

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİFT DUVARLI TÜPLERDE BURKULMANIN BAŞLANGIÇ
DEĞERLERİ YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Reza J.TORKAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİFT DUVARLI TÜPLERDE BURKULMANIN BAŞLANGIÇ
DEĞERLERİ YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Reza J.TORKAN
(501091140)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Reha ARTAN

ŞUBAT 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501091140 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Reza J.TORKAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇİFT DUVARLI TÜPLERDE BURKULMANIN BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Reha ARTAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Faruk YUKSELER**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr.Ünal ALDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **1 ARALIK 2011**
Savunma Tarihi : **27 ŞUBAT 2012**

ÖNSÖZ

Bu çalışmada Çift Duvarlı Tüplerde Burkulmanın Başlangıç Değerleri Yöntemiyle İncelenmesi dir.Hayatım boyunca benden maddi-manevi yardımlarını esirgemeyen aileme teşekkür ederim.Tez süresince bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım hocam Sayın Prof. Dr. Raha ARTAN'e teşekkürlerimi sunarım.Çalışmalarımda bana her türlü yardımı ve çalışma ortamını sağlayan hocam Sayın Serdar AMASRALI'ya, teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık 2011

Reza J.TORKAN
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. TEK ve ÇİFT DUVARLI ÇUBUKLARIN BURKULMASI.....	5
2.1 Nanoteknoloji Kısaca Tarihi Gelişimi ve ABD de Uygulama Alanları	5
2.2 Nanoteknolojinin Türkiye’deki Uygulama Alanları	8
2.3 Nanoteknolojinin Amaçları.....	8
2.4 Nanoteknolojinin Gelecekteki Uygulama Alanları	8
2.4.1 Malzeme ve imalat sektörü.....	9
2.4.2 Nanoelektronik ve bilgisayar teknolojileri	9
2.4.3 Tıp ve sağlık sektörü	9
2.4.4 Havacılık ve uzay araştırmaları	10
2.4.5 Çevre ve enerji	10
2.4.6 Bioteknoloji ve tarım.....	11
2.4.7 Savunma sektörü.....	11
2.4.8 Nanoteknoloji ile ilişkili potansiyel hükümet uygulamaları	11
2.4.9 Bilim ve eğitim	12
2.5 Nanoteknolojinin Uygulanabilmesi.....	12
2.6 Karbon Atomu	12
2.6.1 Karbon atomu allotrop’ları	13
2.7 Karbon Nanotüpü	13
2.7.1 Tek duvarlı karbon nanotüpleri ve çok duvarlı karbon nanotüpler	14
2.7.2 Tüplerin özellikleri.....	16
2.8 Grafen	18
2.8.1 Tanımı, yapısı ve kullanım alanları.....	18
2.8.2 Kimyasal düzenleme	19
2.8.3 Elektron taşıma	19
2.8.4 Sentezlenmesi	21
2.8.4.1 Kaydırma metodu	22
2.8.4.2 Epitaxial büyütme.....	22
2.8.4.3 Silisyum-karbon metodu.....	22
2.8.4.4 Kimyasal ayrıştırma metodu	22
2.8.5 Atomik yapı	22
2.8.6 Elektronik yapı.....	23
2.8.7 Grafen nanoşeritler.....	24
2.8.8 Kullanım alanları	25

2.8.8.1 Grafen transistor.....	25
2.8.8.2 Grafen ve pil teknolojisi	26
2.8.8.3 Grafen sensörler	26
2.8.8.4 Grafen ve hidrojen depolama.....	26
2.8.8.5 Grafen ve spintronik.....	27
2.9 Karbon Nanotüplerin Özellikleri	27
2.9.1 Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri	28
2.10 Karbon Nanotüplerin Uygulama Alanları	29
2.11 Literatürde Karbon Nanotüpleri Bükülmesi ve Matematiksel İfadeleri.....	30
2.12 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpler	33
2.12.1 Çift duvarlı karbon nanotüplerin bükülmesi elastik modeller.....	33
2.12.2 Termal açıdan değerlendirilmesi	35
2.12.3 Yerel olmayan elastisite teorisi ile nanotüplerin ilişkisi.....	36
2.13 Çift ve Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerin Burkulması.....	36
3. ÇİFT DUVARLI TÜPLERDE BURKULMANIN BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ	37
3.1 İki Ucu Basit Mafsallı Kirişte Burkulma Yükleri.....	37
3.1.1 Burkulmaya ait denklem sistemi (tek duvarlı çubukta).	37
Örnek : İki ucu mafsallı tek duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı.	38
3.1.2 Burkulmaya ait denklem sistemi (çift duvarlı çubukta).....	40
Örnek : İki ucu mafsallı çift duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı.	42
3.2 Bir Ucu Ankastre Diğer Ucu Serbest Kirişte Burkulma Yükleri.....	45
3.2.1 Bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek duvarlı çubuğun burkulma yükü. 45	
Örnek : Bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı.....	45
3.2.2 Bir ucu ankastre diğer ucu serbest çift duvarlı çubuğun burkulma yükü 47	
Örnek : Bir ucu ankastre diğer ucu serbest çift duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı	47
3.3 İki Ucu Ankastre Kirişte Burkulma Yükleri.....	50
3.3.1 İki ucu ankastre tek duvarlı çubuğun burkulma yükü	50
Örnek : İki ucu ankastre tek duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı.	50
3.3.2 İki ucu ankastre çift duvarlı çubuğun burkulma yükü	52
Örnek : İki ucu ankastre çift duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı.....	52
3.4 Bir Ucu Ankastre Diğer Ucu Mafsallı Kirişte Burkulma Yükleri	55
3.4.1 Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı tek duvarlı çubuğun burkulma yükü55	
Örnek : Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı tek duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı	55
3.4.2 Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı çift duvarlı çubuğun burkulma yükü57	
Örnek : Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı çift duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı.....	57
4. C KATSAYI İLE BURKULMA YÜKÜNÜN DEĞİŞİMİ	61
4.1 İki Ucu Basit Mafsallı Tek ve Çift Duvarlı Çubuğun Burkulma Yükleri.....	61
4.2 Bir Ucu Ankastre Diğer Ucu Serbest Tek ve Çift Duvarlı Çubuğun Burkulma Yükleri.	62
4.3 İki Ucu Ankastre Tek ve Çift Duvarlı Çubuğun Burkulma Yükleri.....	63
4.4 Bir Ucu Ankastre Diğer Ucu Mafsallı Tek ve Çift Duvarlı Çubuğun Burkulma Yükleri.	64
SONUÇLAR	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

SWNTs : Tek duvarlı nanotüpler
MWNTs : Çift duvarlı nanotüpler

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1	: İki ucu mafsallı tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları	44
Çizelge 3.2	: Bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.....	49
Çizelge 3.3	: İki ucu ankastre tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.....	54
Çizelge 3.4	: Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.....	59
Çizelge 4.1.1	: İki ucu mafsallı tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları	61
Çizelge 4.2.1	: Bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.....	62
Çizelge 4.3.1	: İki ucu ankastre tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.....	63
Çizelge 4.4.1	: Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.....	64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Karbon allotropları	13
Şekil 2.2	: Bir kömür tabakasından dürülerek betimlenmiş bir karbon nanotüp. ...	14
Şekil 2.3	: Nanotüp sarımı	15
Şekil 2.4	: Çok duvarlı nanotüpyapısı	15
Şekil 2.5	: Tek ve çift duvarlı karbon nanotüpler	16
Şekil 2.6	: Karbon nanotüpü	17
Şekil 2.7	: Tek katmanlı karbon nanotüp.	17
Şekil 2.8	: Grafen yüzeyi	18
Şekil 2.9	: Karbon nanotüp oluşumlu enerji iletim kablosu.....	20
Şekil 2.10	: Grafin	20
Şekil 2.11	: Yarıçap yönündeki bir iç dış basınç altında aksel sıkıştırılmış bükülmesi	31
Şekil 2.12	: Çift duvarlı karbon nanotüpün şematik gösterimi	33
Şekil 2.13	: Aksel sıkışma altında çift duvarlı karbon nanotüp elastik modeli	35
Şekil 3.1	: Tek duvarlı çubuk	37
Şekil 3.2	: İki ucu mafsallı çubuğun	38
Şekil 3.3	: Çift duvarlı çubuk	40
Şekil 3.4	: İki ucu mafsallı çift duvarlı çubuk	42
Şekil 3.5	: Bir ucu ankastre diğer ucu serbest	45
Şekil 3.6	: Bir ucu ankastre diğer ucu serbest çift duvarlı çubuk.....	47
Şekil 3.7	: İki ucu ankastre tek duvarlı çubukta	50
Şekil 3.8	: İki ucu ankastre çubuğu çift duvarlı çubuk	52
Şekil 3.9	: Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı çubuğun tek duvarlı çubukta.....	55
Şekil 3.10	: Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı çubuğun çift duvarlı çubuk.....	57

ÇİFT DUVARLI TÜPLERDE BURKULMANIN BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

ÖZET

Nanometre, metrenin milyarda biri anlamına gelip ($1\text{nm}=10^{-9}\text{ m}$) genellikle 1-100 nanometre (nm) skalasında maddeyi atomik ve moleküler düzeyde inceleyip, malzeme ve ürüne dönüştürmek için kullanılan teknolojiyi inceleyen bir bilim dalıdır. Diğer bir ifadeyle nanometreyi fiziksel olarak görüntülemek istersek bir saç telinin çapı 100.000 nanometre, karınca başının genişliği 1.000.000 nanometre ve bir DNA molekülü 2.5 nanometredir. Nanoteknoloji tek bir anabilim dalını içine almayıp mekanik, malzeme, inşaat, elektrik mühendislikleriyle, kimya, fizik, biyoloji, bilimlerini bir araya getirerek moleküler düzeyde ürün geliştirmenin önünü açmıştır.

Nanoteknoloji, atomlar ve moleküller seviyesinde 1 ile 100 nm boyut skalasında çalışarak, gelişmiş ve tamamen yeni fiziksel, kimyasal, biyolojik özelliklere sahip yapılar elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Bu teknoloji sayesinde, bu boyutlardaki yapıların, malzeme ve sistemlerin anlaşılması kontrolü ve atomsal seviyede değiştirilip işlenmesi sonucunda ortaya çıkan değişik özellikleri kullanarak yeni teknolojik nano ölçekte aygıtların, malzemelerin, sistemlerin üretilmesi ve bu aygıtların günlük hayatımızda kullanılır hale getirilmesi mümkün olmuştur.

Nanoteknoloji' nin uygulanabilir ölçeğinin maddenin en küçük yapı birimi olan atomun düzeyinde olması nedeniyle atomların yapısı ve aralarındaki ilişki iyi bilinmelidir ki bu atom ve molekül özellikleri kullanılarak benzeri görülmemiş ürünler üretilir bilinsin. Bu nedenle Nanoteknolojinin uygulanabilir alanları ısıtmadan, mutfak ürünlerine, ses, kamera, film bilgisayar parçaları, televizyon ürünlerinden gıda kaplamalarına, kişisel bakım, güneş kremlerinden, ev ve bahçe temizlik ürünlerine kadar oldukça geniştir.

Bu çalışma da tek ve çift duvarlı çubukların burkulma yükleri başlangıç değerleri yöntemiyle hesaplanmıştır. Nanoteknoloji de kullanılan karbon nanotüpler genellikle tek duvarlı veya çift duvarlı çubuklardır. Özellikle çift duvarlı tüplerin mekanik davranışlarının incelenmesi çok önemlidir. Çift duvarlı tüplerde iki tüp arasındaki etkileşim van der Waals kuvveti ile göz önüne alınır. Başlangıç değerleri yöntemi, probleme ait bilinmeyenlerin başlangıçtaki değerlerinin bilinmesi halinde, problemin çözümünün sistematik olarak veren bir yöntemdir. Bu yöntem ile tek duvarlı bir çubuğun burkulma yükü 2×2 lik bir determinant yardımıyla olmaktadır. Aynı problemin klasik yöntem ile çözümünde karşımıza çıkan determinant 4×4 mertebesinde dir. Benzer şekilde çift duvarlı çubuğun burkulma yükleri başlangıç değerleri yöntemiyle 4×4 mertebesindeki determinantlarla klasik yöntemde ise 8×8 mertebesindeki determinantlarla yapılmaktadır. Tek ve çift duvarlı çubuklara ait burkulma yükleri çizelgeler halinde verilerek, elde edilen sonuçlar karşılaştırmıştır.

Çift duvarlı çubukların burkulma yükleri, tek duvarlı çubukların burkulma yüklerinden daha büyüktür.

INVESTIGATION OF BUKING PROBLEM IN DOUBLE WALLED BARS BY THE METHOD OF INITIAL VALUES

SUMMARY

In this study, the buckling load of single and double walled beams are calculated by the method of initial values. In generally, Single and Double walled nanotubes are widely used in nanotechnology. The study of mechanical behavior of double walled carbon nanotubes has great importance. The interaction between the inner and outer tubes are denoted by van der waals force. The method of initial values gives the values of the displacements and stress resultants throughout the rod once the initial displacements and initial stress resultants are known.

The buckling loads of a single-walled tube can be obtained by the determinant of 2x2 matrix in this method. 4x4 determinant appears in the solution of same problem with classical method. Similarly the buckling loads of a double-walled tube are calculated by the determinant of 4x4 matrix. 8x8 determinant appears in the solution of same problem. The buckling loads of single and double walled tubes are presented in tables. The buckling loads of double walled tubes are greater than the buckling loads of single walled tubes.

The equations of equilibrium, the constitutive relations and geometrical compatibility. Conditions of a rod in the plane are

$$\begin{aligned}\frac{dv}{dz} &= \varphi \\ \frac{d\varphi}{dz} &= -\frac{M}{EI} \\ \frac{dM}{dz} &= T + N\varphi \\ \frac{dT}{dz} &= 0\end{aligned}$$

Where v is deflection, φ is rotation around the binomial, M is bending moment and T is shear force. Above system can be written in matrix form as below

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{EI} & 0 \\ 0 & N & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix}$$

Or

$$\frac{d\vec{y}}{dz} = A\vec{y}$$

Where,

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{EI} & 0 \\ 0 & N & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix}$$

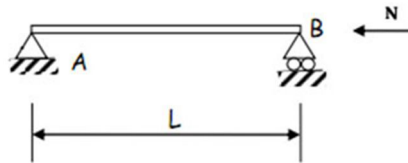
The solution of about system of differential equations is,

$$\vec{y} = e^{Az} \vec{y}_0$$

Where,

$$\vec{y}_0 = \begin{bmatrix} v(0) \\ \varphi(0) \\ M(0) \\ T(0) \end{bmatrix}$$

Example: The buckling load of a simple beam ,



Single-walled beam

In this case, two of initial values are known,

$$v(0)=M(0)=0$$

The other initial values can be obtained by using the boundary conditions,

$$v(L)=0, M(L)=0$$

The boundary conditions reach us to the following system,

$$\begin{pmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) \\ TM_{32}(L) & TM_{34}(L) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varphi(0) \\ T(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

The bucking determinant be comes,

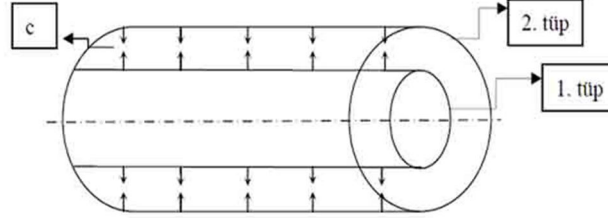
$$\det \begin{pmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) \\ TM_{32}(L) & TM_{34}(L) \end{pmatrix} = 0$$

The elements of Carry- Over matrix can be obtained analytically. In this thesis Carry-Over matrix will be calculated approximately. The series expansion of e^{Az} is,

$$e^{Az} = I + \frac{Az}{1!} + \frac{A^2 z^2}{2!} + \frac{A^3 z^3}{3!} + \dots$$

The elements of Carry- Over matrix is calculated by using about relation.

The governing equations for a double-walled beam are ,



Double-walled beam

$$\frac{dv_1}{dz} = \varphi_1$$

$$\frac{d\varphi_1}{dz} = -\frac{M_1}{EI_1}$$

$$\frac{dM_1}{dz} = T_1 + N\varphi_1$$

$$\frac{dT_1}{dz} = C(v_1 - v_2)$$

$$\frac{dv_2}{dz} = \varphi_2$$

$$\frac{d\varphi_2}{dz} = -\frac{M_2}{EI_2}$$

$$\frac{dM_2}{dz} = T_2$$

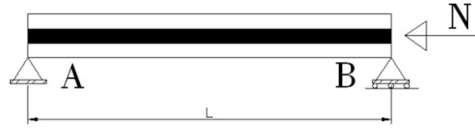
$$\frac{dT_2}{dz} = -C(v_1 - v_2)$$

Where v_1 is the deflection in outer tube, v_2 is the deflection in inner tube, φ_1 is the rotation about the binormal in outer tube, φ_2 is the rotation about the binormal in inner tube, M_1 is the bending moment in outer tube, M_2 is the bending moment in inner tube, T_1 is the shear force in outer tube, T_2 is the shear force in inner tube. The

stream $c(v_1-v_2)$ displays the interaction between the inner and outer tubes and called ad Van der waal force. This system can be written as,

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} v_1 \\ \phi_1 \\ M_1 \\ T_1 \\ v_2 \\ \phi_2 \\ M_2 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{EI_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{EI_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \phi_1 \\ M_1 \\ T_1 \\ v_2 \\ \phi_2 \\ M_2 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

Example: The buckling loads of a double-walled simple beam ,



Two-hinged, double-walled beam

The coefficient matrix A for a double walled tube is,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{EI_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{EI_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \phi_1 \\ M_1 \\ T_1 \\ v_2 \\ \phi_2 \\ M_2 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

The Carry-Over matrix can be found by using ,

$$e^{Az} = I + \frac{Az}{1!} + \frac{A^2 z^2}{2!} + \frac{A^3 z^3}{3!} + \dots$$

In this case four of initial values are known,

$$v_1(0)=M_1(0)=v_2(0)=M_2(0)=0$$

The other initial values can be obtained by the help of end conditions,

$$v_1(L)=M_1(L)=v_2(L)=M_2(L)=0$$

About conditions give the following relation,

$$\begin{bmatrix} v_1(z) \\ \varphi_1(z) \\ M_1(z) \\ T_1(z) \\ v_2(z) \\ \varphi_2(z) \\ M_2(z) \\ T_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TM_{11} & TM_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{18} \\ TM_{21} & TM_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{28} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ TM_{81} & TM_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_1(0) \\ 0 \\ T_1(0) \\ 0 \\ \varphi_2(0) \\ 0 \\ T_2(0) \end{bmatrix}$$

Then the buckling determinan becomes,

$$\det \begin{bmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) & TM_{16}(L) & TM_{18}(L) \\ TM_{32}(L) & TM_{34}(L) & TM_{36}(L) & TM_{38}(L) \\ TM_{52}(L) & TM_{54}(L) & TM_{56}(L) & TM_{58}(L) \\ TM_{72}(L) & TM_{74}(L) & TM_{76}(L) & TM_{78}(L) \end{bmatrix} = 0$$

1. GİRİŞ

Nanometre, metrenin milyarda biri anlamına gelip ($1\text{nm}=10^{-9}\text{ m}$) genellikle 1-100 nanometre (nm) skalasında maddeyi atomik ve moleküler düzeyde inceleyip, malzeme ve ürüne dönüştürmek için kullanılan teknolojiyi inceleyen bir bilim dalıdır. Diğer bir ifadeyle nanometreyi fiziksel olarak görüntülemek istersek bir saç telinin çapı 100.000 nanometre, karınca başının genişliği 1.000.000 nanometre ve bir DNA molekülü 2.5 nanometredir. Nanoteknoloji tek bir anabilim dalını içine almayıp mekanik, malzeme, inşaat, elektrik mühendislikleriyle, kimya, fizik, biyoloji, bilimlerini bir araya getirerek moleküler düzeyde ürün geliştirmenin önünü açmıştır.

