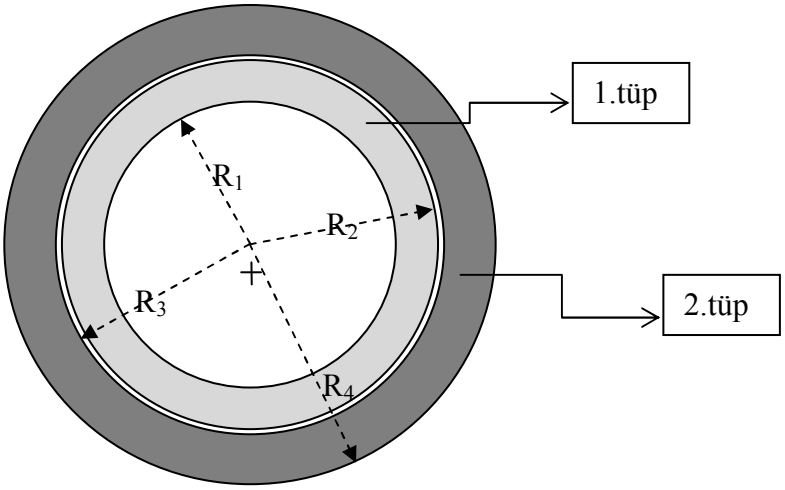
$$n=1 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{23}-4w_{22}+6w_{21}-4w_{20}+w_{2-1}\right]+cw_{21}-cw_{11}-\rho\omega^2 A_2 w_{21}=0$$
$$n=2 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{24}-4w_{23}+6w_{22}-4w_{21}+w_{20}\right]+cw_{22}-cw_{12}-\rho\omega^2 A_2 w_{22}=0$$
$$n=3 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{25}-4w_{24}+6w_{23}-4w_{22}+w_{21}\right]+cw_{23}-cw_{13}-\rho\omega^2 A_2 w_{23}=0$$
$$n=4 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{26}-4w_{25}+6w_{24}-4w_{23}+w_{22}\right]+cw_{24}-cw_{14}-\rho\omega^2 A_2 w_{24}=0$$
$$n=5 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{27}-4w_{26}+6w_{25}-4w_{24}+w_{23}\right]+cw_{25}-cw_{15}-\rho\omega^2 A_2 w_{25}=0$$
$$n=6 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{28}-4w_{27}+6w_{26}-4w_{25}+w_{24}\right]+cw_{26}-cw_{16}-\rho\omega^2 A_2 w_{26}=0$$
$$n=7 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{29}-4w_{28}+6w_{27}-4w_{26}+w_{25}\right]+cw_{27}-cw_{17}-\rho\omega^2 A_2 w_{27}=0$$
$$n=8 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{2(10)}-4w_{29}+6w_{28}-4w_{27}+w_{26}\right]+cw_{28}-cw_{18}-\rho\omega^2 A_2 w_{28}=0$$
$$n=9 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{2(11)}-4w_{2(10)}+6w_{29}-4w_{28}+w_{27}\right]+cw_{29}-cw_{19}-\rho\omega^2 A_2 w_{29}=0$$
$$n=10 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{2(12)}-4w_{2(11)}+6w_{2(10)}-4w_{29}+w_{28}\right]+cw_{2(10)}-cw_{1(10)}-\rho\omega^2 A_2 w_{2(10)}=0$$
$$n=11 \text{ iken } \frac{EI_2}{h^4}\left[w_{2(13)}-4w_{2(12)}+6w_{2(10)}-4w_{2(9)}+w_{2(8)}\right]+cw_{2(11)}-cw_{1(11)}-\rho\omega^2 A_2 w_{2(11)}=0$$

(4.18)

elde edilir. Genel formülasyon bu şekilde elde edildikten sonra takip eden bölümde nümerik sonuçlar verilecektir.

4.5. Sayısal Sonuçlar ve Yorum

Bu kısımda daha önce parametrik olarak elde edilmiş ifadeler nümerik olarak hesaplanacaktır. Şekil 2.8'de çift duvarlı bir KNT'ün kesit geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Çift duvarlı bir karbon nanotüpün kesit geometrisi

Hesapları yapılan KNT'ün boyutları, malzeme ve yük aşağıdaki gibi seçilmiştir.

- r_1=0.175nm
- r_2=r_3=0.525nm
- r_4=0.875nm
- E=1 TPa

Farklı sınır şartlarındaki ÇDKNT için farklı adım sayılarında bulunan boyutsuz frekans parametre değerleri Tablo 4.1- Tablo 4.10'da verilmiştir. %Hata ve % Fark aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

% Hata=(Esas sonuç-12 terim sonucu)×100/(Esas sonuç)

% Fark=(12 terim sonucu-10 terim sonucu)×100/(12 terim sonucu)

Tablolara göre n parça sayısı arttırıldığında frekans parametrelerinin belli bir değere yakınsadığı görülmektedir. 10 ve 12 terim ile yapılan çözümlerde elde edilen sonuçlar arası fark en az % 0.17 en çok % 2.84 değerindedir. Bu sebeple tüm hesaplamalar 12 terim alarak gerçekleştirilmiştir. Yakınsama çalışmaları incelendiğinde ankastre mesnetli sınır şartı için yakınsamanın göreceli olarak daha yavaş olduğu söylenebilir.

Tablolar incelendiğinde, Basit destekli KNT' lerin ankastre mesnetli KNT' lere göre daha yüksek frekans parametrelerine sahip olduğu gözlenmektedir. İç ve dış tüpleri aynı şekilde mesnetlenmiş tüplerin boyutsuz frekans parametreleri yaklaşık olrak aynı olmaktadır. İç ve dış tüplerin farklı mesnetlendiği durumda boyutsuz freakans parametreleri c van der Waals katsayısının etilenmekte ve iki tüp arasında etkileşim söz konusu olmaktadır. Bu durumda freakans parameteresi yeni bir dizilişe sahip olmaktadır. Şöyleki bazı frekanslar ÇDKNT'ü oluşturan tekil tüplerin frekansları arasında iken bazıları bu frekansların dışında yer almaktadır.

4.5.1. İç Tüp ve Dış Tüpün Değişik Sınır Şartlarındaki Sayısal Sonuçları

Çizelge 4.1. B-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi

n	1. Frekans	2. Frekans	3. Frekans
4	3.062	5.656	7.392
6	3.106	6.000	8.485
8	3.122	6.123	8.889
10	3.128	6.180	9.079
12	3.132	6.212	9.184
Esas Sonuç	3.141	6.283	9.424
% Hata	0.28	1.13	2.54

Çizelge 4.2. A-A sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi

n	1. Frekans	2. Frekans	3. Frekans
4	4.234	6.260	7.558
6	4.485	7.022	9.132
8	4.586	7.352	9.848
10	4.636	7.521	10.224
12	4.664	7.618	10.444
Esas Sonuç	4.730	7.853	10.995
% Hata	1.39	2.99	5.011

Çizelge 4.3. A-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi

n	1. Frekans	2. Frekans	3. Frekans
4	3.676	5.992	7.484
6	3.809	6.541	8.830
8	3.858	6.761	9.390
10	3.882	6.867	9.669
12	3.896	6.927	9.828
Esas Sonuç	3.926	7.068	10.210
% Hata	0.76	1.99	3.74

Çizelge 4.4. İç tüp B-B ve dış tüp B-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi

n	1. Frekans	2. Frekans	3. Frekans
4	3.068	5.658	7.391
6	3.110	6.001	8.485
8	3.126	6.123	8.889
10	3.134	6.181	9.080
12	3.138	6.212	9.184
Esas Sonuç	3.141	6.283	9.424
%Hata	0.28	1.13	2.54

Çizelge 4.5. İç tüp A-A ve dış tüp A-A sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi

n	1. Frekans	2. Frekans	3. Frekans
4	4.237	6.261	7.558
6	4.487	7.023	9.132
8	4.588	7.353	9.847
10	4.638	7.487	10.225
12	4.666	7.532	10.444
% Fark	0.47	0.59	2.09