Nanoteknoloji, atomlar ve moleküller seviyesinde 1 ile 100 nm boyut skalasında çalışarak, gelişmiş ve tamamen yeni fiziksel, kimyasal, biyolojik özelliklere sahip yapılar elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Bu teknoloji sayesinde, bu boyutlardaki yapıların, malzeme ve sistemlerin anlaşılması kontrolü ve atomsal seviyede değiştirilip işlenmesi sonucunda ortaya çıkan değişik özellikleri kullanarak yeni teknolojik nano ölçekte aygıtların, malzemelerin, sistemlerin üretilmesi ve bu aygıtların günlük hayatımızda kullanılır hale getirilmesi mümkün olmuştur [13].

Nanoteknoloji' nin uygulanabilir ölçeğinin maddenin en küçük yapı birimi olan atomun düzeyinde olması nedeniyle atomların yapısı ve aralarındaki ilişki iyi bilinmelidir ki bu atom ve molekül özellikleri kullanılarak benzeri görülmemiş ürünler üretilir bilinsin [1]. Bu nedenle Nanoteknolojinin uygulanabilir alanları ısıtmadan, mutfak ürünlerine, ses, kamera, film bilgisayar parçaları, televizyon ürünlerinden gıda kaplamalarına, kişisel bakım, güneş kremlerinden, ev ve bahçe temizlik ürünlerine kadar oldukça geniştir.

Nanoteknolojiyi uygulanabilir kılan şey, atomların yapısı ve aralarındaki mükemmel organizasyon özelliği olduğundan, atomların yapısının ve davranış biçimlerinin çok iyi bilinmesi gerekir:

Örneğin, külçe altın oda sıcaklığında tepkimeye girmezken, 3-5 nanometre boyutlarındaki altın parçacıkları, pek çok tepkimeyi tetikleyebiliyor. Nano altınların bu özelliğini keşfeden bir Japon firması, bunlardan tuvaletlerde kullanılmak üzere "koku yiyiciler" geliştirmiş. Malzemelerin nano ölçeklerde kazandıkları değişik özellikler, bunlara giderek artan bir endüstriyel değer kazandırıyor. Bazı şirketler, sıradan plastiğin üzerine nano ölçekli çubuklar yerleştirerek malzemenin gücünü ve darbeye direncini güçlendirmeye çalışıyorlar. Askeri laboratuvarlar, anthrax gibi biyolojik silahları belirleyen nano ölçekli sondalar geliştiriyorlar. Ve bir-iki nanometre çapında, kamış biçimli moleküller olan karbon nano tüpler, biçimlerine bağlı olarak elektriği metal ya da yarı iletken özellikte taşıyabiliyorlar ve daha şimdiden transistör ve diyot gibi elektrik malzemelerinde yaygın kullanım kazanmış bulunuyorlar.

Grafit tabakalarının sayısına göre tek duvarlı nano tüpler (SWNTs) ve çok duvarlı nanotüpler (MWNTs) olmak üzere iki temel tipte nanotüp vardır. Tek duvarlı nanotüpler temel silindirik yapı olarak düşünülebilir. Çok duvarlı nanotüpler ise iç içe geçmiş karbon tüplerinden oluşmaktadırlar ve bir tüp şekli formu oluşturmak için birçok birbirlerine sarılmış grafit katmanlar içerirler. Çok duvarlı nanotüplerde iki tüp arasındaki uzaklık, genellikle tüpü oluşturan karbon atomları arasındaki bağ uzaklığından fazladır.

Grafit plakalarının kıvrılma yönüne göre tüpler ya zikzak yapıda, ya koltuk yapıda, ya da her iki yapının biraz bükülmesi ile bükük yapıda olabilmektedirler. Klasik elastisite teorisinde verilen bir noktadaki gerilme tensörü, aynı noktadaki şekil değiştirme tensörüne lineer olarak bağlıdır. Bu yüzden, yerel elastik teori, iç uzunluk ölçüleri olmadığından dolayı atomlar vb. arasındaki uzun aralıklı kuvvetler hakkında bilgi içermezler. Diğer taraftan yerel olmayan süreklilik mekaniğinde, verilen bir referans noktasındaki gerilme durumunun, cismin bütün noktalarındaki şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olduğu düşünülür.

Karbon nanotüpler, geniş çapta nanoteknolojik uygulamalarda kullanılan yapı elemanlarından biridir. Nano boyutta grafit karbonların içi boş silindirik çubukları olarak tasarlanmışlardır. Bu sebeplerden dolayı yerel olmayan teori, nano boyuttaki malzemelerin mekanik davranışlarını ortaya koymada oldukça başarılıdır.

Literatürde karbon nanotüplerin burkulması moleküler mekanik simülasyonlar olarak incelenmiştir. Yerel olmayan elastisite çerçevesinde başlangıç değerleri yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, bir kere başlangıç noktasındaki yer değiştirmeler ve gerilme bileşenleri bilindiğinde, tüm çubuk boyunca olan yer değiştirme ve gerilme bileşenlerinin değerlerini verir.

2. TEK VE ÇİFT DUVARLI ÇUBUKLARIN BURKULMASI

2.1 Nanoteknoloji Kısaca Tarihi Gelişimi ve ABD de Uygulama Alanları:

Nanoteknoloji ilk kez Norio Tanigucci tarafından 1974’de “ malzemelerin atom ve molekül düzeyinde işlenmesi, ayrılması ya da birleşmesi ve bozulması olarak” tanımlanmış ve 1991’de karbon nanotüplerinin bulunması [2-5] tüm dünyanın ilgisini toplamış ve birçok deneysel ve teoriye dayalı çalışmanın başlamasına neden olmuştur[2-4].

2.1.1 Nanotüp nedir?

Nanotüp en iyi karbon nanotübü ile anlatılabilir. Karbon nanotübü moleküler yapı olarak katlanmış kömür (grafit) yapısına benzer. Ama yapılış itibariyle C₆₀ (fulleren) sentezine benzer. Bu tüpsel yapı genel olarak tüm nanotüplere uygulanabilir.

2.1.2 Kısaca nanoteknolojinin tarihi gelişimi

1959 Nanoteknoloji ünlü fizikçi Richard Feynman’ın bir yemek sonrası verilen “There's Plenty of Room at the Bottom” Dipte daha çok fazla yer var adlı konuşmasında moleküler makineler atomik hassasiyetle inşa edilir diye tanımlamıştı.

1974 Taniguchi “ion-sputter machining” iyon püskürtme makinası konulu bir makalesinde ilk kez "nano-teknoloji" terimini kullanmıştı

1977 Drexler MIT’ de moleküler nanoteknoloji konseptini başlatmıştır.

1981 Moleküler mühendislik üzerine ilk teknik makale atomik hassasiyetle inşa etmek. STM bulundu.

1985 Buckyball keşfedildi.

1986 İlk kitap yayınlandı AFM bulundu. İlk organizasyon oluşturuldu.

1987 İlk protein tasarlandı. İlk üniversite ilk kez nanoteknoloji ile sempozyum düzenlendi.

1988 İlk üniversite ilk kez nanoteknoloji ile ilgili ders verilmeye başlandı

1989 IBM logosu bireysel atomlarla hecelenerek yazıldı. İlk uluslararası konferans düzenlendi.

1990 “İlk kez nanoteknolojisi yayınlandı. Japon ‘ya da STA nanoteknoloji projelerini desteklemeye başladı.

1991 Japan's MITI bottom-up "atom fabrikası"nı duyurdu. 200 milyon dolarlık karbon nanotüpler keşfedildi.

1992 İlk ders kitabı yayınlandı.

1993 Nanoteknolojideki ilk feynman ödülü nanoteknoloji için çok yararlı olan hidrojen-çalma aracını modellemeye verildi.

1994 Nanosystems ders kitabı ilk üniversite dersinde kullanılmaya başlandı.

1995 İlk düşünce tankı raporu yayınlandı. İlk endüstriyel askeri uygulamalara başlandı. Nanoteknolojideki feynman ödülü DNA molekülü ile üç boyutlu karışık yapıların sentezlenmesine verildi.

1996 \$250,000’lık feynman ödülü açıklandı. İlk avrupa konferansı yapıldı. Nasa bilgisayarlı nanoteknoloji üzerinde çalışmaya başladı. İlk nanobiyo konferansı verildi.

1997 İlk şirket kuruldu Zyvex. İlk kez nanorobotik sistemlerin dizaynı yapılması üzerine feynman ödülü onlara verildi.

1998 İlk NFS forumu düzenlendi. İlk DNA tabanlı nanomekanik alet yapıldı. “Öz örgütlemekten yararlanılarak moleküler yapılar inşa etmek için ve tamamen atomsal orandaki kimyasal reaksiyonlar için, moleküler aletlerin bilgisayarlı modellemesi” konusu feynman nanoteknoloji ödülünün sahibi oldu.

1999 İlk nanoilaç kitabı yayınlandı. feynman nanoteknoloji ödülü sahibi “Potansiyel programlama aletlerinin uygulamaları ve moleküler makina dizaynlarının kullanım modellemeleri için karbon nanotüplerin geliştirilmesi ”konusunun oldu.

2000 Başbakan clinton birleşik devletler ulusal nanoteknoloji girişiminde ilk eyalet araştırma girişiminin 100 milyon dolarla Kaliforniya’da olduğunu açıkladı. Feynman “nanoyapılar için hesaba dayalı malzeme bilimi ve bir moleküler anahtar yapmanın” oldu

2001 Nanoteknoloji endüstrisinin ilk raporu. ABD'nin ilk askeri uygulamalar merkezini açıkladı. Feynman “Nanometre ölçekli elektronik aletlerin teorisi ve karbon nanotüplerin ve nanokabloların karakterize edilmesi ve sentezlenmesi” nin ” oldu.

2002 Feynman “DNA’yı kullanarak yeni yapıların kendiliğinden kurulmasını olanak sağlamak ve moleküler makina sistemlerinin modellenmesindeki yeterliliğimizi geliştirme” nin ” oldu.

2003 Feynman“Peni malzemelerin moleküler ve elektronik yapılarının modellenmesi ve tek molekülü biyolojik motorların nano-ölçekli silikon araçlar ile entegre edilmesinin ” oldu.

2004 Gelişmiş nanoteknoloji üzerine ilk siyasi konferans. Nanomekanik sistemler üzerine ilk merkez. feynman “ Stabil protein yapıları dizayn etme ve bir değişmiş fonksiyon ile eşi olmayan bir enzim bloklama” oldu.

2005 Feynman “ Çok çeşitli tek molekül fonksiyonlu nanomakineler dizaynlanması ve dizayn edilmiş şekil ve fonksiyonlarda orta büyüklüklerde makromoleküllerin sentezlenmesi” oldu.

2006 Feynman “Moleküler programlama ve algoritmik kendinden kurulma çalışması ile DNA nanoyapılarının karmaşık iki boyutlu dizilişinin üretilmesinin ” oldu.

2007 Feynman “ 2- durumlu mekaniksel olarak birbirine geçmiş birleşiklere dayalı moleküler makinalar ve brown devinimi alanında işleyen moleküler makina sistemlerinin inşa edilmesi” oldu.

2008 Doğal olmayan kimyasal reaksiyonlar için protein katalizörleri dizayn edildi. Feynman “moleküler elektronikler ve moleküler motorlar nano arabaların sentezi çalışması ile çalışması ile nanofabrikasyon ve sensing’in kurumsal iştiraklarının” oldu.

2009 DNA nanorobotların yürütmesinde gelişme kaydedildi. Feynman nanoteknoloji ödüllünün sahibi “ tek atomları hareket ettirmek için kullanılan AFM mekanik sentezlerinin deneysel ispatları ile karmaşık moleküler yapıları inşa etmek için kullanılan moleküler araçların sayısal analizlerinin” oldu.

2010 Feynman “tek atom hareket ettirilmesi ve atomik anahtarlar çalışmasına ve moleküllerin ve katıların teorik tahminlerinin kuantum mekaniksel metotlarla

geliştirilmesinin ” oldu.

2011 Nanoprosesörler ve için ilk programlanabilir nanokablo devreleri. DNA molekül robotları herhangi bir yönde kollara ayrılmış yol boyunca yürümeyi öğrendi. Bir silikon yüzey üzerinde silikon dimer’lerin (dimer: aynı madde içerisindeki iki molekülün birleşmesiyle oluşan bileşik) mekanik olarak hareket ettirilmesi.

2.2 Nanoteknolojinin Türkiye’deki Uygulama Alanları

Türkiye’de nanoteknoloji uygulamaları ilk olarak yılında başlamış olup bilkent uluslar arası nanoteknoloji araştırma merkezi ve 1989’da düşük boyutlu kuantum yapılarında elektron taşınımı ile başlamış olup daha sonra üniversite bazında gelişmiş ve en büyük atılımı 2007 yılında ulusal nanoteknoloji merkezi kurulmasıyla başlatmıştır. Daha sonra özellikle tekstil sanayine teknolojik destek sağlamakla başlayıp, örneğin zorlu tekstil grubu gibi kendi kendini temizleyebilen diğer bir deyişle kirli suyu üzerinde barındırmayan elbiseler yada nano gümüş kullanılarak anti-mikrobiyel iplik nano karbon tüpleri kullanılarak anti-statik özelliği olan ve tekstilde boya alma kabiliyeti olan anti-statik polyester iplik geliştirme gibi atılımlar olmakla beraber ülkemizde tekstil dışında boya cam seramik ve cam sanayinde (yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi kendi kendini temizleyebilir özellik kazanması gibi) nano teknoloji kullanılmaktadır. Lakin yapılan çalışmalar daha fazla desteklenmeli ve bu konuda daha fazla bütçe ayrılması gerektiği unutulmamalıdır.

2.3 Nanoteknolojinin Amaçları

- 1) Nanometre ölçekli yapıların analizi
- 2) Nanometre boyutunda yapıların fiziksel özelliklerinin anlaşılması
- 3) Nanometre ölçekli yapıların imalatı
- 4) Nano hassasiyetli cihazların geliştirilmesi
- 5) Nano ölçekli cihazların geliştirilmesi

2.4 Nanoteknolojinin Gelecekteki Uygulama Alanları

Nanoteknolojinin gelecekteki potansiyel uygulama alanlarının birkaçını özetleyelim.

2.4.1 Malzeme ve imalat sektörü

Nanoölçekte islevi olan malzeme ve aygıtların makroskobik boyutlardaki malzeme içine yerleştirilmesi ile hatasız, çok miktarda üretim yapabilmek için yeni yöntemler geliştirilmesi; klasik metodlar ile elde edilen malzemelere oranla daha sağlam ve hafif maddelerin elde edilmesi için malzemelerin atomik ve moleküler boyutlardan başlayarak üretilmesi; sonradan işlenmeye ihtiyaç duyulmadan tam istendiği şekli ile nanoyapıda metal, seramik, polimer malzemeler üretilmesi; nanoölçekte parçacıklardan yapılmış boya ve boyar maddeler kullanılarak geliştirilmiş baskı yöntemleri; benzersiz ve alışılmamış özellikleri ile nanotüpler, elyaflar, lifler ve kaplama malzemeleri üretimi; nanoölçekte kaplama yapılmış kesme aletleri, elektronik, kimyasal uygulamalar; nanoölçekte yeni ölçüm standartları geliştirilmesi; üretim safhasında daha az enerji harcanmasını sağlayacak ve atık malzeme üretilmemesini sağlayacak yöntemlerin geliştirilmesi; düşük maliyetli üretim yöntemleri geliştirilmesi nanoimalatın potansiyel uygulama alanlarına örnek olarak verilebilir.

2.4.2 Nanoelektronik ve bilgisayar teknolojileri

Bilgisayarların mimari tasarımlarını geliştirmek için daha az enerji ile çalışan nanoölçekte elektronik devre elemanlarının üretilmesi; nanoölçekte bilgi depolama elemanları üretilmesi; ebatları küçük, hızları ve kapasiteleri büyük, daha az enerji harcayan nanometre ölçeklerinde elektronik araçlar üretilmesi; elektronik araçlar için sensör, gösterge sistemleri ve sinyal üretilmesi potansiyel uygulama alanlarına örnek olarak verilebilir.

2.4.3 Tıp ve sağlık sektörü

Canlıların yapıtaşı olan hücreler nanometre ölçeğindeki moleküllerden oluşur. Ebatları ve kıvrımları ile, dizilişleri ile belirli özellikleri olan proteinler, nükleik asitler, lipidler, karbonhidratlar nanoölçekteki malzemelere örnek olarak sayılabilir. Nanoteknolojinin doğadaki işlevsel karşılığı hücre olduğundan dolayı bu teknoloji, yaşayan sistemlere moleküler seviyelerde müdahale etme imkânı yaratabilir. Yaşayan organizmalar ile etkileşime geçebilecek boyutlarda araçlar üretilmesi ile bir çok yeni teşhis ve tedavi yöntemlerinin geliştirilmesi mümkündür. Gen alanında hem

teşhiste hem de tedavide yeni yöntemler geliştirilmesi ve bu alanda daha hızlı çalışmalar yapılabilmesi için nanoölçekteki aygıtların üretilmesi; bilgisayar modelleme çalışmaları ile makro moleküllerin davranışları incelenerek yeni ilaç tasarımlarının yapılması ve suni organ yedekleyebilmek için yeni biyolojik malzemelerin üretiminin gerçekleştirilmesi; daha hassas sonuçlar alabilmek için vücut içerisine yerleştirilebilen muhtelif ölçüm cihazları; insan vücudu içinde hareket edilmesine imkân sağlayan teşhis araçları; sadece hastalığın bulunduğu ve/veya yayıldığı bölgelere saldırarak ilaç veren makineler; görme ve duyma işlevlerinde yeni gelişmeler sağlayacak araçlar; tehlikeli hastalıkları önceden haber veren algılayıcı sistemler potansiyel uygulama alanlarına örnek olarak verilebilir. Yakın sürede beklenen en önemli gelişme, nanoölçekte malzemelerin nasıl kendi kendini ürettiğinin anlaşılmasıyla “self-assembly” proteinlerin ve çeşitli organik maddelerin üretim şeklinin kopyalanabilmesidir.

2.4.4 Havacılık ve uzay araştırmaları

Az enerji gerektiren, radyasyona karşı dayanıklı, yüksek verimli bilgisayarların yapımı; mikro ölçekteki uzay araçlarında kullanılabilecek nano ölçekte aletler; nanoyapılı algılayıcılar ve nanoelektronik ile desteklenen uçuş sistemleri yapımı; ısıya dayanıklı nanoyapılı kaplama malzemeleri; roket ve uzay istasyonlarının yapımında, havacılık ve uzay araçlarının üretiminde maliyeti düşürmek için nanoyapılı malzeme kullanımını potansiyel uygulama alanlarına örnek olarak verebiliriz.

Ayrıca çekme direnci çelikten kat kat yüksek nanotüpler sayesinde dünya yüzeyinden atmosfere kadar yükselebilecek yapılar inşa edilmesi potansiyel uygulama alanları içinde yer alabilir. Böylece fırlatma maliyetleri düşürülebilir.

2.4.5 Çevre ve enerji

Enerjinin verimli kullanılması, depolanması ve üretilmesinde nanoteknolojinin önemli etkileri vardır. Potansiyel uygulama alanlarının en önemlilerinden biri, temiz enerji kaynağı olarak kabul edilen hidrojen gazını depolama isine nanoölçekte çözüm aranmasıdır.

Ayrıca çevre sorunlarının gözlenmesinde ve giderilmesinde kullanılabilir, çeşitli kaynaklardan gelen atıklar önlenebilir, daha az atık yapan üretim sistemleri geliştirilebilir. Temiz su elde edilmesinde nanolifler kullanılabilir. Nano malzemelerin ve nano kompozitlerin fosil yakıt endüstrilerinin verimliliğini geliştirme potansiyeli bulunmaktadır. Nano kompozitlerin yaygın olarak kullanılması ile daha yüksek verimliliğe sahip motorların ve dolayısı ile daha temiz, çevre dostu ulaşım sistemlerinin kurulması mümkün olacaktır.