Çizelge 4.6. İç tüp A-B ve dış tüp A-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi

	1. Frekans	2. Frekans	3. Frekans
4	3.677	5.990	7.484
6	3.809	6.541	8.831
8	3.859	6.760	9.140
10	3.883	6.867	9.142
12	3.896	6.927	9.143
%Fark	0.33	0.86	0.001

Çizelge 4.7. İç tüp A-A ve dış tüp B-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi

n	1. Frekans	2. Frekans	3. Frekans
4	3.300	5.740	7.411
6	3.424	6.148	8.546
8	3.479	6.304	8.947
10	3.506	6.379	9.089
12	3.522	6.420	9.133
%Fark	0.45	0.63	0.48

Çizelge 4.8. İç tüp A-A ve dış tüp A-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi

n	1. Frekans	2. Frekans	3. Frekans
4	3.777	6.024	7.491
6	3.949	6.603	8.853
8	4.019	6.837	9.197
10	4.053	6.953	9.208
12	4.073	7.018	9.212
%Fark	0.49	0.92	0.043

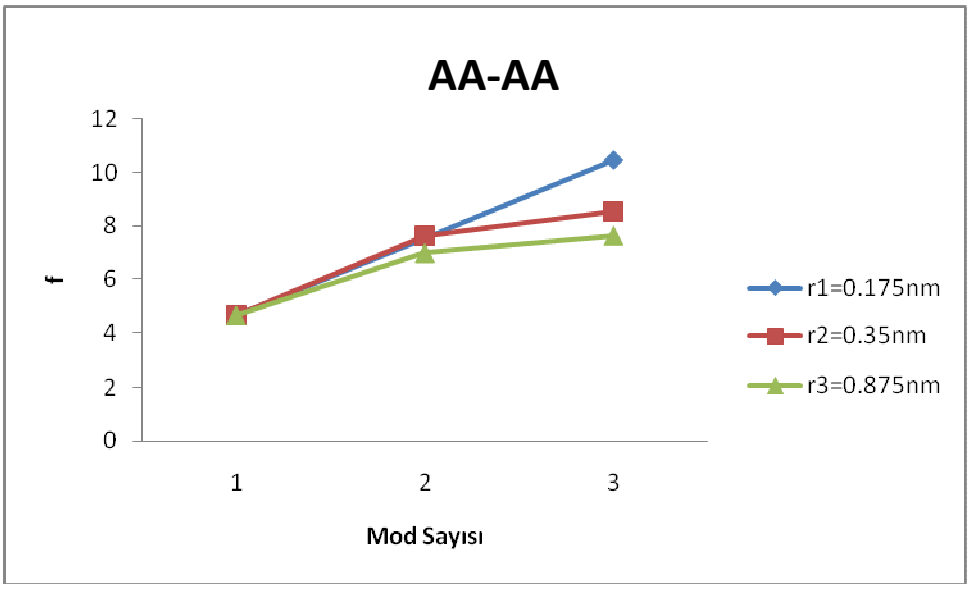
Çizelge 4.9. İç tüp B-B ve dış tüp A-B sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi

n	1. Frekans	2. Frekans	3. Frekans
4	3.627	5.949	7.469
6	3.762	6.480	8.764
8	3.814	6.690	9.089
10	3.838	6.793	9.098
12	3.852	6.851	9.100
%Fark	0.36	0.84	0.02