2.4.6 Bioteknoloji ve tarım

Üretilen bioteknolojik ürünler tıp, ilaç ve tarım sektörlerinde kullanılabilecektir. Biyolojik yapıtaşlarının suni malzemelerin ve aygıtların içine yerleştirilmesiyle biyolojik işleve ve başka üstün özelliklere sahip malzemelerin üretilmesi; bitkileri böceklerle karşı korumak için moleküler seviyede kimyasalların geliştirilmesi; gübreler, daha besleyici ve hastalık direnci yüksek bitkiler üretilmesi; hayvanlar için ilaçların üretilmesi; DNA testleri için nanoölçekte kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi potansiyel uygulama alanlarına örnek olarak verilebilir. Bugün bile bitki ve hayvan genlerinin düzenlenmesi ile ortaya çıkartılmış olan bazı ticari ürünlere rastlamak mümkündür.

2.4.7 Savunma sektörü

Nanoelektronik yardımıyla haberleşme araçlarının üretilmesi ve çok karmaşık eğitim sistemleri yapılması; daha az insan gücünün kullanılması için robot sistemlerinin üretimi; zararlı gazların ve radyoaktif serpintilerin tespit edilebilmesi için nano algılayıcılar üretilmesi; nükleer savunma sistemlerinin kontrol edilebilmesi için nano ve mikro mekanik aygıtların birleştirilmesi; daha iyi silah sistemleri üretilmesi; geliştirilmiş kamuflaj ve akıllı giyecekler üretilmesi; elektronik savaş kapasitesi geliştirilmesi bir çok çalışmasının gerçekleştirildiği alanlardır.

2.4.8 Nanoteknoloji ile ilişkili potansiyel hükümet uygulamaları

Ulaşımda daha hafif ve güvenli ekipman (Ulaştırma bakanlığı).

Kirliliğin ölçüm, kontrol ve yok edilmesi (Çevre koruma).

Daha çok ve verimli adli araştırma (Adalet bakanlığı).

Baskı ve kabartma teknolojisinde yüksek kalite, sahte para ve doküman olmasına engel teknolojiler (Dokümantasyon).

2.4.9 Bilim ve eğitim

Nanoyapı teknolojisi; fizik, kimya, biyoloji gibi temel bilimlerle malzeme, elektronik, makina, bilgisayar, inşaat mühendisliği gibi uygulamalı bilimlerin işbirliği içinde çalışmalarını gerektiren disiplinler arası bir alandır. Eğitim programlarının bu gelişmeye uygun olarak düzenlenmesi gerekir.

2.5 Nanoteknolojinin Uygulanabilmesi

Nanoteknoloji uygulamalarını gerçekleştirmek için iki tür yaklaşım ortaya konulmuştur, bottom-up ve top-down.

2.5.1 Bottom-up prensibi (aşağıdan yukarıya)

Bottom-up küçük parçaları bir araya getirerek daha kompleks düzenekler oluşturmayı esas alır. Örneğin DNA ve nükleik asit yapılarının tanımlanması, organik ve inorganik sentezlenmesinin gösterilmesi gibi.

2.5.2 Top-down prensibi (yukarıdan aşağıya)

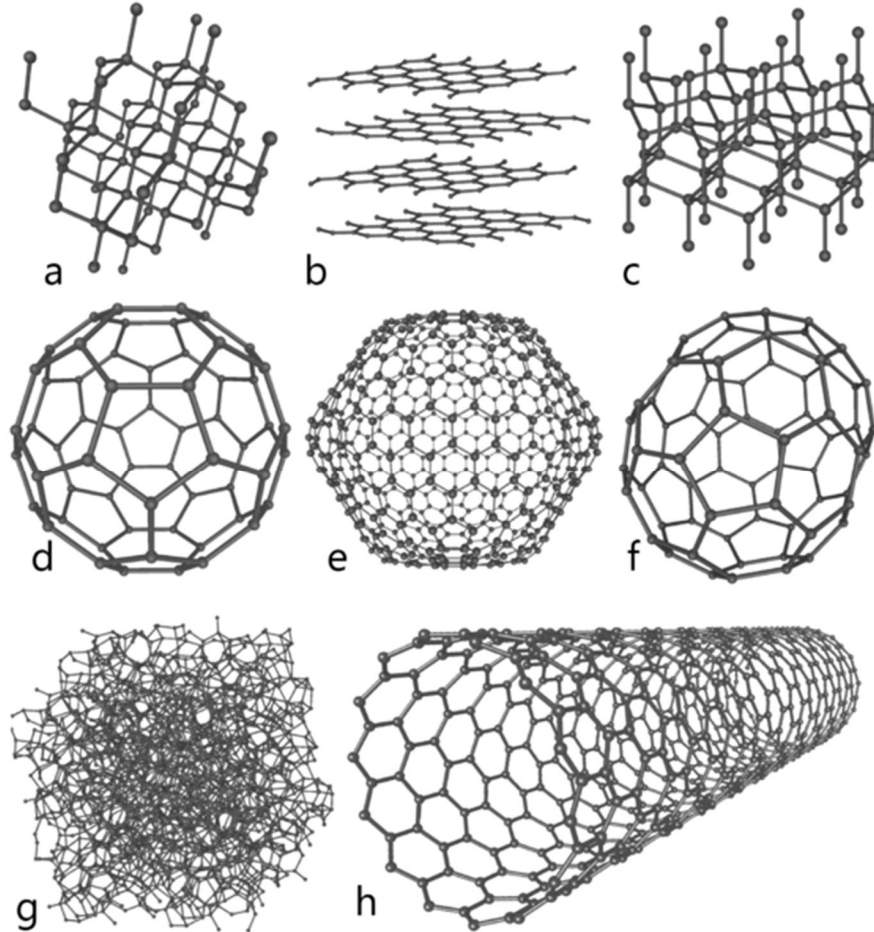
Top-down büyük aygıtları düzenekleri yönetmek için kullanılarak daha küçüklerini yaratmaya dayalıdır. Örneğin katı-halde bulunan silikon metotları (mikroprosesorleri fabrikasyonlaştırmak için) yada 2007’de Peter grunberg ve Albert Fert’i nobel fizik ödüllerine kavuşturan ‘giant magnetoresistance’ dev mıknatıksal iç direnç gibi.

2.6 Karbon Atomu

Nanoteknolojinin gelişmesinde karbon atomu gerek karbon atomu evrende doğal ve bileşik halinde bulunma miktarı olarak altıncı sırada yer almasıyla ‘ bulunabilirliğinin çok olması’ , gerekse, karbonun 14 atom numarasına sahip olması ve 4 elektronu kovalent kimyasal bağ oluşturabilecek şekilde bulundurulması ‘işlenebilirliğinin kolay olması’ nedeniyle Nanoteknoloji ‘de önemli bir yer tutmaktadır.

Karbon atomunun farklı yapılar oluşturabilmesinin en büyük nedeni ilk iki elektronun bağlanmaya etkileri olmayıp bu elektronlarla geriye kalan elektronlar arasındaki enerji farklarının çok büyük olmasındandır. Karbon atomu kendi aralarında 3 farklı bağlanma özelliği gösterirler: sp (doğrusal geometri), sp^2 (üçgen geometri), sp^3 (piramit geometri) olarak bağlanmaya dahil olan elektronların karışımına göre ifade edilir [1]. Bu farklı geometrilerle bağlanabilme özelliği karbonun allotroplar oluşturmasını da sağlamıştır. Allotrop, bir elementin iki yada daha fazla farklı formda bulunma özelliğidir. Diğer bir deyişle aynı elementin farklı yapısal modifikasyondadırlar. Allotrop'ların fiziksel özellikleri, kristallerinin dizilişi ve tepkimeye girme özellikleri birbirlerinden farklıdır.

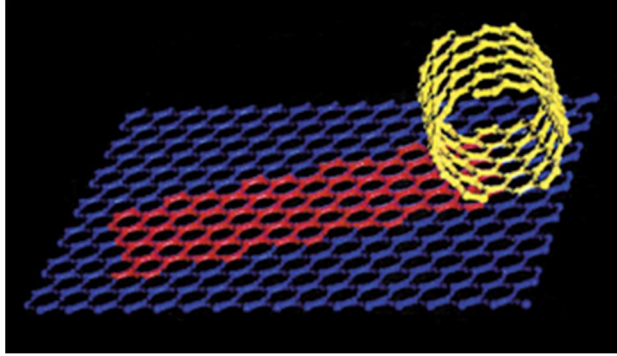
2.6.1 Karbon atomu allotrop'ları



Şekil 2.1 : Karbon allotropları [7]. a) Prlanta ,b) Grafit ,c) Lonsdaleit ,d-e-f) Fulleren ,g) Amorfous Karbon, h) Karbon nanotüp

2.7 Karbon Nanotüpü

Karbon nanotüpü karbon elementinin uzunluk-çap oranı 28×10^6 : 1 olan allotropudur. Bu oran başka herhangi bir malzemenin sahip olabileceğinden daha büyüktür. Nanotüp'ler fullerin yapısal grubuna dahildir. Moleküler yapı olarak katlanmış kömür (grafit) yapısına benzer. Ama yapılış itibarıyla C_{60} (fulleren) sentezine benzer. Bu tüpsel yapı genel olarak tüm nanotüplere uygulanabilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Bir kömür tabakasından düzülerek betimlenmiş bir karbon nanotüp.

Nanotüpler çelikten daha serttir ve plastik kadar esnektir. Enerjiyi şimdiye kadar keşfedilen tüm maddelere göre daha iyi iletirler ve metan gazı gibi, bilinen maddelerden yapılırlar. Karbon nanotüpleri içleri boş ve ince uzun fiber şekildedirler ve mükemmel bir atomik uyum içindedirler. En son çalışmalara göre karbon nanotüpler bilen bir çok malzemeye göre çok daha iyi mekanik ve elektrik özellikleri vardır [3]. Örneğin karbon nanotüpler 2 T Pa ' ya kadar çıkan çok yüksek elastik modüllere sahiptirler ve elastik geri nimleri %5'e ve kırılma geri nimleri %20'ye kadar çıkabilmektedir. Karbon nanotüplerin kullanıldığı en iyi uygulama alanları şüphesiz ki mükemmel dirençlerini ve olağan üstü yüksek sertliklerinin birleştirildiği alanlardır. Yüksek görünüm boyutu ve tüp geometrisi şekli nedeniyle yüksek gerinim deformasyonu olan bükülme, eğilme ve aşınmayı içerirler [3]. Bu nedenden dolayı karbon nanotüpler birçok deneye ve simülasyonun yapılmasına ön ayak olmuşlardır.

2.7.1 Tek duvarlı karbon nanotüpleri (SWNTs) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWNTs)

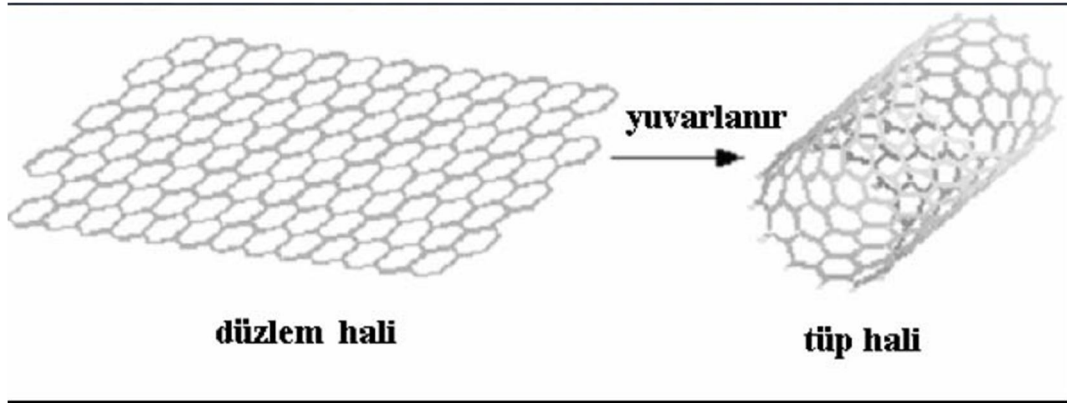
Bir karbon nanotüpü tüpün içine girecek şekilde kıvrılmış karbon atomlarından oluşur. İki değişik biçimde bulunur:

2.7.1.1 Tek duvarlı karbon nanotüpler (SWNTs)

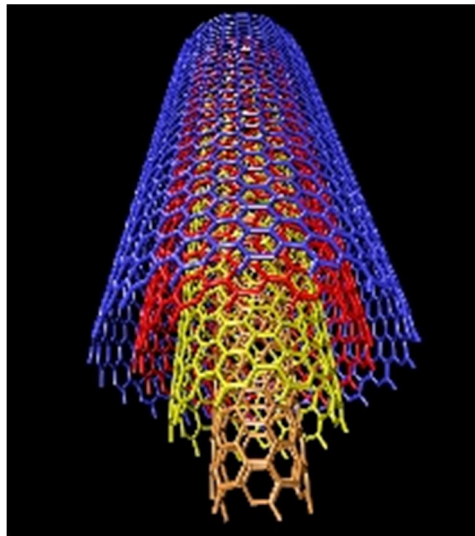
Tek katmanlıdırlar ve çok duvarlı karbon nanotüplerin de yapısını oluştururlar (şekil2.4). Tek sıra karbon atomundan oluşan bir grafin katmanının, silindir şeklinde bükülerek uçlarının birleştirildiği ve grafen içersindeki bağların aynısından oluşturulduğu düşünülürse bu yapı tek katmanlı bir karbon nanot ple aynı yapı olur (şekil2.3).

2.7.1.2 Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWNTs)

   i e geçmiş birçok tek duvarlı karbon nanot pten oluşurlar. MWNT’de iki t p arasındaki uzaklık, genellikle tüpü oluşturan karbon atomları arasındaki bağ uzaklığından fazladır. (şekil 2.3,2.4).



şekil 2.3 : Nanotüp sarımı

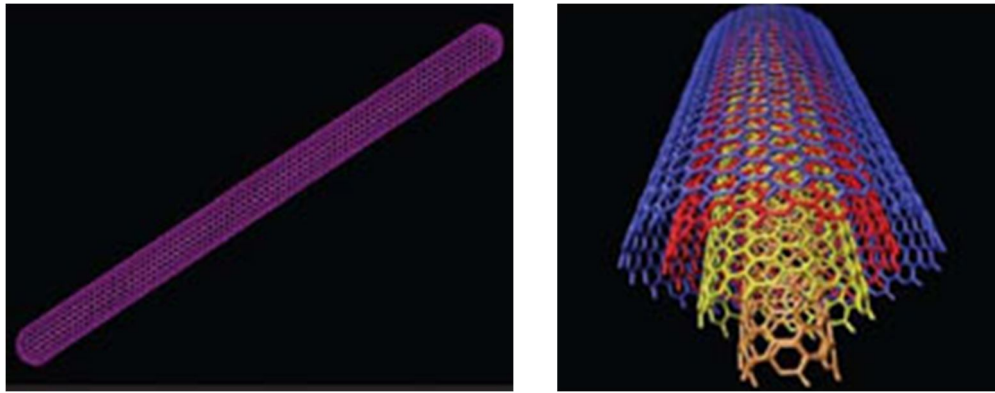


şekil 2.4 : Çok duvarlı nanot pyapısı

2.7.2 Tüplerin özellikleri

Tüplerin özellikleri 2 faktörden dolayı dikkat çekicidir. Birincisi onları tek boyutlu bir nesne durumuna getiren boyutları, ikincisi karbonun sıra dışı özellikleri euclid bakış açısına göre dünyada tüm nesneler, nanotüpler dahil, 3 boyutludur. X eksenini yatay, Y eksenini düşey, Z eksenini derinlik boyutudur.

Tek boyutlu nanotüplerde yükseklik ve en yoktur. Bunun sonucu, elektronlar bir yörüngede hareket ederler. Malzemedeki yarıklarda, bozuk alanlarda dağılmaz ve kaybolmazlar. Bu tek boyutluluk nanotüplerin, ısıyı şu ana kadar bilinen, elmas dahil, tüm malzemelere göre daha iyi iletmesini sağlar (Şekil 2.5).

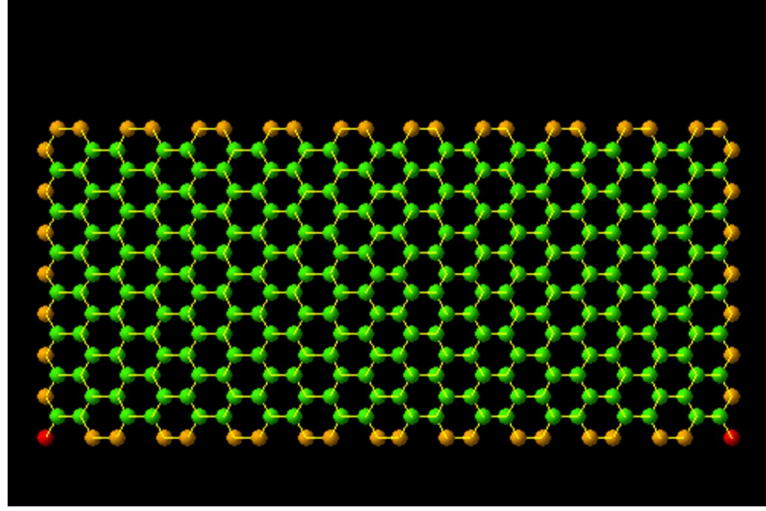


Şekil 2.5 : Tek ve çift duvarlı karbon nanotüpler

2.7.2.1 Karbon nanotüpü yapılarının özellikleri

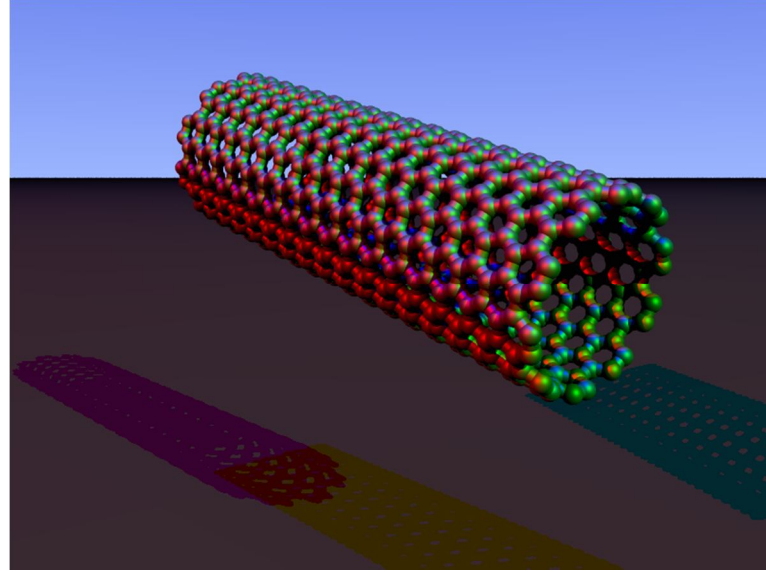
- CNT'ler bilinen en güçlü fiberlerdir.
- Bir nanotüpün çapı birkaç nm' dir.
- Yapılarına göre iletken ve yarıiletken olarak görev yapabilir.
- Isı iletkenlikleri çok yüksektir.

İkinci dikkat çeken özelliği ise karbon nanotüplerin bağlanma özellikleridir. Karbon atomları birbirine sınıksız bağlıdır ve sabit altıgenler oluştururlar. Nanotüpler ayrılan atomun yerine başka bir atom kaydırarak kendilerini onarırlar (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Karbon nanotüpü

Nanotüp silikonlar hataya karşı çok hassastırlar. Nanotüpler ise hatayı tolere edebilme yetenekleri yüksektir. Karbon nanotüp, grafitin bal peteğini andıran atom düzleminin bir silindir üzerine hiçbir kusur oluşturmada kesiksiz olarak sarılmış bir şekli olarak düşünülebilir (Şekil 2.7).