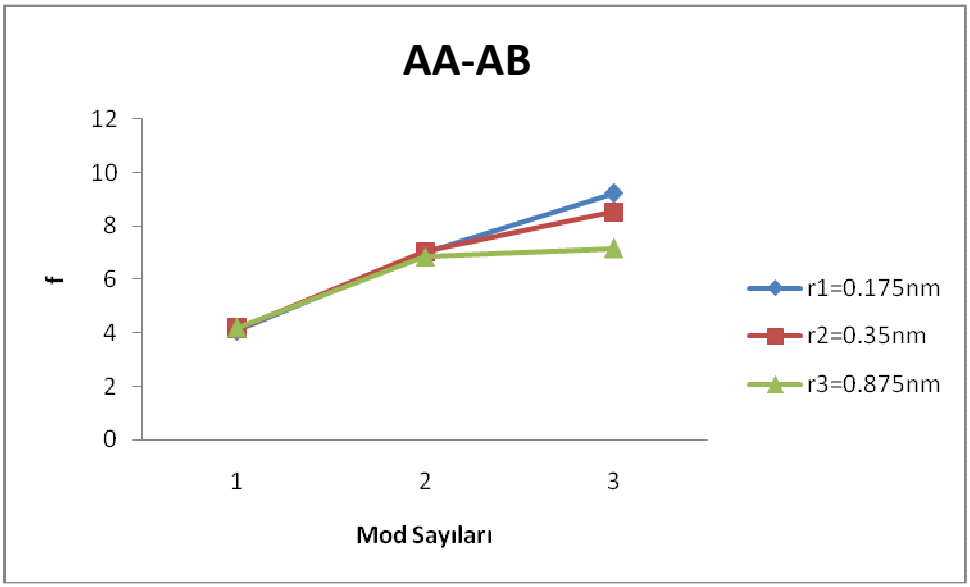
Çizelge 4.10. İç tüp B-B ve dış tüp A-A sınır şartına sahip KNT'ler için adım sayısı ile Boyutsuz Frekans Parametresinin değişimi

n	1. Frekans	2. Frekans	3. Frekans
4	4.135	6.188	7.533
6	4.383	6.903	8.971
8	4.484	7.208	9.092
10	4.534	7.363	9.098
12	4.562	7.450	9.101
%Fark	0.61	1.16	0.03

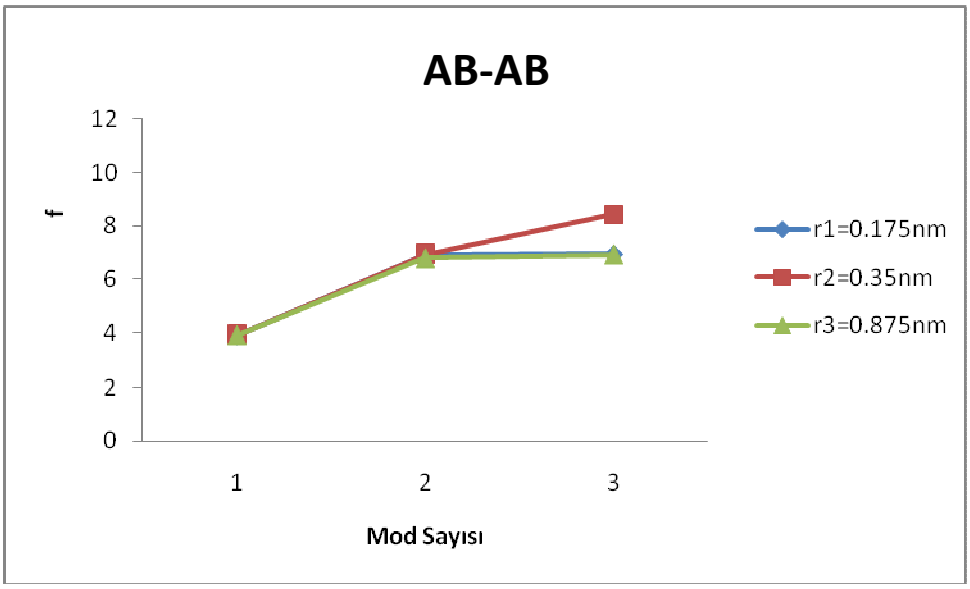
Boyutsuz ilk üç freakans parametresinin sınır şartları ve yarıçap ile değişimi şekil 4.9-4.15'te verilmiştir. Şekiller incelendiğinde ilk iki boyutsuz frekans parametresinin küçük yarıçaplarda hemen hemen aynı kaldığı, üçüncü frekans parametresinin ise yarıçapın artmasından etkilenerek azaldığı gözlenmektedir.