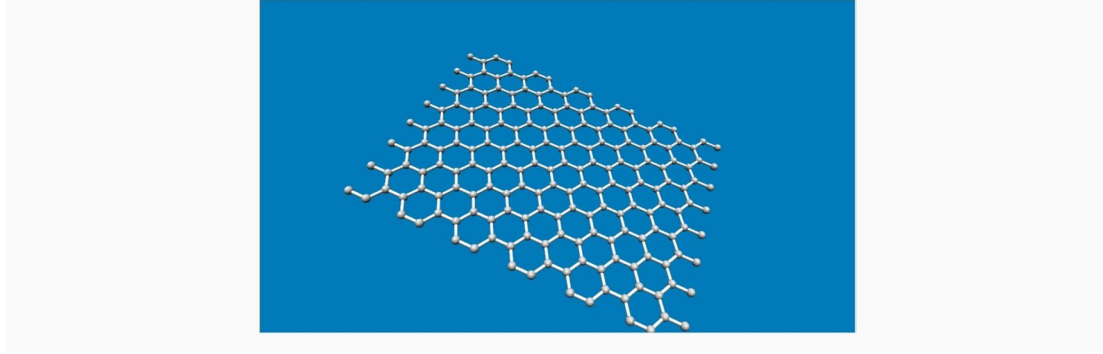


Şekil 2.7 : Tek katmanlı karbon nanotüp.

2.8 Grafen

2.8.1 Tanımı, yapısı ve kullanım alanları

Grafen, grafit yapısının tek katmanıdır. İki boyutlu bu yapı iletkenidir. Belli düzenlerle kesilip yuvarlanırsa karbon nanotüpler elde edilebilir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 : Grafen yüzeyi

Kusursuz grafenler tamamıyla altıgen hücrelerden oluşurlar; beşgen ve yedigen hücreler yüzey üzerindeki hatalar olarak varsayılır. Eğer izole edilmiş bir beşgen hücre varsa bu zamanla konik bir şekil alır. Aynı şekilde yedigen bir hücre de semer şekilli bir yapıya dönüşür. Beşgen ve yedigen hücrelerin kontrollü birleşimleri ile değişik şekiller elde edilebilir.

Tek duvarlı karbon nanotüpler grafen silindirleri olarak düşünülebilir, bazı nanotüplerde iki uçta altıgen hücreden kapaklar bulunur. Grafen son zamanlarda teknoloji geliştiricilerinin dikkatini çekmiştir. Georgia tech araştırmacıları mart 2006'da grafenlerden oluşan alan-efekti transistörleri ve kuantum girişim aygıtları üretmeyi başarmıştır.

2.8.1.1 Şerit grafen

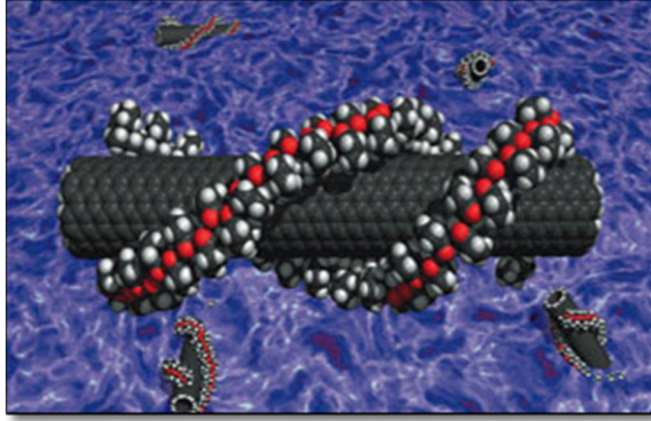
Şerit grafenler kenar yapısına göre düz ya da zigzag olarak ayrılırlar. Şerit grafenler spin bağımlı özellikleri ile dikkat çekerler. Yapılan deneyler ve kuramsal hesaplar, zigzag grafen şeritlerin kenar bölgelerinde yerleşmiş elektronların zır spin özelliğine sahip olduklarını göstermiştir. Fakat düz kenarlı grafit şeritlerde bu durum gözlenmemektedir. Zıt spin yapılarının her iki tarafta Fermi seviyesine yakın bulunmaları, şerit grafenleri potansiyel spin ayracı konumuna getirmektedir.

2.8.2 Kimyasal düzenleme

Grafenin çözünebilir parçaları laboratuvar koşullarında grafitte bazı kimyasal işlemler uygulanarak elde edilebilir. Öncelikle, mikro kristal yapıdaki grafitte güçlü bir Sülfürik asit ve nitrik asit karışımı uygulanır. Ardından uygulanacak olan oksidasyon ve eksfoliyasyon işlemleri ile uçlarına karboksil grupları bağlanmış grafen tabakaları elde edilir. Thinoil klorid kullanılarak bu yapılar asit klorid gruplarına çevrilir. Sonrasında oktadesilamin ile bu yapılar da grafen amidlere çevrilir. Oluşan 5.3 angstrom kalınlığındaki dairesel grafen katmanları tetrahidrofuran, tetraklorometan ve dikloroetan tarafından çözülebilir.

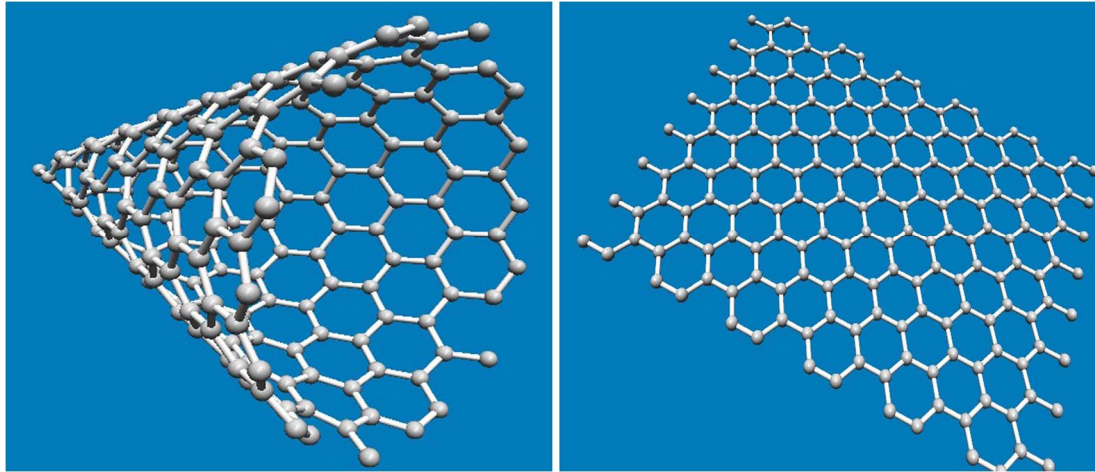
2.8.3 Elektron taşıma

Elektronlar Fermi-Dirac istatistiğiyle betimlenen parçacıklardır ve katı hal fiziğinin sınırları içerisinde genellikle göreceli olmayan parçacıklar kategorisinde değerlendirilirler. Zira elektronun katı haldeki madde içerisindeki hızları ışık hızından oldukça düşüktür ve göreceli olmayan parçacık denklemi (Schrödinger denklemi) elektronların katılardaki davranışlarını oldukça iyi bir şekilde izah eder. Fakat grafen için durum oldukça farklıdır. Grafendeki elektronların hızları da ışık hızına göre oldukça küçüktür, ancak Schrödinger denklemi yerine ışık hızına sahip fermiyonları betimleyen Dirac denklemine uyarlar. Grafen elektronları için yazılan denklemle gerçekten göreceli parçacıklar için yazılan denklem arasındaki tek fark denklemdeki ışık hızının değeridir. Ayrıca grafendeki elektronların etkin kütleleri sıfırdır. Bu yüzden grafen elektronlarına kütesiz Dirac fermiyonları da denmektedir. Temel denklemdeki bu farklılık kuantum taşınım probleminde kendini gösterir. Klein paradoksu olarak adlandırılan, olağandışı tünelleme olayı grafende gözlenmiştir. Nanotüpler, grafen düzlemi örülü yapının bir silindir şekline sarılması ve uçlarının küresel bir silindir kapağı şeklinde kapatılması ile oluşturulur (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 : Karbon nanotüp oluşumlu enerji iletim kablosu

Grafen, grafit, karbon nanotüp ve fuleri, karbon tabanlı bal peteği ağ örgülü, π elektron sistemleri içerisinde değerlendirilirler. Elmas ise sp^3 melezleşmesi ve dört-yüzlü ağ örgüsü ile öncekilerden farklı bir kategoride değerlendirilir. Grafen iki boyutlu planar yapıların çok ender örneklerinden birisidir. Karbon atomları 1-s ve 2-p orbitallerinin birleşimi ile 120 derece açılı sp^2 melezleşmesi yaparken boşta kalan p_z orbitalleri de grafen malzemesine sıra dışı özellikler kazandırmaktadır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : Grafen yüzeyi

Grafen yapısında karbon-karbon bağ uzaklığı yaklaşık olarak 1.42 Å dur. Grafen tabakalarının üst üste gelmesi ile meydana gelen grafitte iki grafen tabakası arasındaki mesafe ise yaklaşık olarak 3.35 Å dur. Grafendeki güçlü karbon bağları ona yeryüzündeki bilinen en sağlam malzeme özelliğini kazandırmıştır. Bununla birlikte grafitteki grafen katmanlar arasındaki bağlar oldukça zayıftır. Kurşun kalem

kâğıda sürtünce bu zayıf bağlar kırılmakta ve kâğıda yayılan grafen ve grafit tabakalar yazı izlerini oluşturmaktadır.

Karbon nanotüpler, C60 molekülleri yapay yollarla sentezlenebilmektedir. Elmas ve grafit de doğada serbest olarak bulunabilmektedir. Termodinamiksel hesaplamalara göre karbonun grafit fazı elmastan dahi daha kararlıdır. Fakat bunlara rağmen grafitin tek katmanlı hali olan grafen malzemesin sentezlenmesi 2004 yılına kadar gerçekleşmemiştir. Hatta Landau ve Peierls landau,peierls gibi meşhur fizikçiler grafen gibi iki boyutlu malzemelerin teorik olarak kararlı olamayacaklarını; sıcaklığın tesiri ile dağılacaklarını yaklaşık 70 yıl önce ortaya atmışlardır. Mermin ve Wagner mermin da benzer açıklamalarda bulunmuşlardır. Bunlarla birlikte grafenin deneysel olarak sentezlenebilmesi bir türlü gerçekleştirilememiştir. Deneysel çalışmalarda ince filmlerin 10-15 atomik katmandan sonra dağıldıkları gözlemlenmiştir segregate.

2.8.4 Sentezlenmesi

2004 yılında şaşırtıcı bir şekilde bilim adamları iki boyutlu grafen kristallerini ayırmayı başardılar. Andre Geim, Kostya Novoselov ve proje arkadaşları sıradan bir yapışkan selobantı grafit üzerine tekrar tekrar yapıştırıp kaldırarak tekil grafen katmanını ayırmayı başardılar ve izole ettikleri grafen katmanını basit bir optik mikroskop ile gözlemlədiler. Bu olay ilk başlarda pek dikkat çekmedi. Fakat daha sonraları grafende keşfedilen kütlesiz dirac fermiyonları novo-dirac, anormal kuantum hall etkisi qhe, oda sıcaklığında balistik taşınma novo, Klein paradoksu klein gibi olgular grafende keşfedildi ve bazıları deneysel olarak gözlemlendi. Bunlar sonucunda grafene olan ilgi son derece arttı ve artmaya da devam etmekte.

Grafen yaygın olarak şu yöntemler ile elde edilmekte:

1. Kaydırma Metodu
2. Epitaxial Büyütme
3. Silisyum-Karbon metodu
4. Kimyasal ayrıştırma metodu

2.8.4.1 Kaydırma metodu

Grafit tabakası bir yüzey üzerine kaydırılarak grafen katmanlarının ayrışması sağlanır. Grafitin selobant ile katmanlarını ayrıştırılması da bu metod içerisinde değerlendirilir. Grafenin ilk kez sentezlenmesi İngiliz grup tarafından bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 100 mikrometre büyüklükte grafen parçacıkları bu metodla sentezlenebilmektedir.

2.8.4.2 Epitaxial büyüme

Bir substrat üzerinde grafenin büyütülmesidir. Grafenin büyütüldüğü substrat grafen ile etkileşebilmektedir.

2.8.4.3 Silisyum-karbon metodu

Silisyum-karbonun yaklaşık 1100 dereceye kadar ısıtılması ve silisyum atomlarının buharlaşması sonucu kalan karbon atomlarının kendi aralarında grafen oluşturması metodudur. Oluşan grafen parçacıkları diğer metodlar ile karşılaştırıldığında küçük kalmaktadır.

2.8.4.4 Kimyasal ayrıştırma metodu

Grafit tabakalarının arasına sitrik asit gibi kimyasalların katılması ve grafen tabakalarının ayrıştırılması sağlanabilmektedir.

2.8.5 Atomik yapı

Grafenin kristal yapısı Raman ve Rayleigh gibi yüksek çözünürlüklü mikroskop yöntemleri ile incelenmiş ve bal peteği şeklindeki ağ örgüsü ispatlanmıştır. Grafenin kristal yapısı bravais örgüden değildir. Daha çok birim hücresinde 2 karbon atomu bulunduran üçgensel örgü kullanılarak ifade edilebilir. Ağ örgü vektörleri şöyle seçilebilir.

$$a_1 = \frac{a}{2}(3, \sqrt{3}, 0) \quad a_2 = \frac{a}{2}(3, -\sqrt{3}, 0)$$

Burada $a \approx 1.42$, a: karbon mesafesidir. Ters ağ örgü vektörleri ise şöyle gösterilebilir.

$$b_1 = \frac{2\pi}{3a}(1, \sqrt{3}, 0) \quad b_2 = \frac{2\pi}{3a}(3, -\sqrt{3}, 0)$$

Brillouin bölgesindeki iki K ve K' noktaları grafen için çok önemlidir. Bu noktaların koordinatları şöyle ifade edilebilir.

$$K = \left(\frac{2\pi}{3a}, \frac{2\pi}{3\sqrt{3}a}, 0 \right) \quad K' = \left(\frac{2\pi}{3a}, -\frac{2\pi}{3\sqrt{3}a}, 0 \right)$$

2.8.6 Elektronik yapı

Her ne kadar grafenin sentezlenebilmesi oldukça geç olsa da grafenin elektronik özelliklerinin araştırılmaya başlanması 1946 lara kadar uzanmaktadır. İlk grafen çalışmalarından birini P. R. Wallace yapmıştır wallace. Wallace grafen kelimesini kullanmayıp yerine "tek katmanlı yapı" dediği çalışmasında grafenin enerji-bant yapısını incelemiş ve bu çalışmasını 3-boyutlu grafitin elektronik özelliklerini anlamaya çalışmakta kullanmıştır. Grafendeki yük taşıyıcıları adeta kütleleri yokmuş gibi davranabilmektedirler. Bilinen tight-binding yöntemi ile dalga numarası k olan grafen elektronlarının enerjisi aşağıda verilmiş formül ile modellenenebilir .(denklem 2.1)

$$E = \pm \sqrt{\gamma_0^2 \left(1 + 4 \cos^2 \pi k_y a + 4 \cos \pi k_y a \cdot \cos \pi k_x \sqrt{3}a \right)} \quad (2.1)$$

Burada $\gamma_0 \approx 2.8eV$ en yakın hoplama parametresi enerjisini temsil etmektedir. + ve - işaretleri ise sırasıyla π^* ve π enerji bantlarına tekabül etmektedir. Enerji K noktasında momentum ile lineer olarak değişmektedir. Kütsüz relativistik parçacıkların da uyduğu bu enerji ilişkisi şöyle ifade edilebilir; $E = \hbar k u_f$. Burada ışık hızının ($E = \hbar k c$) yerine fermi hızı $u_f \approx c / 300$ gelmektedir. Böyle bir enerji-momentum bağımlılığı sadece grafen için geçerlidir. Diğer sıradan malzemelerde enerji momentuma ikinci dereceden bağımlıdır. 2 katmanlı grafende dahi lineer enerji bağımlılığı yok olmaktadır. Elmas yapıda ise tamamen farklı olarak sistem elektriksel-yalıtkan olarak davranmaktadır.

Grafenin kendine has bir özelliği de oda sıcaklığında elektronların herhangi bir çarpışma olmadan oldukça uzun mesafeleri (bkz ballistic transport) kat edebildiği bir malzeme olmasıdır. Karbon atomlarının bağ yapmak için dört elektronları vardır. İki boyutlu olan grafende üç bağ yaptıklarından, dördüncü elektron kristalde serbestçe

dolaşır ve grafene yüksek iletkenlik kazandırır. Sıradan metallerde, elektron saçılması enerji kaybına ve ısı ortaya çıkmasına sebep olur.

2.8.7 Grafen nanoşeritler

Kusursuz grafen iki yönde sonsuza kadar uzanan bir örtü gibidir. Gerçekçi grafen ise girinti ve çıkıntılardan oluşan kenarlara sahiptir. Bu girinti ve çıkıntılar grafen kristali yeterince büyük ise etkisiz olmaktadır. Sentezlenen grafen parçaları sonlu olsa da sergiledikleri fiziksel özellikler sonsuz grafene benzerdir. Çok küçük grafen şeritlerinde kenarların etkileri ortaya çıkar ve grafen nanoşeritler grafenden ayrı olarak incelenmeyi hak etmektedirler. Grafen şeritler sahip oldukları kalınlığa ve kenarlarının tipine göre farklı özellikler sergilemektedirler. Birincisi bilimsel literatürde "armchair" olarak adlandırılan kenarlara sahip olup birim hücresinde $n = 20$ karbon atomu bulundurmaktadır.

Normal grafen kristallerinin yasak enerji aralığı sıfır iken, kalınlığı 1 nanometre civarında olan $n = 14$ armchair grafen nanoşeridin 1.5 eV civarında bir yasak enerji aralığına sahip olduğu teorik çalışmalarda gösterilmiştir. Yasak enerji aralığı şeritlerin kalınlığına bağlı olarak da değişiklikler göstermektedir. Belirli yönde kesilen grafen şeritlerden bazıları manyetik karakter sergilemektedir. Hatta Berkeley'deki araştırmacılar bu manyetik şeritlerin uygulanan elektrik alan altında yarı-metal özellik gösterdiklerini de keşfetmişlerdir. Bilkent Üniversitesinden Salim Çıracı ve grubu ise grafen nanoşeritlerin kalınlık modifikasyonu neticesinde çoklu kuantum kutu yapıları (MQW) oluşturduğunu, bu yapıların parçacık durumlarını şeridin belirli yerlerinde hapsedebildiklerini, daha da ilginç belirli şeritlerin parçacık spinlerini dahi hapsedebildiklerini göstermişlerdir [1,2]. Parçacık durumlarının hapsediği bu nano yapıların geleceğin kuantum-bilgisayarlarında kullanılabilecekleri hale getirilme çalışmaları da bilim adamlarınca yürütülmektedir [3].

Stanford üniversitesinden H. Dai önderliğindeki araştırma grubu 10 nm kadar dar grafen şeritlerin sentezlenmesini başarmıştır [4]. Daha dar şeritlerin sentezi ve mevcut şeritlerin kullanılması ile ilginç ve sıradışı özellikli nanoteknoloji uygulamalarının ortaya çıkacağı beklenmektedir.

2.8.8 Kullanım alanları

Grafen bilinen ilk iki boyutlu malzemedir ve bu özelliğiyle teknolojik uygulamalar hususunda oldukça ilgi çekmektedir. Grafenin rulo haline gelmiş formu olan karbon nanotüpler ile alakalı günümüze kadar elektronikten sağlığa kadar birçok alanda binlerce kullanım alanı düşünülmüştür. Grafenin de karbon nanotüpler için ön görülen alanlarda adapte edilmesi mümkündür. Nanotüpler için edinilmiş deneyimlerden yararlanılması sayesinde grafen teknolojisinin önümüzdeki yıllarda büyük bir atılım gerçekleştirmesi ümit edilmektedir. Grafenin nanotüplere oranla daha basit olan elde edilmiş teknikleri ve bu tekniklerin nanotüplere göre daha kontrol edilebilir olması grafenin nanotüp teknolojisi üzerine hâkimiyet kurmasını da beraberinde getirebilir.

Her ne kadar grafenin ilk sentezlenişi 2004 yılında gerçekleşmiş olsa da yapılan araştırmalar neticesinde gerçekçi kullanım alanları ortaya çıkarılabilmektedir. Örnek vermek gerekirse şunlar gösterebiliriz.

2.8.8.1 Grafen aransistor

Grafenin akla gelen ilk uygulama alanı grafen kullanılarak elde edilmiş olan transistörlerdir. Manchester University The School of Physics and Astronomy'de Prof.Andre Geim ve Dr.Kostya Novoselov bir atom kalınlığında ve en fazla elli atom genişliğinde grafen transistörü geliştirdiler. Grafen dik yöndeki elektrik alana verdiği tepkiden dolayı FET yapımına uygundur. Bu transistör oda sıcaklığında çalıştığından elektronik aygıtlar için oldukça önemlidir. Bu aygıtların başında kuantum noktaları, devreler arası bağlaç aygıtlar ve mantık kapıları gelmektedir. Günümüzdeki silisyum tabanlı elektronik teknolojisi gün geçtikçe sınırlarına yaklaşmaktadır. Çünkü silisyum çok küçük ölçeklerde kararlılığını kaybetmekte ve daha başka problemler ortaya çıkmaktadır. Yarı iletken endüstrisinin elektronik bileşenlerin küçültülmesi konusunda gelecek yirmi yıl içinde karşı karşıya kalması beklenen en büyük sorunlardan biri olan alt sınıra ulaşılması grafen sayesinde aşılabilecek gibi duruyor. Silikon tabanlı teknoloji alt sınıra ulaştığı zaman sadece tek bir atom kalınlığındaki grafen, bu soruna bir alternatif oluşturabilecek. Bu sebepten INTEL ve IBM gibi dev teknoloji şirketleri grafen ile alakalı araştırmaları etkin bir biçimde desteklemektedirler.

2.8.8.2 Grafen ve pil teknolojisi

Grafen, sağlam olduğu kadar iyi de elektrik tutuyor ve bu özelliğinin pil teknolojisinde devrim yaratması bekleniyor. Elmas keskilerine dayanacak kadar güçlü bir karbon tabakası olan grafenin, yongaların bileşiminde silikonun yerini alabilecek olmanın yanı sıra şarj ömrünü de inanılmaz uzatabileceğı düşünülüyor. Amerika'da bulunan Teksas Üniversitesi'nin araştırmacıları, normal pillerden daha güçlü elektrik depoları olan ultrakapasitörleri grafen tabanlı olarak imal etmeyi başardılar. Sonuç, normalin iki katı kapasiteye sahip olan ultrakapasitörler oldu. Bu gelişme hayata geçirilirse, şarjlı pille çalışan cihazlar yanında, rüzgârsız veya güneşsiz günler için büyük miktarda enerji depolama yöntemleri arayan yenilenebilir enerji endüstrisi için de çok faydalı olacak.

2.8.8.3 Grafen sensörler

Grafenin sensör teknolojisinde kullanılması da bir diğer kaydedeler gelişmelerde- - ndir. Yine andre geim ve grup elamanları grafeni kullanarak azot di oksit moleküllerinin grafen yüzeyine yapışma ve ayrılmasını moleküler hassasiyette tespit etmeyi başardılar sensor. Grafen kullanarak NEMS sistemleri yapmak da mümkündür. Cornell Üniversitesinden araştırmacılar grafeni son derece hassas elektromekanik rezonatör yapımında kullanmışlardır resonator.

2.8.8.4 Grafen ve hidrojen depolama

Pil teknolojisinde olduğu gibi hidrojen depolamada da grafen malzemesi oldukça önemli roller üstlenebilir. Artan küresel ısınma ve fosil yakıtların gün geçtikçe azalması araştırmacıları yeni arayışlara itmektedir. Hidrojenin vermili bir şekilde depolanıp elektrik enerjisi gereken yerlerde kullanılması için oldukça yoğun araştırmalar yürütölmektedir. Bilkent Üniversitesinden Salim Çıracı ve grubunun yaptığı teorik modellemeler neticesinde Lityum atomlarının grafen üzerine yapışması sonucu oluşan yapının ağırlığının % 12 si kadar hidrojeni depolayabileceğı öngörölmüşür.

2.8.8.5 Grafen ve spintronik

Spintronik teknolojisi de günümüzde oldukça önem kazanmaya başlamıştır. Elektronların yüküne ek olarak sahip oldukları spinlerini de kullanmaya çalışan bu teknoloji günümüz bilgi depolama sistemlerinde hayati öneme sahip bulunmaktadır. Grafen nanoşeritlerin de sahip oldukları manyetik özellikler sayesinde spintronikte kullanım alanları doğmaktadır. Bilkent Üniversitesinden Salim Çıracı'nın spin durumlarının grafen şeritlerinde hapsolmasını öngören çalışmasına ek olarak Tuğrul Senger'in Hasan Şahin ile yaptığı çalışma hasan Türk bilim adamlarının bu konudaki katkılarına örnek gösterilebilir. Ayrıca grafen nanoşeritleri Demir ve Titanyum atomları katkılanarak yarı-metal özellik kazanabilmektedir. Belirli spin yönünde akım geçirip diğer yönde yalıtkan olan yarı-metal malzemeler de Spintronik teknolojisinde önemli yere sahiptir. Günümüzde karbon nanotüpleri 2 şekilde yapılmaktadır. Birincisi lazer ile üretmek, ikincisi gaz yöntemini kullanmak yani erimiş yüzeydeki metan ya da karbondioksit gazına hidrokarbon püskürtmek yöntemidir.

2.9 Karbon Nanotüplerin Özellikleri

Karbon nanotüplerin ağırlıklarının çok hafif olması, yüksek elastisite modülü ve gözüken en dayanıklı lif olma ihtimali önemli özelliklerindendir. Nanotüpler, yapılarındaki değişikliğe (Chirality) bağlı olarak metalik ya da yarı iletken özellik gösterebilmekte ayrıca elastik/plastik yapı deformasyonları ile elektronik özellikleri değiştirilebilmektedir. Bu özellikleri ile karbon nanotüpler yüksek bir teknolojik potansiyele sahiptirler.

Nanotüpler, tüp eksenî yönünde çekilmeye karşı çok sağlamdırlar ve hasar görmeden mukavemet gösterebilirler. Küçük çaplı (yaklaşık 1-2 nanometre) tüplerden oluşturulmuş bir demeti koparabilmek için uygulanan çekme kuvvetinin büyüklüğü yaklaşık 36 gigapaskal ölçüsündedir. Bu, bilinen en sağlam malzemelerden daha sağlam bir yapı özelliği gösterir. Nanotüp lifler, gerilmeye karşı en sağlam malzemelerdir. Karbon nanotüplerin yarı iletken teknolojisinde kullanılmaya başlaması elektronik aygıt yapımında çok büyük bir atılım yapılmasını sağlayacaktır. Çünkü nanotüplerin çok özel elektronik özellikleri vardır.

Laboratuvar deneylerinde tek duvarlı küçük çaplı karbon nanotüplerin gerilme mukavemeti 45.000 Mpa olarak belirlenmiştir. Bir fikir vermesi açısından belirtmek gerekirse, en sağlam çelik alaslmları bile 2 Mpa'da kopar. Üstelik karbon nanotüpler düğüm yapılabilecek kadar esnektirler. Gelecekte karbon nanotüp demetleriyle yapılan karbon nanotüp lifler, üstün dayanımları ve esneklikleri ile süper malzemeler olacaklardır. Bu liflerle dokunacak süper membranlar çok geniş yüzeylerin, hatta kentlerin üzerini örtebilir.

Karbon nanotüp liflerin, beton ve yapı plastikleri içerisinde güçlendirme malzemesi olarak kullanıldığı süper karma malzemelerle inanılmaz mimarlık ve mühendislik yapıları inşa edilebilir. Bunun gerçekleştirilmesi için öncelikle karbon nanotüplerin maliyetinin azaltılması (maliyeti 1000\$/gram civarında) ve daha da önemlisi nanotüp yüzeylerinin fazla düzgün ve pürüzsüz olması nedeniyle matris malzeme içinden kayma probleminin giderilmesi gerekir.

Karbon nanotüplerin üretilmesi için uygulanan yöntemler :

- 1) Ark-buharlaştırma yöntemi
- 2) Lazer buharlaştırma yöntemi
- 3) Kimyasal buharlaştırma yöntemi

2.9.1 Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri

Grafin tabakasındaki karbonlar arası kimyasal bağ doğada bilinen en güçlü bağlardan olduğundan, karbon nanotüplerin çok iyi mekanik özelliklere sahip olması beklenmektedir. Dolayısıyla bileşik malzemelerin güçlendirilmesinde karbon nanotüpler önemli bir potansiyele sahiptir. KNT'lerin mekanik özelliklerini belirleyen önemli parametreler, esneklik sabiti, Young modülü (Y) ve Poisson oranıdır. Bu parametreler esnek yapıdaki bozulma, germe zoru, eğilme mekanizması, bükülmeye karşı dayanıklılık gibi durumları açıklar. Nanotüplerin Young modüllerinin ilk ölçümlerinde sabitlenmiş nanotüplerin serbest uçlarının ısısal titreşim genlikleri ile sıcaklık ilişkisi incelenmiştir. Hesaplara göre izole edilmiş TDKNT'lerin Young modülleri tüp çapına veya chiral açısına çok fazla bağlı olmayıp, karbon fiberlerin asimptotik limitlerine uygun olarak yaklaşık 1TPa değere sahiptir. Bununla birlikte ÇDKNT'ler için tüp çapı arttıkça biraz azalmaktadır. Farklı nanotüp örnekleri için gerilmeye dayanıklılığın, farklı türdeki kusur

konsantrasyonuna, deneysel esneklik parametrelerine ve sentezleme tekniklerine bağılı olduğu düşünölmektedir. KNT'ler çok yüksek Young modölüne sahip olmalarına rağmen, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçömlerine göre, kırılmaksızın düğüm halinde bükölebilmektedir. Böylece KNT'lerin esnekliğı, dayanıklılığı ve geri dönüşömlü şekil değışiklikleri kapasitesi incelenmektedir. Küçük çaplı TDKNT'ler kırılmadan yaklaşık %30 uzatılabilmekte ve kırılma baskısının değeri 55 GPa olarak belirlenmiştir.

TDKNT'lerde eksiklikler düzenlenerek büyük gerilmelere uyum sağlanabilir. ÇDKNT'lerle yapılan gerilme kuvveti deneylerine göre en dıştaki tabaka kırılırken iç tabakalar sıyrılarak çıkmaktadır. Bükme kuvveti etkisinde dış tabakalarda bükölme ve iç tabakalarda baskı ile ÇDKNT'ler bükölürler. Çapı 12 nm den küçük olan nanotüpler için etkin bükölme modölü yaklaşık 1 TPa değeriinde belirlenmiştir. Bununla birlikte daha büyük çaplardaki ÇDKNT'ler için etkin bükölme modölü yaklaşık olarak 100 GPa değeriine kadar düşmektedir. Deneyler sonucunda, ÇDKNT'lerin eksenleri boyunca uzamasının zor olmasına rağmen, yanal olarak eğilmelerinin kolay olduğu ve büyük yanal şekil değışikliklerine karşı geri dönüşömlü olarak dayanabildikleri ortaya çıkmıştır. Ayrıca atomik hesaplara göre chiral tüpler, zigzag veya armchair tüplere göre daha küçük eğilme zoruna sahiptir. Bununla birlikte simölasyonlarda hesap limitlerinden dolayı, simölasyonlar kırılma deneylerindeki zaman ölçeğini kapsayamayacak kadar kısa sürmektedir. Dolayısıyla simölasyonlarla nanotüplerin gerçek dayanıklılığının belirlenmesi; oldukça değışken ölçeklendirmeler gerektirdiğinden dolayı zahmetli bir iştir. [14]

2.10 Karbon Nanotüplerin Uygulama Alanları

- 1) Nanoaygıt ve transistörlerden bütünleşik devre.
- 2) Kalıcı bilgisayar belleğı ve laptop bilgisayarı.
- 3) Karbon nanotüp düz ekran televizyonlar.
- 4) Kurşun geçirmeyen kumaşlar, nanotext denilen leke ve bakteri tutmayan kumaşlar.
- 5) Ortamda bulunan zehirli gazları algılayabilen gaz dedektörü.
- 6) Hidrojen depolama ve yakıt hücresi.

- 7) Nanomiknatis, yüksek yoğunluklu bilgi depolayan küçük ölçekli sabit disk ve deformasyon ölçmeye yönelik ölçü aygıtları.

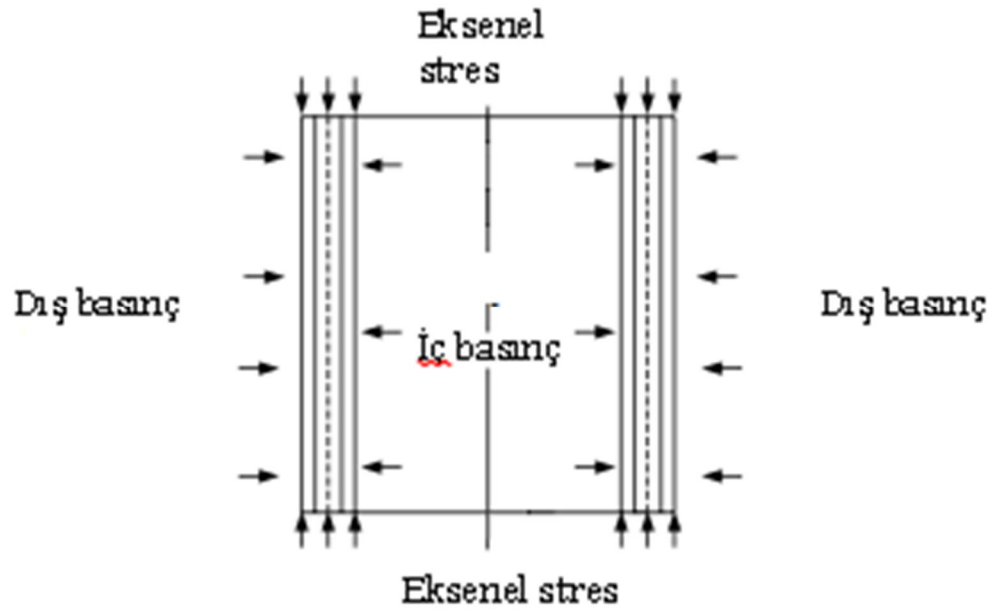
2.11 Literatürde Karbon Nanotüpleri Bükülmesi ve Matematiksel İfadeleri

Son zamanlarda yapılan çeşitli deneysel sonuçlar, modelin boyutları veya araştırılan malzemenin hacmi küçüldüğü zaman mekanik özelliklerde boyut etkisinin önemli olduğunu göstermiştir. Klasik süreklilik teorilerinin, modelin boyutu malzemenin iç uzunluk boyutu ile karşılaştırılabilir bir boyutta olduğu zaman başarısız olduğu düşünülmektedir. Bu eksikliği gidermek için klasik elastisite formüllerinde çeşitli değişiklikler ileri sürülmüştür.

Nanoyapıların mekanik davranışlarını anlamada yerel olmayan etkilerin klasik elastisiteye göre çok daha güçlü olduğu vurgulanmıştır. Nanoteknolojide ilk uygulamalar karbon nanotüp yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karbon nanotüpler nanoteknolojinin gelişmesine çok önemli katkılar sağlamaktadır. Karbon nanotüpler hem yapısal, hem de mekanik özellikleri bakımından nanoölçekteki malzemelere en güzel örneklerden biri olup, sahip oldukları olağanüstü özelliklerden dolayı bilinen en sert ve en güçlü liflerdir. Karbon nanotüplerin son 10 yıldaki keşifleri, birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Bu çalışmada karbon nanotüpler, nano boyutta grafit karbonların içi boş silindirik çubukları olarak düşünülebilir. Bu tüpler çekmeye karşı dayanıklıdır ancak basınca karşı mukavemetleri oldukça düşüktür. Bu nedenle, bunların basınç etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi büyük önem kazanır.

Çok katmanlı atomik nano modeller oldukça pahalı olmasının yanında makro düzeyde etkileri olmayan Van der Waals kuvvetleri nano düzeyde özellikle çok duvarlı nanotüpler için çok önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenlerle var olan devamlı kabuk modeli gibi devamlılık modelleri çok duvarlı nanotüplerin mekanik özelliklerini incelemek için direkt olarak kullanılamazlar. Bu yüzden, çok duvarlı nanotüpler için van der Waals kuvvetlerini de içine alan devamlı mekanik model geliştirmek için uğraşılmıştır. CNT 'lerin mekanik davranışları özellikle Ru tarafından (2000) gösterilen isotopik elastik kabuk modeliyle kritik stres ve bükülme dalga boyu tahmini, moleküler dinamik simülasyonlarıyla elde edilen tek duvarlı nanotüplerin (SWNTs) aksenal sıkışma (aksenal basınç) sonuçları ile birbirini doğrulamaktadır [3,8]. İsootropik elastik kabuk modeli SWNT'lerin bükülme

özelliğinin ana nedenini bulmada kullanılabileceği inanılmaktadır. Bununla beraber MWNT'ler için kıyaslama hala yeterli oranda simülasyon modelleri yada deney çalışmaları olmamasından ötürü yapılamamasına rağmen, çok duvarlı nanotüplerin (MWNTs) aksel sıkıştırılmış bükülmesinin büyük çap-kalınlık oranı çoklu elastik kabuk modeliyle çalışılmıştır [8]. Bunun başlıca sebebi bükülmeyi gözlemleyen karbon nanotüpü deneylerinde CNT'lerin çok küçük olması nedeniyle bu deneyler hala gelişme aşamasındadır ve simülasyon çalışmaları daha yaygındır (Şekil 2.11) [9].



Şekil 2.11 : Yarıçap yönündeki (radyal) bir iç dış basınç altında aksel sıkıştırılmış bükülmesi

2.11.1 Basit Denklemler:

Elastik kabuk modeli SWNT ve MWNT' lere en etkili şekilde uyarlanmış olup MWNT'ler için her bir konsantrik nanotüpü tek bir lastik kabuk olarak tanımlayıp ve herhangi iki tüp arasındaki ara katman sürtünmesini ihmal edilebilir varsayan çoklu elastik kabuk modeli geliştirilmiştir.

2.11.2 Çoklu elastik kabuk modeli:

$$D_0 \nabla^8 w = \nabla^4 p(x, \theta) + F_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} \nabla^4 w + \frac{F_\theta}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \nabla^4 w - \frac{Eh}{R^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}$$

x : Eksenel koordinat

θ : Çembere ait açısal koordinat

w : Bükülmeye bağlı radyal sapma

$p(x, \theta)$: Bükülmeye bağlı net normal basınç

F_x : Bükülmeye bağlı bilinen çeper kuvvet

F_θ : Bükülmeye bağlı bilinen çembere ait açısal kuvvet

E : Young modül

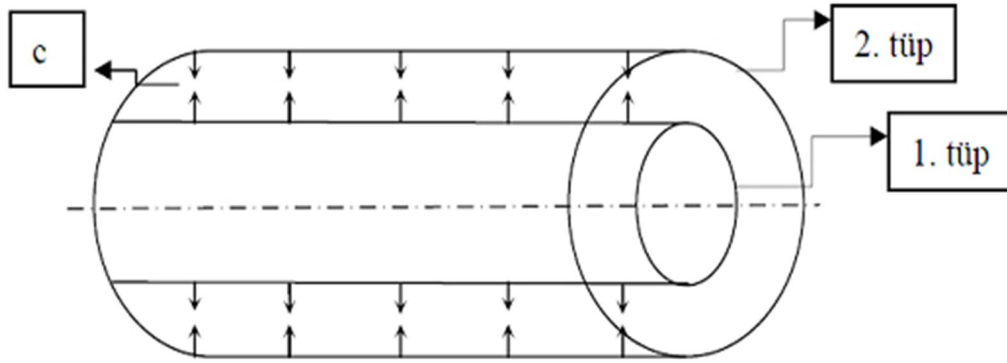
D_0 : Etkin eğilme sertliği

h : Kabuk kalınlığı

Bir çok çalışma karbon nanotüplerin bilinen malzemeler içinde en üstün mekanik özellikler gösterdiğini sergilemiş olmakla beraber, kompozit (birleşik) maddeler için de süper fiber olarak gelecek vaat etmektedir. Bu nedenle karbon nanotüplerin en gelecek vaat edici kullanımlarından biri olan karbon nanotüplerin benzersiz bükülme direnci ile elastikiyetini bir araya getirerek bundan faydalanmışlardır. Fakat atomik modeller MWNT'ler için çok pahalı olduğu için devamlı mekanik modeller karbon nanotüplerin çalışmak anlamında daha yararlı olmaktadır[10]. Yukarıda da değinildiği gibi karbon nanotüplerinin ara katman yer değiştirmeleri ve ilgili Van der Waals kuvvetlerinin MWNT'lerinin mekanik özellikleri üzerine çok önemli etkileri olduğuna dair deliller bulunmuştur [3]. Bu nedenle şu an var olan devamlı modeller, diğer bir ifade ile elastik model ve kabul modelleri, MWNT'lere direkt olarak uygulanamaz [10]. Bu da alışıla gelmiş devamlı modelleri oldukça zorlu hale getirmektedir.