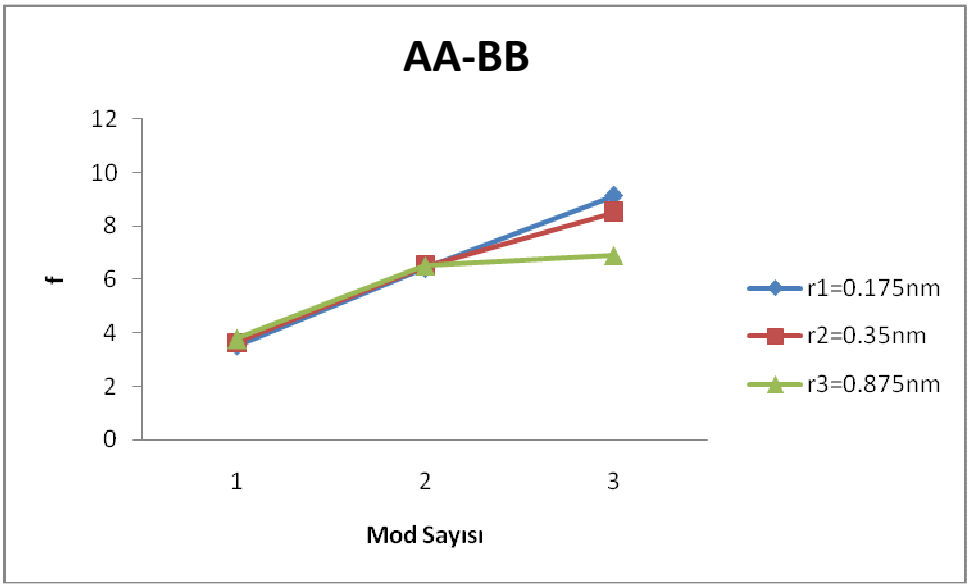
Şekil 4.9. Boyutsuz frekans parametresinin yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp AA-Dış tüp AA).



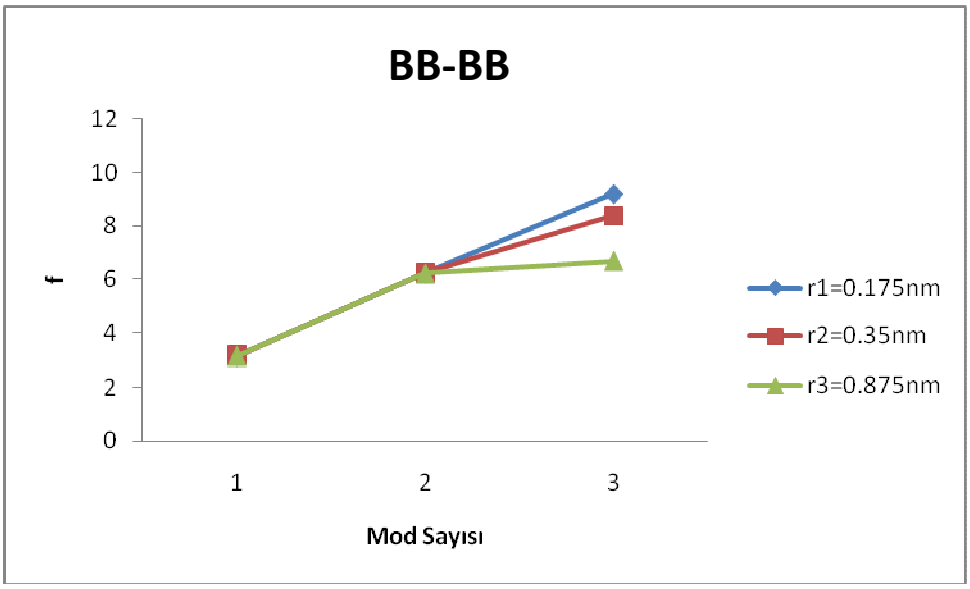
Şekil 4.10. Boyutsuz frekans parametresinin yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp AA-Dış tüp AB).



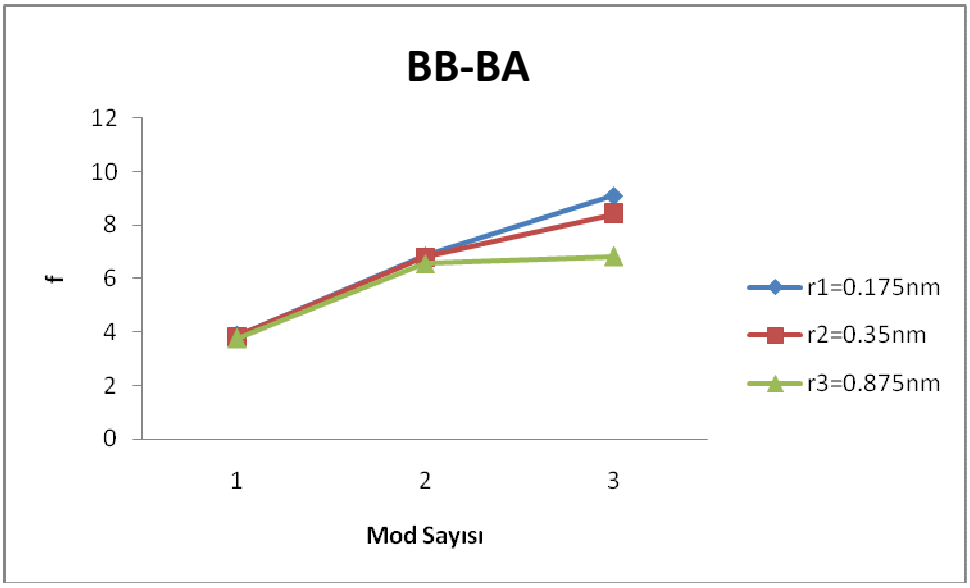
Şekil 4.11. Boyutsuz frekans parametresinin yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp AB-Dış tüp AB).



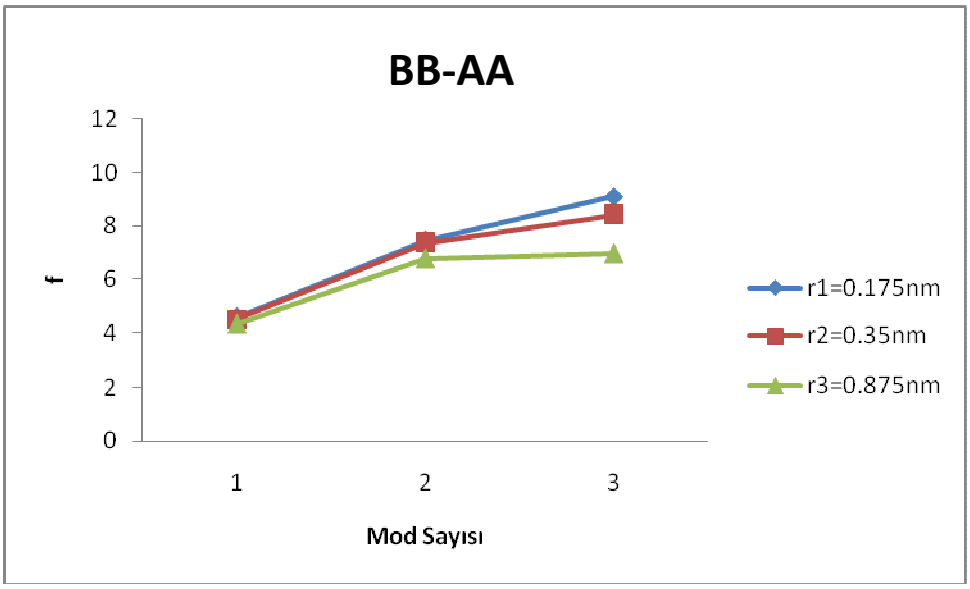
Şekil 4.12. Boyutsuz frekans parametresinin yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp AA-Dış tüp BB).



Şekil 4.13. Boyutsuz frekans parametresinin yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp BB-Dış tüp BB).



Şekil 4.14. Boyutsuz frekans parametresinin yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp BB-Dış tüp BA).