2.12 Çift Duvarlı Karbon Nanotüpler

Çift duvarlı bir nanotüp şematik olarak aşağıdaki gibi gösterilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 : Çift duvarlı karbon nanotüpün şematik gösterimi

Burada, c ; Van der Waals bağlarını göstermektedir ve atomlar arası çekim kuvvetini ifade etmektedir. Bir başka deyişle, mekanik anlamda iki tüp arasında yay varmış gibi düşünülebilir. Çift duvarlı tüp için çökme denklemlerini yazarsak (denklem 2.2,2.3).

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 w_1(x)}{\partial x^4} = c(w_2 - w_1) \quad (2.2)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 w_2(x)}{\partial x^4} + q = c(w_1 - w_2) \quad (2.3)$$

2.12.1 Çift duvarlı karbon nanotüplerin bükülmesi elastik modeller

MWNT'lerde ki bitişik tüpler arasında ki sürtünme enerji bariyeri o kadar düşüktür ki daha sonra birbirleri arasında kayıp serbestçe dönebilirler. DWNT'lerle (çift duvarlı karbon nanotüp) ilgili çalışmalar bu nedenlerden ötürü değerini arttırmıştır. DWNT'ler çift kabuk modelleriyle çalışılmış olup, SWNT'lerin içerisine ara tüp yerleştirmenin kabuk bükülümü açısından kritik aksenal gerinim değişikliği yapmadığı görülmüştür [3,11] ve iç tüpün dış tüpe bağlı olarak rahatça dönmesine olanak vermiştir. Fakat bu durum tek katmanlı kabul modeliyle tamamen zıt düşmektedir ve onu da uygulamaz hale getirmektedir [12]. Tek katmanlı kabuk modelinde kalınlık iki katına çıktığında silindirik kabuğun aksenal geriniminin de iki katına çıkması gerektiği tahmin edilir.

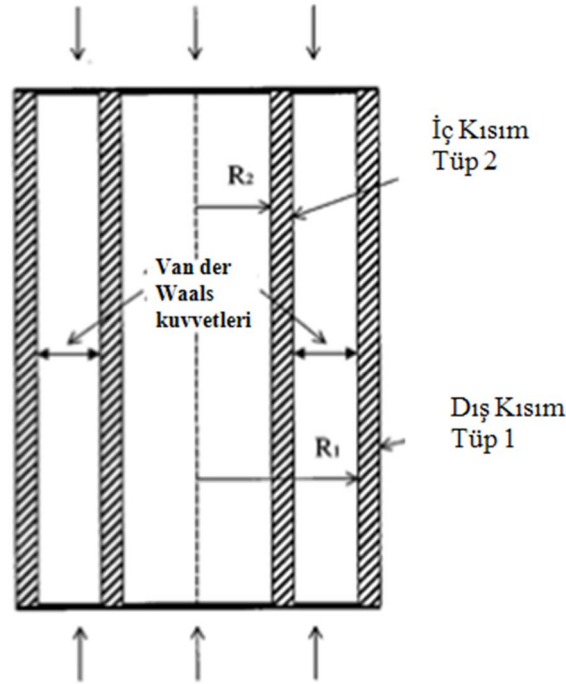
Diğer bir yandan MWNT'lerde ki bitişik tüpler arasında ki sürtünme enerji bariyeri o kadar düşüktür ki daha sonra birbirleri arasında kayıp serbestçe dönebilirler. DWNT'lerle (çift duvarlı karbon nanotüp) ilgili çalışmalar bu nedenlerden ötürü değerini arttırmıştır. DWNT'ler çift kabuk modelleriyle çalışılmış olup, SWNT'lerin içerisine ara tüp yerleştirmenin kabuk bükülümü açısından kritik aksenal gerinim değişikliği yapmadığı görülmüştür [3, 11] ve iç tüpün dış tüpe bağlı olarak rahatça dönmesine olanak vermiştir. Fakat bu durum tek katmanlı kabul modeliyle tamamen zıt düşmektedir ve onu da uygulamaz hale getirmektedir [12]. Tek katmanlı kabuk modelinde kalınlık iki katına çıktığında silindirik kabuğun aksenal geriniminin de iki katına çıkması gerektiği tahmin edilir.

Bu durumda izlenebilecek yollardan bir tanesi MWNT'lerde ki kolon bükülmesi üzerinde ki ara tabaka yer değiştirmelerinin etkilerinin araştırılması gerekmektedir. Bilindiği gibi SWNT'lerin bükülme dirençleri oldukça düşüktür (kalınlık için 0.34nm kullanıldığında elastik kabuk modelinde tahmin edilen değerden 25 kat daha düşüktür). Bu nedenle MWNT'ler bükülme direncini artırmak için en ideal adaylar olarak değerlendirilmektedirler. MWNT'ler geleneksel tek katmanlı elastik tüplerden delikli çok katmanlı yapıları ve ilgili ara tüp van der Waals kuvvetleri sayesinde ayırt edilirler. Diğer bir yandan Ru [10] çalışmasında göstermiştir ki: rastlantısal olmayan yönü değiştirilmiş kolon eksenleri ihmal edilebilir bu koşul ancak ve ancak: bükülme modunun yarı-dalga boyu en büyük dış çaptan büyükse sağlanır. Fakat bu model yarı-dalga boyu en dış çapa yakın yada daha küçük olduğu zaman uygulanabilirliği sorgulanmaktadır. Bu yüzden var olan tek-kolon modeli çok elastik ortamlarla çevrili olan MWNT'lere uygulanamaz. MWNT'lerin aksenal sıkışmış kabuk bükülmesi kolon bükülmesi ile tamamen ters düşmektedir. Ru [10] çalışmasında ara katman yer değiştirmeleri van der Waals kuvvetlerinin büyüklüğünden bağımsız olarak DWNT'lerin kritik aksenal gerinimini dramatik bir şekilde düşürdüğünü göstermiştir. Bu ayırt edici özellik MWNT'lerin tüm tüplerinin eğilme sertliğinin merkezden başlayarak hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle eğer ki iç tüplerin içerisine başka bir tüp girer yada çıkarsa bu hesaplamayı değiştirmeyecektir. Fakat kabuk MWNT'lerin eğilme sertliği orta-yüzden hesaplandığı için her hangi bir tüp eklenip çıkarıldığı zaman hesaplamaları değiştirmektedir. Buda ara katman yer değiştirmelerinin MWNT'lerin kabuk bükülmesi üzerinde ne denli etkisi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Eksenel sıkışma altında çift duvarlı nanotüplerin kritik eksenel gerinimi için bulunan basit formül van der Waals kuvvetlerinin iki duvarlı nanotüplerin son derece küçük bükülme kritik eksenel gerinimini tek duvarlı nano tüplerinde olduğu gibi arttırmadığını göstermiştir. Bu tek duvarlı nanotüplerin kritik eksenel gerinimi iç tüp eklenmesiyle artmayacağı anlamına gelmektedir bununla beraber iç tüp eklenmesi toplam kesit alanını arttırması yüzünden toplam kritik eksenel kuvveti arttırmaktadır. Bu kuram sadece çift duvarlı nanotüpler için geçerli olup çoklu karbon nanotüpler için uygulanabilir olup olmaması yeni bir araştırma konusudur [10].

2.12.2 Termal açıdan değerlendirilmesi

Çift duvarlı karbon nanotüplerin bükülme sonrası tahminleri sürekli kesme deformasyon kabuk modeline dayanarak ısı çevresi içinde ki birleşmiş eksenel ve radyal mekanik yüklemeleri bağlı olarak yapılmış olan çalışmada ısıya bağlı madde özellikleri ve başlangıç nokta kusurları göz önüne de alınarak şu sonuçlar bulunmuştur: sıcaklık değişiminin DWNT'lerin bükülme sonrası davranışlarında çok küçük bir etkisi vardır ve sürekli kesme deformasyon kabuk modeli ile madde özellikleri ve etkili duvar kalınlığı verildiği takdirde DWNT'lerin bükülme sonrası tepkilerini bulabiliriz (Şekil 2.13) [9].



Şekil 2.13 : Eksenel sıkışma altında çift duvarlı karbon nanotüp elastik modeli

2.12.3 Yerel olmayan elastisite teorisi ile nanotüplerin ilişkisi

Yerel olmayan elastisite ile klasik elastisite arasındaki temel fark, yerel olmayan elastisitenin iç atomik kuvvetlerinin uzak erişimli özelliğini korumasıdır. Klasik elastisite teorisi, küçük uzunluk ölçeğindeki klasik sürekli ortam modellerin hesaplanmasında yetersiz kalır. Önerilen nanoteknoloji aygıtları nanometre boyutlarındaki uzunluklarla ilgilenir. Bu boyutlardaki aygıtlar için yerel olmayan etkiler önemlidir. Bu yüzden atomik boyutlardaki olguları açıklayamaz.

1) Atomik boyutlardaki çubukların eğilmesinde yerel olmayan elastisitenin kullanılmasının klasik elastisiteye göre çok daha üstün dir.

2) Nano yapıların mekanik davranışlarını anlamada yerel olmayan etkilerin önemli olduğunu, dolayısıyla da yerel olmayan etkilerin nano teknolojide önemli olduğunu göstermek olduğunu söyleyebiliriz. [13]

2.13 Çift ve Tek Duvarlı Karbon Nanotüplerin Burkulması

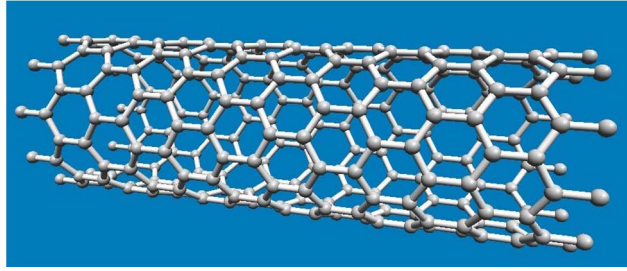
Elastik bir çubuğa etki eden eksenel kuvvetin değeri arttırıldığında, kuvvet belli bir değerin üstüne çıktığı andan itibaren dengesini kaybederek kararsız denge konumuna gelir ve eğilmeye başlar. Çubuk elastik eğri şeklini alır. Bu eksenel kuvvetin değeri arttırılmaya devam edilirse çubuğun eğilme miktarı artar ve öyle bir an gelir ki çubuk kırılır. Bu olaya burkulma (buckling) denir.

Eğer çubuk burkulursa, eğri formdan ötürü gelen zorlamalar o kadar büyük olur ki çubuk deforme olur. Mühendisler için önemli olan nokta, çubuğun burkulmaması - nı sağlamaktır. Burada, burkulmada çubuğa dışarıdan bir eğilme momenti etkilemediğini, çubuğun eksenel kuvvet etkisinde dengesini kaybederek eğildiğini dikkate aldığımızı unutmamak gerekir. Bu eksenel kuvvetin arttırımı sırasında çubuğun stabilizesini bozan en küçük yük, kritik burkulma yüküdür.

3. ÇİFT DUVARLI TÜPLERDE BURKULMANIN BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ YÖNTEMİYLE İNCELENMES.

3.1 İki Ucu Basit Mafsallı Tek ve Çift Kirişte Burkulma Yükleri

3.1.1 Burkulmaya ait denklem sistemi tek duvarlı çubukta aşağıda yazdığımız formullarda (Şekil 3.1) (denklem 3.1,3.2,3.3,3.4).



Şekil 3.1: Tek duvarlı çubuk

$$\frac{dv}{dz} = \varphi \quad (3.1)$$

$$\frac{d\varphi}{dz} = -\frac{M}{EI} \quad (3.2)$$

$$\frac{dM}{dz} = T + N\varphi \quad (3.3)$$

$$\frac{dT}{dz} = 0 \quad (3.4)$$

Burada v: çökme , φ : dönme , M: moment , T: kesme kuvveti dir.

Bu denklem sistemi matris formunda (denklem 3.5).

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{EI} & 0 \\ 0 & N & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Şeklinde yazılabilir. Yada aşağıda yazdığımız formullarda (denklem 3.6).

$$\frac{d\vec{y}}{dz} = A\vec{y} \quad (3.6)$$

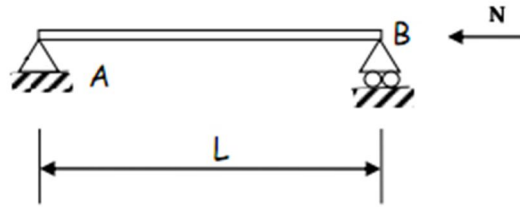
Burada $\vec{y} = \begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix}$ dir.

bu sistemin çözümün şöyle yazılır (denklem 3.7).

$$\vec{y} = e^{Az} \vec{y}_0 \quad (3.7)$$

$$\vec{y}_0 = \begin{bmatrix} v(0) \\ \varphi(0) \\ M(0) \\ T(0) \end{bmatrix}$$

Örnek: İki ucu mafsallı çubuğun burkulma yükünün hesabı (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: İki ucu mafsallı çubuğun

$v(0) = v(L) = 0$, $M(0) = M(L) = 0$ dır. Dolayısıyla Başlangıç değerlerinden ikisi bilinmektedir. [$v(0)=M(0)=0$]

(3.7) denklemi açık yazılırsa.

$$\begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TM_{11} & TM_{12} & TM_{13} & TM_{14} \\ TM_{21} & TM_{22} & TM_{23} & TM_{24} \\ TM_{31} & TM_{32} & TM_{33} & TM_{34} \\ TM_{41} & TM_{42} & TM_{43} & TM_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi(0) \\ 0 \\ T(0) \end{bmatrix}$$

TM: Taşıma Matrisi

$$v(z) = TM_{11}(z) \times 0 + TM_{12}(z) \times \varphi(0) + TM_{13}(z) \times 0 + TM_{14}(z) \times T(0)$$

$$M(z) = TM_{31}(z) \times 0 + TM_{32}(z) \times \varphi(0) + TM_{33}(z) \times 0 + TM_{34}(z) \times T(0)$$

$$v(L) = TM_{12}(L) \times \varphi(0) + TM_{14}(L) \times T(0) = 0$$

$$M(L) = TM_{32}(L) \times \varphi(0) + TM_{34}(L) \times T(0) = 0$$

Veya

$$\begin{pmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) \\ TM_{32}(L) & TM_{34}(L) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varphi(0) \\ T(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu denklem sisteminin bir çözümünün olabilmesi için şöyle olmalıdır (denklem 3.8).

$$\det \begin{pmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) \\ TM_{32}(L) & TM_{34}(L) \end{pmatrix} = 0 \quad (3.8)$$

Literatürde iki ucu mafsallı tek duvarlı çubuğun burkulma yükü aşağıdaki gibi bulunur (denklem 3.9).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = 9.8696 \quad (3.9)$$

e^x in o noktası komşuluğunda seri açılımıdır.

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

x yerine Az yazılırsa e^{Az} (Taşıma Matrisisi) aşağıda yazdığımız formül gibi (denklem 3.10).

$$e^{Az} = I + \frac{Az}{1!} + \frac{A^2 z^2}{2!} + \frac{A^3 z^3}{3!} + \dots \quad (3.10)$$

Burada

I: Birim matris, A: katsayılar matrisi dir (Bkz 3.5,3.6).

L=1 ve EI=1

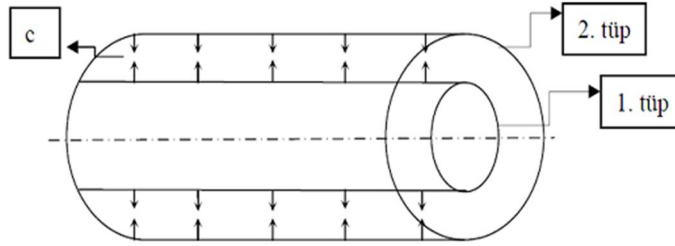
Tek duvarlı çubuk için taşıma matrisini kesin olarak hesaplamak mümkündür. Ancak biz burada (3.10) te verilen yaklaşık ifade ile taşıma matrisini bulup, Burkulma

yükünü hesaplayarak elde ettiğimiz sonuçları (3.9) de verilen kesin sonuçla karşılaştıracamız. (3.10) ifadesinden 6 terim alarak taşıma matrisini bulur ve (3.8) verilen determinant yardımıyla burkulma yükünü hesaplırsak 9.00 çıkmaktadır. Aynı şeyi 15 terim ile yaparsak kesin sonuca (9,8696 yı) buluyoruz.

Çizelge 3.1 de tek ve çift duvarlı iki ucu mafsallı çubuğun burkulma yükleri verilmiştir.

3.1.2 Çift duvarlı çubuğun burkulmaya ait denklem sistemi

Çift duvarlı çubuğun burkulmaya ait denklem sistemi aşağıdaki gibi yazılır (Şekil 3.3), (denklemler 3.11,3.12,3.13,3.14,3.15,3.16,3.17,3.18).



Şekil 3.3: Çift duvarlı çubuk

$$\frac{dv_1}{dz} = \varphi_1 \quad (3.11)$$

$$\frac{d\varphi_1}{dz} = -\frac{M_1}{EI_1} \quad (3.12)$$

$$\frac{dM_1}{dz} = T_1 + N\varphi_1 \quad (3.13)$$

$$\frac{dT_1}{dz} = C(v_1 - v_2) \quad (3.14)$$

$$\frac{dv_2}{dz} = \varphi_2 \quad (3.15)$$

$$\frac{d\varphi_2}{dz} = -\frac{M_2}{EI_2} \quad (3.16)$$

$$\frac{dM_2}{dz} = T_2 \quad (3.17)$$

$$\frac{dT_2}{dz} = -C(v_1 - v_2) \quad (3.18)$$

Burada v : çökme , φ :dönme , M : moment , T : kesme kuvveti, $C(v_1-v_2)$: çubuklar arasındaki etkileşmeyi gösteren Van der Waals kuvvetidir.

Bu denklem sistemi matris formunda aşağıdaki gibi bulunur (denklem 3.19).

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} v_1 \\ \varphi_1 \\ M_1 \\ T_1 \\ v_2 \\ \varphi_2 \\ M_2 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{EI_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{EI_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \varphi_1 \\ M_1 \\ T_1 \\ v_2 \\ \varphi_2 \\ M_2 \\ T_2 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

şeklinde yazılabilir. Yada

$$\frac{d\vec{y}}{dz} = A\vec{y}$$

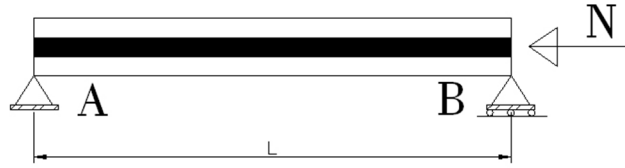
$$\text{burada } \vec{y} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \varphi_1 \\ M_1 \\ T_1 \\ v_2 \\ \varphi_2 \\ M_2 \\ T_2 \end{bmatrix} \text{ dir.}$$

bu sistemin çözümün

$$\vec{y} = e^{Az} \vec{y}_0$$

$$\bar{y}_0 = \begin{bmatrix} v_1(0) \\ \varphi_1(0) \\ M_1(0) \\ T_1(0) \\ v_2(0) \\ \varphi_2(0) \\ M_2(0) \\ T_2(0) \end{bmatrix}$$

Örnek : İki ucu mafsallı çift duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: İki ucu mafsallı çift duvarlı çubuk

Bu örnek’de $v_1(0) = v_2(0) = M_1(0) = M_2(0) = 0$ dır. Dolayısıyla Başlangıç değerlerin-den dördü bilinmektedir (denklem 3.20).

$$\begin{bmatrix} v_1(z) \\ \varphi_1(z) \\ M_1(z) \\ T_1(z) \\ v_2(z) \\ \varphi_2(z) \\ M_2(z) \\ T_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TM_{11} & TM_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{18} \\ TM_{21} & TM_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{28} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ TM_{81} & TM_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_1(0) \\ 0 \\ T_1(0) \\ 0 \\ \varphi_2(0) \\ 0 \\ T_2(0) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

TM: Taşıma Matrisi

Bu dört bilinmiyeni bulmak için 4 uç koşuluna ihtiyacımız vardır.

Bunlar:

$$v_1(L) = v_2(L) = 0$$

$$M_1(L) = M_2(L) = 0 \text{ dır.}$$

$$v_1(z) = TM_{12}(z) \times \varphi_1(0) + TM_{14}(z) \times T_1(0) + TM_{16}(z) \times \varphi_2(0) + TM_{18}(z) \times T_2(0)$$

$$v_2(z) = TM_{52}(z) \times \varphi_1(0) + TM_{54}(z) \times T_1(0) + TM_{56}(z) \times \varphi_2(0) + TM_{58}(z) \times T_2(0)$$

$$M_1(z) = TM_{32}(z) \times \varphi_1(0) + TM_{34}(z) \times T_1(0) + TM_{36}(z) \times \varphi_2(0) + TM_{38}(z) \times T_2(0)$$

$$M_2(z) = TM_{72}(z) \times \varphi_1(0) + TM_{74}(z) \times T_1(0) + TM_{76}(z) \times \varphi_2(0) + TM_{78}(z) \times T_2(0)$$

$$v_1(L) = TM_{12}(L) \times \varphi_1(0) + TM_{14}(L) \times T_1(0) + TM_{16}(L) \times \varphi_2(0) + TM_{18}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$v_2(L) = TM_{52}(L) \times \varphi_1(0) + TM_{54}(L) \times T_1(0) + TM_{56}(L) \times \varphi_2(0) + TM_{58}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$M_1(L) = TM_{32}(L) \times \varphi_1(0) + TM_{34}(L) \times T_1(0) + TM_{36}(L) \times \varphi_2(0) + TM_{38}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$M_2(L) = TM_{72}(L) \times \varphi_1(0) + TM_{74}(L) \times T_1(0) + TM_{76}(L) \times \varphi_2(0) + TM_{78}(L) \times T_2(0) = 0$$

Veya,

$$\begin{bmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) & TM_{16}(L) & TM_{18}(L) \\ TM_{32}(L) & TM_{34}(L) & TM_{36}(L) & TM_{38}(L) \\ TM_{52}(L) & TM_{54}(L) & TM_{56}(L) & TM_{58}(L) \\ TM_{72}(L) & TM_{74}(L) & TM_{76}(L) & TM_{78}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1(0) \\ T_1(0) \\ \varphi_2(0) \\ T_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu denklem sistemini bir çözümünün olabilmesi için aşağıdaki olmalıdır (denklem 3.21).

$$\det \begin{bmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) & TM_{16}(L) & TM_{18}(L) \\ TM_{32}(L) & TM_{34}(L) & TM_{36}(L) & TM_{38}(L) \\ TM_{52}(L) & TM_{54}(L) & TM_{56}(L) & TM_{58}(L) \\ TM_{72}(L) & TM_{74}(L) & TM_{76}(L) & TM_{78}(L) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.21)$$

Literatürde iki ucu mafsallı tek duvarlı çubuğun burkulma yükü aşağıdaki gibi bulunur (denklem 3.22).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = 9.8696 \quad (3.22)$$

(3.22) ifadesi tek duvarlı çubuk için geçerli dir, çift duvarlı çubuk için literatürde böyle bir bağıntı yok.

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

e^x in o noktası komşuluğunda seri açılımıdır.

x yerine Az yazılırsa e^{Az} (Taşıma Matrisisi) aşağıda yazdığımız formül gibidir (denklem 3.23).

$$e^{Az} = I + \frac{Az}{1!} + \frac{A^2 z^2}{2!} + \frac{A^3 z^3}{3!} + \dots \quad (3.23)$$

I: Birim matrisi, A: katsayılar matrisidir (Bkz 3.5,3.6).

L=1 ve EI₁=1 ve EI₂=0.4 ve C=2

Biz burada (3.23) te verilen yaklaşık ifade ile taşıma matrisini bulup, Burkulma yükünü hesaplayarak elde ettiğimiz sonuçları tek duvarlı çubuk için (3.22) de verilen kesin sonuçla karşılaştıracğız. (3.23) ifadesinden 10 terim alarak taşıma matrisini bulur ve (3.21) verilen determinant yardımıyla burkulma yükünü hesaplırsak 10.0581 çıkmaktadır. Görüldüğü gibi çift duvarlı çubukta burkulma yükü 10.0581 çıkmaktadır. Bu değer tek duvarlı çubuğa ait burkulma yükünden biraz daha yüksektir. Bu da beklenen bir sonuçtur.

Çizelge 3.1: İki ucu mafsallı tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları

Terim sayısı	Burkulma yükü tek duvarlı çubuk	Burkulma yükü Çift duvarlı çubuk
6	9.0000	9.9804
8	9.4780	9.6669
10	9.9142	10.1029
12	9.8668	10.0553
14	9.8697	10.0582
16	9.8696	10.0580
18	9.8696	10.0580
20	9.8696	10.0580

3.2 Bir Ucu Ankastre Diğer Ucu Serbest Tek ve Çift Duvarlı Kirişte Burkulma Yükleri

3.2.1 Bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek duvarlı çubuğun burkulma yükü

Örnek : Bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Bir ucu ankastre diğer ucu serbest

Literatürde bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek duvarlı çubuğun burkulma yükü aşağıdaki gibi bulunur (3.24),[16].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(2L)^2} = 2.4674 \quad (3.24)$$

$$v(0) = 0, \quad \varphi(0) = 0$$

Dolayısıyla Başlangıç değerlerinden ikisi bilinmektedir. [$V(0) = \varphi(0) = 0$]

(3.6) denklemi açık yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TM_{11} & TM_{12} & TM_{13} & TM_{14} \\ TM_{21} & TM_{22} & TM_{23} & TM_{24} \\ TM_{31} & TM_{32} & TM_{33} & TM_{34} \\ TM_{41} & TM_{42} & TM_{43} & TM_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M(0) \\ T(0) \end{bmatrix}$$

TM: Taşıma Matrisi

Uç koşulları

$$M(L) = T(L) = 0$$

$$M(L) = TM_{33}(L) \times M(0) + TM_{34}(L) \times T(0) = 0$$

$$T(L) = TM_{43}(L) \times M(0) + TM_{44}(L) \times T(0) = 0$$

Veya

$$\begin{pmatrix} TM_{33}(L) & TM_{34}(L) \\ TM_{43}(L) & TM_{44}(L) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} M(0) \\ T(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu denklem sisteminin bir çözümünün olabilmesi için aşağıdaki determinat olmalıdır (denklem 3.25).

$$\det \begin{pmatrix} TM_{33}(L) & TM_{34}(L) \\ TM_{43}(L) & TM_{44}(L) \end{pmatrix} = 0 \quad (3.25)$$

Bu koşul yardımıyla burkulma yükü (3.24) deki gibi bulunur.

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

e^x in o noktası komşuluğunda seri açılımıdır.

x yerine Az yazılırsa e^{Az} (Taşıma Matrisisi) aşağıda yazdığımız formül gibi (denklem 3.26).

$$e^{Az} = I + \frac{Az}{1!} + \frac{A^2 z^2}{2!} + \frac{A^3 z^3}{3!} + \dots \quad (3.26)$$

I: Birim matrisi, A: katsayılar matrisi dir.(Bkz 3.5,3.6)

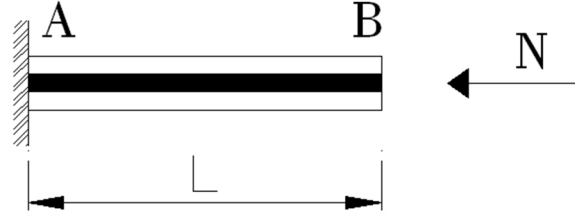
L=1 ve EI=1

Tek duvarlı çubuk için taşıma matrisini kesin olarak hesaplamak mümkündür. Ancak biz burada (3.26) te verilen yaklaşık ifade ile taşıma matrisini bulup, burkulma yükünü hesaplayarak elde ettiğimiz sonuçları (3.24) de verilen kesin sonuçla karşılaştıracğız. (3.26) ifadesinden 6 terim alarak taşıma matrisini bulur ve (3.25) verilen determinant yardımıyla burkulma yükünü hesaplarsak 2.4646 çıkmaktadır. Aynı şeyi 10 terim ile yaparsak kesin sonuca (2.4674 yı) buluyoruz.

Çizelge 3.2 de Bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma yükleri verilmiştir.

3.2.2 Bir ucu ankastre diğer ucu serbest çift duvarlı çubuğun burkulma yükü

Örnek : Bir ucu ankastre diğer ucu serbest çift duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Bir ucu ankastre diğer ucu serbest çift duvarlı çubuk

Bu örnek’de $v_1(0) = v_2(0) = \varphi_1(0) = \varphi_2(0) = 0$ dır. Dolayısıyla Başlangıç değerlerinden dördü bilinmektedir (denklem 3.27).

$$\begin{bmatrix} v_1(z) \\ \varphi_1(z) \\ M_1(z) \\ T_1(z) \\ v_2(z) \\ \varphi_2(z) \\ M_2(z) \\ T_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TM_{11} & TM_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{18} \\ TM_{21} & TM_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{28} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ TM_{81} & TM_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_1(0) \\ T_1(0) \\ 0 \\ 0 \\ M_2(0) \\ T_2(0) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

TM: Taşıma Matrisi

Bu dört bilinmiyeni bulmak için 4 uç koşuluna ihtiyacımız vardır.

Bunlar:

$$M_1(L) = M_2(L) = 0$$

$$T_1(L) = T_2(L) = 0 \text{ dır.}$$

$$T_1(z) = TM_{33}(z) \times M_1(0) + TM_{34}(z) \times T_1(0) + TM_{36}(z) \times M_2(0) + TM_{38}(z) \times T_2(0)$$

$$M_1(z) = TM_{43}(z) \times M_1(0) + TM_{44}(z) \times T_1(0) + TM_{46}(z) \times M_2(0) + TM_{48}(z) \times T_2(0)$$

$$T_2(z) = TM_{73}(z) \times M_1(0) + TM_{74}(z) \times T_1(0) + TM_{76}(z) \times M_2(0) + TM_{78}(z) \times T_2(0)$$

$$M_2(z) = TM_{83}(z) \times M_1(0) + TM_{84}(z) \times T_1(0) + TM_{86}(z) \times M_2(0) + TM_{88}(z) \times T_2(0)$$

$$T_1(L) = TM_{33}(L) \times M_1(0) + TM_{34}(L) \times T_1(0) + TM_{36}(L) \times M_2(0) + TM_{38}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$M_1(L) = TM_{43}(L) \times M_1(0) + TM_{44}(L) \times T_1(0) + TM_{46}(L) \times M_2(0) + TM_{48}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$T_2(L) = TM_{73}(L) \times M_1(0) + TM_{74}(L) \times T_1(0) + TM_{76}(L) \times M_2(0) + TM_{78}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$M_2(L) = TM_{83}(L) \times M_1(0) + TM_{84}(L) \times T_1(0) + TM_{86}(L) \times M_2(0) + TM_{88}(L) \times T_2(0) = 0$$

veya

$$\begin{bmatrix} TM_{33}(L) & TM_{34}(L) & TM_{36}(L) & TM_{38}(L) \\ TM_{43}(L) & TM_{44}(L) & TM_{46}(L) & TM_{48}(L) \\ TM_{73}(L) & TM_{74}(L) & TM_{76}(L) & TM_{78}(L) \\ TM_{83}(L) & TM_{84}(L) & TM_{86}(L) & TM_{88}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1(0) \\ T_1(0) \\ M_2(0) \\ T_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu denklem sistemini bir çözümünün olabilmesi için aşağıdaki determinat olmalıdır

(denklem 3.28).

$$\det \begin{bmatrix} TM_{33}(L) & TM_{34}(L) & TM_{36}(L) & TM_{38}(L) \\ TM_{43}(L) & TM_{44}(L) & TM_{46}(L) & TM_{48}(L) \\ TM_{73}(L) & TM_{74}(L) & TM_{76}(L) & TM_{78}(L) \\ TM_{83}(L) & TM_{84}(L) & TM_{86}(L) & TM_{88}(L) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.28)$$

Literatürde bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek duvarlı çubuğun burkulma yükü aşağıdaki gibi bulunur (denklem 3.29),[16].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(2L)^2} = 2.4674 \text{ dir.} \quad (3.29)$$

(3.29) ifadesi tek duvarlı çubuk için geçerli dir, çift duvarlı çubuk için literatürde böyle bir bağıntı yok.

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

e^x in o noktası komşuluğunda seri açılımıdır.

x yerine Az yazılırsa e^{Az} (Taşıma Matrisisi) aşağıda yazdığımız formül gibi (denklem 3.30).

$$e^{Az} = I + \frac{Az}{1!} + \frac{A^2 z^2}{2!} + \frac{A^3 z^3}{3!} + \dots \quad (3.30)$$

I: Birim matrisi, A: katsayılar matrisi dir.(Bkz 3.5,3.6)

L=1 ve EI₁=1 ve EI₂=0.4 ve C=2

Biz burada (3.30) te verilen yaklaşık ifade ile taşıma matrisini bulup, Burkulma yükünü hesaplayarak elde ettiğimiz sonuçları tek duvarlı çubuk için (3.29) de verilen kesin sunucla karşılaştıracamız. (3.30) ifadesinden 6 terim alarak taşıma matrisini bulur ve (3.28) verilen determinant yardımıyla burkulma yükünü hesaplarsak 3.0671 çıkmaktadır. Görüldüğü gibi çift duvarlı çubukta burkulma yükü 3.1617 çıkmaktadır. Bu değer tek duvarlı çubuğa ait burkulma yükünden biraz daha yüksektir. Bu da beklenen bir sonuçtur.

Çizelge 3.2: Bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.

Terim sayısı	Burkulma yükü tek duvarlı çubuk	Burkulma yükü Çift duvarlı çubuk
6	2.4646	3.0671
7	2.4646	3.1824
8	2.46748	3.1562
10	2.4674	3.1615
12	2.4674	3.1617
14	2.4674	3.1617
18	2.4674	3.1617

3.3 İki Ucu Ankastre Tek ve Çift Duvarlı Kirişte Burkulma Yükleri

3.3.1 İki ucu ankastre tek duvarlı çubuğun burkulma yükü

Örnek : İki ucu ankastre tek duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: İki ucu ankastre tek duvarlı çubukta

Literatürde iki ucu ankastre tek duvarlı çubuğun burkulma yükü aşağıdaki gibi bulunur (denklem 3.31),[16].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{\left(\frac{L}{2}\right)^2} = 39.4784 \quad (3.31)$$

$$v(0) = 0, \varphi(0) = 0, v(L) = 0, \varphi(L) = 0$$

Dolayısıyla Başlangıç değerlerinden ikisi bilinmektedir. [$v(0) = \varphi(0) = 0$]

(3.7) denklemi açık yazılırsa

$$\begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TM_{11} & TM_{12} & TM_{13} & TM_{14} \\ TM_{21} & TM_{22} & TM_{23} & TM_{24} \\ TM_{31} & TM_{32} & TM_{33} & TM_{34} \\ TM_{41} & TM_{42} & TM_{43} & TM_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M(0) \\ T(0) \end{bmatrix}$$

TM: Taşıma Matrisi

Uç koşulları

$$v(L) = \varphi(L) = 0$$

$$v(L) = TM_{13}(L) \times M(0) + TM_{14}(L) \times T(0) = 0$$

$$\varphi(L) = TM_{23}(L) \times M(0) + TM_{24}(L) \times T(0) = 0$$

Veya

$$\begin{pmatrix} TM_{13}(L) & TM_{14}(L) \\ TM_{23}(L) & TM_{24}(L) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} M(0) \\ T(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu denklem sisteminin bir çözümünün olabilmesi için aşağıdaki determinat olmalıdır (denklem 3.32).

$$\det \begin{pmatrix} TM_{13}(L) & TM_{14}(L) \\ TM_{23}(L) & TM_{24}(L) \end{pmatrix} = 0 \quad (3.32)$$

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

e^x in o noktası komşuluğunda seri açılımıdır.

x yerine Az yazılırsa e^{Az} (Taşıma Matrisisi) aşağıda yazdığımız formül gibi (denklem 3.33).

$$e^{Az} = I + \frac{Az}{1!} + \frac{A^2 z^2}{2!} + \frac{A^3 z^3}{3!} + \dots \quad (3.33)$$

I: Birim matrisi

L=1 ve EI=1

Tek duvarlı çubuk için taşıma matrisini kesin olarak hesaplamak mümkündür. Ancak biz burada (3.33) te verilen yaklaşık ifade ile taşıma matrisini bulup, Burkulma yükünü hesaplayarak elde ettiğimiz sonuçları (3.31) de verilen kesin sonuçla karşılaştıracakız. (3.33) ifadesinden 15 terim alarak taşıma matrisini bulur ve (3.32) verilen determinant yardımıyla burkulma yükünü hesaplırsak 41.6675 çıkmaktadır. Aynı şeyi 25 terim ile yaparsak kesin sonuca (39.4784 y1) buluyoruz.

Çizelge 3.3 de tek ve çift duvarlı iki ucu ankastre çubuğun burkulma yükleri verilmiştir.

3.3.2 : İki ucu ankastre çift duvarlı çubuğun burkulma yükü

Örnek : İki ucu ankastre çift duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: İki ucu ankastre çubuğu çift duvarlı çubuk

Bu örnek’de $v_1(0) = v_2(0) = \varphi_1(0) = \varphi_2(0) = 0$ dır. Dolayısıyla Başlangıç değerlerinden dördü bilinmektedir (denklem 3.34).

$$\begin{bmatrix} v_1(z) \\ \varphi_1(z) \\ M_1(z) \\ T_1(z) \\ v_2(z) \\ \varphi_2(z) \\ M_2(z) \\ T_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TM_{11} & TM_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{18} \\ TM_{21} & TM_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{28} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ TM_{81} & TM_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_1(0) \\ T_1(0) \\ 0 \\ 0 \\ M_2(0) \\ T_2(0) \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

TM: Taşıma Matrisi

Bu dört bilinmiyeni bulmak için 4 uç koşuluna ihtiyacımız vardır.