Şekil 4.15. Boyutsuz frekans parametresinin yarıçap ve mod sayısı ile değişimi (iç tüp BB-Dış tüp AA).

van der Waals etkileşim katsayısının çok duvarlı KNT lerin titreşimleri üzerine etkisi örnek olarak AA-BB sınır şartı için çizelge 4.1'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde c=0 için iki tüp birbirinden ayrılmakta ve boyutsuz frekanslar sırasıyla tek tek her bir tüpün değerlerini almaktadır. İncelenen durum için birinci frekans (3.132) SS sınır şartındaki tek tüpün birinci frekansı, ikinci frekans (4.664) AA sınır şartındaki tek tüpün birinci frekansı ve üçüncü frekans (6.212) BB sınır şartındaki tek tüpün İkinci frekansına karşılık gelmektedir. Etkileşim katsayının artmasıyla iki tüp arasında etkileşim başlayarak ortak hareket ortaya çıkmaktadır. Etkileşim katsayısının dahada artmasıyla iki tüp limit durumda tek bir malzeme olarak davranmaya başlamaktadır.

Çizelge 4.11. AA-BB sınır şartındaki tüplerin boyutsuz frekans parametreleririn c van der waals katsayısı ile değişimi

Mod	c(TPa)					
	0	0.0694	10	100	1000	10000
1	3.132	3.636	3.89	3.907	3.909	3.909
2	4.664	6.486	6.715	6.729	6.731	6.732
3	6.212	8.488	9.539	9.551	9.552	9.553

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Bu çalışmada çok duvarlı karbon nanotüplerin titreşim davranışları sürekli ortam Euler-Bernoulli teorisi kiriş modelleri kullanılarak incelenmiştir. Tek duvarlı karbon nanotüplerin titreşimi analitik olarak incelenmiştir. Basit destekli çok duvarlı tüplerin titreşimi Navier tipi çözüm yöntemiyle incelenmiştir. Genel sınır şartlarındaki çok duvarlı karbon nanotüpler için bir Sonlu farklar formülasyonu geliştirilmiştir. Genel formülasyondan sonra farklı sınır şartları ve geometrik parametreler için tek ve iki duvarlı karbon nanotüplerin titreşim davranışı incelenmiştir. Sonlu farklar yönteminin çok duvarlı KNT' lerin titreşim davranışının modellenmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir. Kullanılan kiriş modelinde yerel burkulmalar gözlenmemiştir. İleriki çalışmalarda kabuk modellerinin kullanılmasıyla bu tip davranışların da gösterilebileceği umulmaktadır.

KAYNAKLAR

Aydogdu, M., M.C.Ece., 2007, 'Vibration and buckling of in-plane loaded double-walled carbon nano-tubes', Turkish J. Eng. Env.Sci, 31, 305-310.

Aydogdu, M., 2008, 'Vibration of multi-walled carbon nanotubes by generalized shear deformation theory', International Journal of Mechanical Sciences, 50, 837-844.

Aydogdu, M., 2008, 'Effects of shear deformation on vibration of doublewalled carbon nanotubes embedded in an elastic medium', Arch Appl Mech. 78(9), 711-723.

Aydogdu M, Karaoglu P, Seçgin S, Buckling Analysis of Double-Walled Carbon nanotubes embedded in an elastic medium, NanotrIV, İTÜ, 9-13 Haziran 2008.

Batra, R.C. Sears, A., 2007, 'Continuum models of multi-walled carbon nanotubes', International Journal of Solids and Structures 44, 7577–7596

Belin, T. and Epron, F., 2005, 'Characterization Methods of Carbon Nanotubes: a Review' , Materials Science and Engineering B, 119, 105-118.

Delmotte, J. P. S. and Rubio, A., 2002, 'Mechanical Properties of Carbon Nanotubes : a Fiber Digest for Beginners' , Carbon, 40, 1729-1734.

Falvo, M. R., Clary, G. J., Taylor II, R. M., Chi, V., Brooks Jr, F. P., Washburn, S. and Superfine, R., 1997, 'Bending and Buckling of Carbon Nanotubes Under Large St

Gibson R.F., Ayorinde E.O., Wen Y.F., 2007, 'Vibrations of carbon nanotubes and their composites:A review', Composite Sciences and Technology, 67, 1-28.