Bunlar:

$$v_1(L) = v_2(L) = 0$$

$$\varphi_1(L) = \varphi_2(L) = 0 \text{ dır.}$$

$$v_1(z) = TM_{13}(z) \times M_1(0) + TM_{14}(z) \times T_1(0) + TM_{17}(z) \times M_2(0) + TM_{18}(z) \times T_2(0)$$

$$\varphi_1(z) = TM_{23}(z) \times M_1(0) + TM_{24}(z) \times T_1(0) + TM_{27}(z) \times M_2(0) + TM_{28}(z) \times T_2(0)$$

$$v_2(z) = TM_{53}(z) \times M_1(0) + TM_{54}(z) \times T_1(0) + TM_{57}(z) \times M_2(0) + TM_{58}(z) \times T_2(0)$$

$$\varphi_2(z) = TM_{63}(z) \times M_1(0) + TM_{64}(z) \times T_1(0) + TM_{67}(z) \times M_2(0) + TM_{68}(z) \times T_2(0)$$

$$v_1(L) = TM_{13}(L) \times M_1(0) + TM_{14}(L) \times T_1(0) + TM_{17}(L) \times M_2(0) + TM_{18}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$\varphi_1(L) = TM_{23}(L) \times M_1(0) + TM_{24}(L) \times T_1(0) + TM_{27}(L) \times M_2(0) + TM_{28}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$v_2(L) = TM_{53}(L) \times M_1(0) + TM_{54}(L) \times T_1(0) + TM_{57}(L) \times M_2(0) + TM_{58}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$\varphi_2(L) = TM_{63}(L) \times M_1(0) + TM_{64}(L) \times T_1(0) + TM_{67}(L) \times M_2(0) + TM_{68}(L) \times T_2(0) = 0$$

Veya

$$\begin{bmatrix} TM_{13}(L) & TM_{14}(L) & TM_{17}(L) & TM_{18}(L) \\ TM_{23}(L) & TM_{24}(L) & TM_{27}(L) & TM_{28}(L) \\ TM_{53}(L) & TM_{54}(L) & TM_{57}(L) & TM_{58}(L) \\ TM_{63}(L) & TM_{64}(L) & TM_{67}(L) & TM_{68}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1(0) \\ T_1(0) \\ M_2(0) \\ T_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu denklem sistemini bir çözümünün olabilmesi için aşağıdaki determinat olmalıdır (denklem 3.35).

$$\det \begin{bmatrix} TM_{13}(L) & TM_{14}(L) & TM_{17}(L) & TM_{18}(L) \\ TM_{23}(L) & TM_{24}(L) & TM_{27}(L) & TM_{28}(L) \\ TM_{53}(L) & TM_{54}(L) & TM_{57}(L) & TM_{58}(L) \\ TM_{63}(L) & TM_{64}(L) & TM_{67}(L) & TM_{68}(L) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.35)$$

Literatürde iki ucu ankastre tek duvarlı çubuğun burkulma yükü aşağıdaki gibi bulunur (denklem 3.36),[16].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{\left(\frac{L}{2}\right)^2} = 39.4784 \quad (3.36)$$

(3.55) ifadesi tek duvarlı çubuk için geçerli dir, çift duvarlı çubuk için literatürde böyle bir bağıntı yok.

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

e^x in o noktası komşuluğunda seri açılımıdır.

x yerine Az yazılırsa e^{Az} (Taşıma Matrisisi) aşağıda yazdığımız formül gibi (denklem 3.37).

$$e^{Az} = I + \frac{Az}{1!} + \frac{A^2 z^2}{2!} + \frac{A^3 z^3}{3!} + \dots \quad (3.37)$$

I: Birim matrisi

L=1 ve EI₁=1 ve EI₂=0.4 ve C=2

Biz burada (3.37) te verilen yaklaşık ifade ile taşıma matrisini bulup, Burkulma yükünü hesaplayarak elde ettiğimiz sonuçları tek duvarlı çubuk için (3.36) de verilen kesin sonuçla karşılaştıracğız. (3.37) ifadesinden 16 terim alarak taşıma matrisini bulur ve (3.35) verilen determinant yardımıyla burkulma yükünü hesaplırsak 41.6340 çıkmaktadır. Görüldüğü gibi çift duvarlı çubukta burkulma yükü 41.6340 çıkmaktadır. Bu değer tek duvarlı çubuğa ait burkulma yükünden biraz daha yüksektir. Bu da beklenen bir sonuçtur.

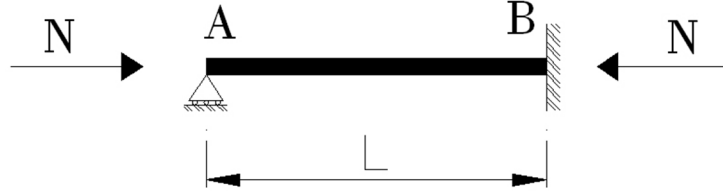
Çizelge 3.3: İki ucu ankastre tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.

Terim sayısı	Burkulma yükü tek duvarlı çubuk	Burkulma yükü Çift duvarlı çubuk
15	41.6675	40.1841
16	41.1704	41.6340
17	39.3468	39.6366
18	39.3449	39.4805
19	39.4917	39.6290
20	39.4916	39.6452
22	39.4774	39.6293
24	39.4785	39.6305
25	39.4784	39.6304
26	39.4784	39.6304
28	39.4784	39.6304

3.4 Bir Ucu Ankastre Diğer Ucu Mafsallı Tek ve Çift Duvarlı Kirişte Burkulma Yükleri

3.4.1 Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı tek duvarlı çubuğun burkulma yükü

Örnek : Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı tek duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı çubuğun tek duvarlı çubukta

Literatürde Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı tek duvarlı çubuğun burkulma yükü aşağıdaki gibi bulunur (denklem 3.38),[16].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2} = 20.1907 \quad (3.38)$$

$$v(0) = M(0) = 0 ,$$

Dolayısıyla Başlangıç değerlerinden ikisi bilinmektedir. $[v(0) = M(0) = 0]$

(3.7) denklemi açık yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} v \\ \varphi \\ M \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TM_{11} & TM_{12} & TM_{13} & TM_{14} \\ TM_{21} & TM_{22} & TM_{23} & TM_{24} \\ TM_{31} & TM_{32} & TM_{33} & TM_{34} \\ TM_{41} & TM_{42} & TM_{43} & TM_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi(0) \\ 0 \\ T(0) \end{bmatrix}$$

TM: Taşıma Matrisi

Uç koşulları

$$v(L) = \varphi(L) = 0$$

$$v(L) = TM_{12}(L) \times \varphi(0) + TM_{14}(L) \times T(0) = 0$$

$$\varphi(L) = TM_{22}(L) \times \varphi(0) + TM_{24}(L) \times T(0) = 0$$

Veya

$$\begin{pmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) \\ TM_{22}(L) & TM_{24}(L) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varphi(0) \\ T(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu denklem sisteminin bir çözümünün olabilmesi için aşağıdaki determinat olmalıdır (denklem 3.39).

$$\det \begin{pmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) \\ TM_{22}(L) & TM_{24}(L) \end{pmatrix} = 0 \quad (3.39)$$

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

e^x in o noktası komşuluğunda seri açılımıdır.

x yerine Az yazılırsa e^{Az} (Taşıma Matrisisi) aşağıda yazdığımız formül gibi (denklem 3.40).

$$e^{Az} = I + \frac{Az}{1!} + \frac{A^2 z^2}{2!} + \frac{A^3 z^3}{3!} + \dots \quad (3.40)$$

I: Birim matrisi

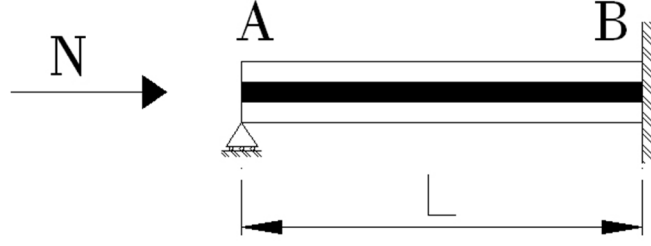
L=1 ve EI=1

Tek duvarlı çubuk için taşıma matrisini kesin olarak hesaplamak mümkündür. Ancak biz burada (3.40) te verilen yaklaşık ifade ile taşıma matrisini bulup, Burkulma yükünü hesaplayarak elde ettiğimiz sonuçları (3.38) de verilen kesin sonuçla karşılaştıracğız. (3.40)ifadesinden 10 terim alarak taşıma matrisini bulur ve(3.39) verilen determinant yardımıyla burkulma yükünü hesaplırsak 23.1333 çıkmaktadır. Aynı şeyi 20 terim ile yaparsak kesin sonuca (20.1907yı) buluyoruz.

Çizelge 3.4 de tek ve çift duvarlı bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı çubuğun burkulma yükleri verilmiştir.

3.4.2 Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı çift duvarlı çubuğun burkulma yükü

Örnek : Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı çift duvarlı çubuğun burkulma yükünün hesabı (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı çubuğun çift duvarlı çubuk

Bu örnek’de $v_1(0) = v_2(0) = M_1(0) = M_2(0) = 0$ dir. Dolayısıyla Başlangıç değerlerinden dördü bilinmektedir (denklem 3.41).

$$\begin{bmatrix} v_1(z) \\ \phi_1(z) \\ M_1(z) \\ T_1(z) \\ v_2(z) \\ \phi_2(z) \\ M_2(z) \\ T_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TM_{11} & TM_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{18} \\ TM_{21} & TM_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{28} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ TM_{81} & TM_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & TM_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_1(0) \\ 0 \\ T_1(0) \\ 0 \\ \phi_2(0) \\ 0 \\ T_2(0) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

TM: Taşıma Matrisi

Bu dört bilinmiyeni bulmak için 4 uç koşuluna ihtiyacımız vardır.

Bunlar:

$$v_1(L) = v_2(L) = 0$$

$$\phi_1(L) = \phi_2(L) = 0 \text{ dir.}$$

$$v_1(z) = TM_{12}(z) \times \phi_1(0) + TM_{14}(z) \times T_1(0) + TM_{16}(z) \times \phi_2(0) + TM_{18}(z) \times T_2(0)$$

$$\phi_1(z) = TM_{22}(z) \times \phi_1(0) + TM_{24}(z) \times T_1(0) + TM_{26}(z) \times \phi_2(0) + TM_{28}(z) \times T_2(0)$$

$$v_2(z) = TM_{52}(z) \times \phi_1(0) + TM_{54}(z) \times T_1(0) + TM_{56}(z) \times \phi_2(0) + TM_{58}(z) \times T_2(0)$$

$$\phi_2(z) = TM_{62}(z) \times \phi_1(0) + TM_{64}(z) \times T_1(0) + TM_{66}(z) \times \phi_2(0) + TM_{68}(z) \times T_2(0)$$

$$v_1(L) = TM_{12}(L) \times \varphi_1(0) + TM_{14}(L) \times T_1(0) + TM_{16}(L) \times \varphi_2(0) + TM_{18}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$\varphi_1(L) = TM_{22}(L) \times \varphi_1(0) + TM_{24}(L) \times T_1(0) + TM_{26}(L) \times \varphi_2(0) + TM_{28}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$v_2(L) = TM_{52}(L) \times \varphi_1(0) + TM_{54}(L) \times T_1(0) + TM_{56}(L) \times \varphi_2(0) + TM_{58}(L) \times T_2(0) = 0$$

$$\varphi_2(L) = TM_{62}(L) \times \varphi_1(0) + TM_{64}(L) \times T_1(0) + TM_{66}(L) \times \varphi_2(0) + TM_{68}(L) \times T_2(0) = 0$$

Veya

$$\begin{bmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) & TM_{16}(L) & TM_{18}(L) \\ TM_{22}(L) & TM_{24}(L) & TM_{26}(L) & TM_{28}(L) \\ TM_{52}(L) & TM_{54}(L) & TM_{56}(L) & TM_{58}(L) \\ TM_{62}(L) & TM_{64}(L) & TM_{66}(L) & TM_{68}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1(0) \\ T_1(0) \\ \varphi_2(0) \\ T_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu denklem sistemini bir çözümünün olabilmesi için aşağıdaki determinat olmalıdır (denklem 3.42).

$$\det \begin{bmatrix} TM_{12}(L) & TM_{14}(L) & TM_{16}(L) & TM_{18}(L) \\ TM_{22}(L) & TM_{24}(L) & TM_{26}(L) & TM_{28}(L) \\ TM_{52}(L) & TM_{54}(L) & TM_{56}(L) & TM_{58}(L) \\ TM_{62}(L) & TM_{64}(L) & TM_{66}(L) & TM_{68}(L) \end{bmatrix} = 0 \quad (3.42)$$

Literatürde Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı tek duvarlı çubuğun burkulma yükü aşağıdaki gibi bulunur (denklem 3.43),[16].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2} = 20.1907 \text{ dir.} \quad (3.43)$$

(3.43) ifadesi tek duvarlı çubuk için geçerli dir, çift duvarlı çubuk için literatürde böyle bir bağıntı yok.

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

e^x in o noktası komşuluğunda seri açılımıdır.

x yerine Az yazılırsa e^{Az} (Taşıma Matrisisi) aşağıda yazdığımız formül gibi (denklem 3.44).

$$e^{Az} = I + \frac{Az}{1!} + \frac{A^2 z^2}{2!} + \frac{A^3 z^3}{3!} + \dots \quad (3.44)$$

I: Birim matrisi

L=1 ve EI₁=1 ve EI₂=0.4 ve C=2

Biz burada (3.44) te verilen yaklaşık ifade ile taşıma matrisini bulup, Burkulma yükünü hesaplayarak elde ettiğimiz sonuçları tek duvarlı çubuk için (3.43) de verilen kesin sunucla karşılaştıracğıız. (3.44) ifadesinden 10 terim alarak taşıma matrisini bulur ve (3.42) verilen determinant yardımıyla burkulma yükünü hesaplırsak 24.617 çıkmaktadır. Görüldüğü gibi çift duvarlı çubukta burkulma yükü 23.4398 çıkmaktadır. Bu değer tek duvarlı çubuğa ait burkulma yükünden biraz daha yüksektir. Bu da beklenen bir sonuçtur.

Çizelge 3.4: Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.

Terim sayısı	Burkulma yükü tek duvarlı çubuk	Burkulma yükü Çift duvarlı çubuk
10	23.1333	24.617
11	22.0584	25.2597
12	19.9817	23.4223
13	20.0718	23.0933
14	20.2112	23.4394
15	20.2015	23.4782
16	20.1893	23.4403
18	20.1908	23.4398
20	20.1907	23.4398
22	20.1907	23.4398
25	20.1907	23.4398

4. C KATSAYI İLE BURKULMA YÜKÜNÜN DEĞİŞİMİ

4.1 İki Ucu Basit Mafsallı Tek ve Çift Duvarlı Çubuğun Burkulma Yükleri.

Çizelge 4.1.1: İki ucu mafsallı tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları

C	Burkulma yükü	Burkulma yükü
Katsayı	tek duvarlı çubuk	Çift duvarlı çubuk
0.2	9.8696	9.8898
0.4	9.8696	9.9100
0.6	9.8696	9.9299
0.8	9.8696	9.9497
1	9.8696	9.9690
1.2	9.8696	9.9879
1.4	9.8696	10.0064
1.6	9.8696	10.0242
2	9.8696	10.0581
2.4	9.8696	10.0892
2.6	9.8696	10.1037
2.8	9.8696	10.1175

4.2 Bir Ucu Ankastre Diğer Ucu Serbest Tek ve Çift Duvarlı Çubuğun Burkulma Yükleri.

Çizelge 4.2.1 : Bir ucu ankastre diğer ucu serbest tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.

C Katsayı	Burkulma yükü tek duvarlı çubuk	Burkulma yükü Çift duvarlı çubuk
0.2	2.4674	2.5063
0.4	2.4674	2.5500
0.6	2.4674	2.5990
0.8	2.4674	2.6541
1	2.4674	2.7159
1.2	2.4674	2.7856
1.4	2.4674	2.8638
1.6	2.4674	2.9518
2	2.4674	3.1617
2.4	2.4674	3.4256
2.6	2.4674	3.5812
2.8	2.4674	3.7545

4.3 İki Ucu Ankastre Tek ve Çift Duvarlı Çubuğun Burkulma Yükleri.

Çizelge 4.3.1 : İki ucu ankastre tek ve çift duvarlı çubuğun burkulma sonuçları.

C	Burkulma yükü	Burkulma yükü
Katsayı	tek duvarlı çubuk	Çift duvarlı çubuk
0.2	39.4784	39.4936
0.4	39.4784	39.5088
0.6	39.4784	39.5240
0.8	39.4784	39.5392
1	39.4784	39.5544
1.2	39.4784	39.5696
1.4	39.4784	39.5848
1.6	39.4784	39.6000
2	39.4784	39.6304
2.4	39.4784	39.6608
2.6	39.4784	39.6761
2.8	39.4784	39.6913

4.4 Bir Ucu Ankastre Diğer Ucu Mafsallı Tek ve Çift Duvarlı Çubuğun Burkulma Yükleri.

Çizelge 4.4.1 : Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı tek ve çift duvarlı çubuğun
burkulma sonuçları.

C Katsayı	Burkulma yükü tek duvarlı çubuk	Burkulma yükü Çift duvarlı çubuk
0.2	20.1907	20.5189
0.4	20.1907	20.8483
0.6	20.1907	21.1778
0.8	20.1907	21.5071
1	20.1907	21.8352
1.2	20.1907	22.1618
1.4	20.1907	22.4860
1.6	20.1907	22.8074
2	20.1907	23.4399
2.4	20.1907	24.0556
2.6	20.1907	24.3564
2.8	20.1907	24.6520

SONUÇLAR

Bu çalışmada çift duvarlı çubukların burkulması” Başlangıç Değerleri Yöntemi” ile klasik elastisite de incelemiştir. Benzer problemin klasik yöntem ile incelenmesi halinde 8x8 lik determinantlar yardımıyla burkulma yükleri bulunur. Bu çalışmada burkulma yükleri 4x4 lük determinantlar yardımıyla elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesiyle çift duvarlı çubukların burkulma yüklerinin daha büyük olduğu görülmüştür. Çalışmada elde edilen bir diğer sonuç ise tüpler arasındaki etkileşmeyi belirleyen van der waals katsayısının büyümesi halinde burkulma yüklerinin de arttığıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Tepe, A.** Nano-Scale (2010) Analysis of Curved Single Walled Carbon Nanotubes for In-Plane Loading. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 7(11), 2405-2410.
- [2] **Wang, C.M., Tan, V.B.C. and Zhang, Y.Y.** (2006) Timoshenko beam model for vibration analysis of multi-walled carbon nanotubes. Journal of Sound and Vibration, 294(4-5), 1060-1072.
- [3] **Ru, C.Q.** (2000) Effect of van der Waals forces on axial buckling of a double-walled carbon nanotube. Journal of Applied Physics, 87(10), 7227-7231.
- [4] **Han, Q. and Lu, G.X.** (2003) Torsional buckling of a double-walled carbon nanotube embedded in an elastic medium. European Journal of Mechanics a-Solids, 22(6), 875-883.
- [5] **Iijima, S.** (1975) Helical microtubules of graphitic carbon. Nature, 1991, 354, 56-58.
- [6] **Url-1** <<http://www.foresight.org/nano/history.html>> History of Nanotechnology. 29.08.2010.
- [7] **Url-2** <http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_allotropes> Wikipedia. Allotropes of Carbon 20.04 2011.
- [8] **Wang, C.Y., Ru, C.Q. and Mioduchowski, A.** (2003) Axially compressed buckling of pressured multiwall carbon nanotubes. International Journal of Solids and Structures, 40(15), 3893-3911.
- [9] **Shen, H.S. and Zhang, C.L.** (2007) Postbuckling of double-walled carbon nanotubes with temperature dependent properties and initial defects under combined axial and radial mechanical loads. International Journal of Solids and Structures, 44(5), 1461-1487.
- [10] **Ru, C.Q.** (2000) Column buckling of multiwalled carbon nanotubes with interlayer radial displacements. Physical Review B, 62(24), 16962-16967.
- [11] **Jones, R.M.** (t.y) buckling bars plates shells.
- [12] **Timoshenko, S.** (New York, 1961) Theory of Elastic Stability.
- [13] **Tepe, Ayşegül.** (FBE İTÜ, 2007) Nanoteknoloji'de Nano Ölçekteki Yapıların Yerel Olmayan Elastisite Çerçevesinde İncelenmesi.
- [14] **Sevi, Ali Haydar.** (FBE YTÜ, 2006) Nanoteknolojide Karbon Nanotüplerin Dayanıklılık Simülasyonları.

- [15]**Artan, R.** (1997). The analytical calculation of circular rods of variable cross-section by the initial values method, Computers and Structures, 62, 3, 445-461.
- [16]**Mustafa INAN** (1967) "Cisimlerin Mukavemeti" Arı Kitabevi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad:Reza J.TORKAN

Doğum Yeri ve Tarihi: İRAN-1976

E-Posta: torkan82@yahoo.com

Lisans: Iran-Ürmiye

1976 da İran’da doğdu. Orta okul ve lise öğrenimini Iran Teknik Lisesinde bitirdikten sonra 1996 yılında İran Ürmiye Azad Üniversitesi İnşaat Mühendislik bölümüne girdi. 2000 senesinde oradan mezun olup ve 2009 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Mekanik bölümüne girdim.