Harik, V. M., 2001, 'Ranges of Applicability for The Continuum Beam Model in The Mechanics of Carbon Nanotubes and Nanorods' , Solid State Communications, 120, 331-335.

He, X.Q, Eisenberger M., Liew K.M., 2006, 'The effect of van der Waals interaction modelling on the free vibration characterictics of multiwalled carbon nanotubes', Journal of Applied Physics, 100, 124317

Iijima, S., 1991, 'Helical microtubes of graphitic carbon', Nature, 354, 56-58.

Li C, Chou T-W., 2003, 'A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes', Int J Solids Struct, 40:2487-99.

rain' , Nature, 389.

Li, C. and Chou, T., 2004, 'Modeling of Elastic Buckling of Carbon Nanotubes by Molecular Structural Mechanics Approach' , Mechanics of Materials, 36, 1047-1055.

Ru, C.Q., 2000a, **'**Effective bending stiffness of carbon nanotubes', Physical Review B, 62, 9973-9976.

Ru, C.Q, 2000b, 'Elastic buckling of single-walled carbon nanotube ropes under high pressure',Physical Review B,62, 10405-10408.

Steven, C.C. ve Raymond P.C., 2003, 'Yazılım ve Programlama Uygulamalarıyla Mühendisler için Sayısal Yöntemler', McGrawHill.

Seçgin, S.,2010, Karbon nanotüplerin çökme davranışlarının sürekli ortam kiriş modelleri kullanılarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Thostenson, E. T., Ren, Z. and Chou, T., 2001, 'Advances in The Science and Technology of Carbon Nanotubes and Their Composites: a Review' , Composites Science and Technology, 61, 1899-1912.

Wang, Q., Varadan, V.K., 2005, 'Wave characteristics of carbon nanotubes', International Journal of Solids and Structures, 43, 254-265.

Wang, C.Y., Ru C.Q., ve Mioduchowski A., 2005, 'Free vibration of multiwall carbon nanotubes', Journal of Applied Physics, 97, 114323.

Wong, E. W., Sheehan, P. E. and Lieber, C. M., 1997, 'Nanobeam Mechanics: Elasticity, Strength, and Toughness of Nanorods and Nanotubes' , Science, 277.

Yoon, J., Ru, C.Q., Mioduchowski, A, 2002, **'**Non-Coaxial resonance of an isolated multiwall carbon nanotube',Phys Rev B, 66, 233402.

Yoon, J., Ru, C.Q., Mioduchowski, A, 2003a, **'**Vibration of embedded multiwall carbon nanotubes',Compos Sci Technol, 63, 1533-1542.

Yoon, J., Ru, C.Q., Mioduchowski, A, 2003b, **'**Sound wave propogation in multiwall carbon nanotubes', J Appl Phys, 93, 4801-4806.

Yoon, J., Ru, C.Q., Mioduchowski, A., 2004, **'**Timoshenko-beam effects on transverse wave propagation in carbon nanotubes', Composites Part B: Engineering, 35, 87-93.

Yoon, J., Ru, C.Q., Mioduchowski, A., 2005, **'**Terahertz vibration of short carbon nanotubes modelled as timoshenko beams', Transactions of the ASME, 72, 10-17.

(http://nanoteknolojinedir.com/?p=16).

(http://www.nanoturk.com/NT_tarihi.htm).

(*www.ataunichem.net/pdf.php?type=N&item_id=1).*

(*www.kimyaevi.org/TR/Yonlendir.aspx?.).*

(http://80.251.40.59/eng.ankara.edu.tr/ycenger/Bitirme%20tezi-Nanoteknoloji.htm).

ÖZGEÇMİŞ

Pınar KARAOĞLU, 1985 yılında Kırklareli'de doğdu. Orta öğretimini Kırklareli Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2007 yılında Celal Bayar Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesinin Kimya Bölümünden mezun oldu. 2007 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesinin Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2008 yılından bu yana Besa Plastik Suni Deri A.Ş ' de üretim depatmanında çalışmaktadır.