

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

**NANO BOYUTLU SEKTÖR VE BOŞLUKLU SEKTÖR PLAKLARIN LOKAL  
OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ İLE TİTREŞİM VE EĞİLME ANALİZİ**

**Murat GÜRSES**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**2015**

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

**NANO BOYUTLU SEKTÖR VE BOŞLUKLU SEKTÖR PLAKLARIN LOKAL  
OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ İLE TİTREŞİM VE EĞİLME ANALİZİ**

**Murat GÜRSES**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez ..... / ..... /2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ömer CİVALEK .....

Doç. Dr. Hakan ERSOY .....

Yrd. Doç. Dr. Rıfat TÜR .....

Yrd. Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU .....

Yrd. Doç. Dr. Mehmet AVCAR .....

## ÖZET

### NANO BOYUTLU SEKTÖR VE BOŞLUKLU SEKTÖR PLAKLARIN LOKAL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ İLE TİTREŞİM VE EĞİLME ANALİZİ

Murat GÜRSES

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr.Ömer CİVALEK

Mayıs 2015, 74 Sayfa

Bu tez çalışmasında, ayrık tekil konvolüsyon (ATK) metodu ve lokal olmayan elastisite teorisi (LOET) kullanılarak nano boyutlu sektör ve boşluklu sektör plakların serbest titreşim ve eğilme analizleri yapılmıştır. Sekiz noktalı bir geometrik dönüşüm kullanılarak rastgele sekizgen geometriye sahip alan, düzgün sekizgen geometriye sahip bölgeye dönüştürülmüştür. Lokal olmayan elastisite teorisi (LOET) yardımıyla bulunan sonuçlar irdelenmiş ve literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, yaklaşımın geçerliliği ve sonuçların doğruluğu detaylı bir biçimde tartışılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Ayrık tekil konvolüsyon yöntemi, lokal olmayan elastisite teorisi, Kirchhoff plak, nano boyutlu sektör plak, nano boyutlu boşluklu sektör plak, eğilme ve titreşim analizi

**JÜRİ:** Prof. Dr. Ömer CİVALEK (Danışman)

Doç. Dr. Hakan ERSOY

Yrd. Doç. Dr. Rıfat TÜR

Yrd. Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Yrd. Doç. Dr. Mehmet AVCAR

## **ABSTRACT**

### **VIBRATION AND BENDING ANALYSIS OF NANO-SIZED SECTOR AND ANNULAR SECTOR PLATES VIA NONLOCAL ELASTICITY THEORY**

**Murat GÜRSES**

**PhD Thesis in Civil Engineering**  
**Supervisor: Prof. Dr. Ömer CİVALEK**  
**May 2015, 74 pages**

In this thesis, free vibration and bending analysis of the nano-sized sector and annular sector plates was performed using discrete singular convolution method and nonlocal elasticity theory. The area with random octagonal geometry was converted to the region having regular octagon geometry by using an eight-point geometric transformation. The results obtained with the aid of nonlocal elasticity theory were examined and compared with the current results in the literature. Also, the validity of the approach and the accuracy of the present results were discussed in detail.

**KEYWORDS:** Discrete singular convolution, non-local elasticity theory, Kirchhoff plates, nano-sized sector plate, nano-sized annular sector plate, bending and free vibration analysis

**COMMITTEE:** Prof. Dr. Ömer CİVALEK (Supervisor)  
Assoc. Prof. Dr. Hakan ERSOY  
Assist. Prof. Dr. Rifat TÜR  
Assist. Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU  
Assist. Prof. Dr. Mehmet AVCAR

## ÖNSÖZ

Nano boyutta sürdürülen bilimsel ve özellikle son yıllardan artarak devam eden teknolojik çalışmalar günümüz dünyasına kattığı teknolojik vizyon ile ülkelerin geleceğine ışık tutması, refah bir toplum yapısının oluşması, toplumların sosyal, ekonomik konularda ve güvenlik konusunda gelişmişlik seviyelerini arttırması, ekonomik olmasının yanında son derece dayanıklı ve işlevsel malzemelerin üretilebilmesi ve belki de hepsinden daha da önemlisi günümüzde insan sağlığını ve güvenliğini tehdit eden unsurların birçoğunu ortadan kaldırabilecek potansiyeli olması sebebiyle son derece kritik bir öneme sahiptir. Böylesine kritik öneme sahip olan nanoteknoloji yardımıyla üretilen nano yapılar, boyut etkisiyle birlikte sahip oldukları olağan dışı mekanik, elektrik, elektronik, fotonik, manyetik vb. özellikleriyle son derece güçlü bağlar oluşturabilmekte; bu nedenle dayanımı ve iletkenliği yüksek hafif tasarımlar oldukça ekonomik yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Nano yapılarda süregelen bu gelişmelere paralel olarak ince plak ve kabuk sistemlerinin kolaylıkla modellenmesinin de yolu açılmıştır. Buna bağlı olarak bu sistemlerin kullanım alanları günden güne genişlemekte ve bu yapılara olan ihtiyaçta hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi ülkemizde de nanoteknolojik faaliyetlere olan ilgi giderek artmaktadır. Bilim adamları nanoteknolojiye kaynak oluşturabilecek rezerv maddelerde ülkemizde büyük bir potansiyelin olduğu görüşünde birleşmektedirler. Bununla beraber N&T kullanılarak yapılan üretimlere elde edilen ürünler sunduğu avantajlı özellikleriyle yaşamımızda her geçen gün daha geniş bir yer kaplamakta ve önemini giderek arttırmaktadır.

Günümüzde ince plak, ince kabuk veya bunların birleşmesinden oluşan nanoyapılar, dairesel ve sektör geometriye sahip plaklar geniş uygulama alanı bulmaktadır. Dikdörtgen, paralelkenar, dörtgen veya çarpık geometriye sahip plaklar köprü ve uçak uzay yapılarında ve gemi mühendisliğinde kullanılmaktadır. Bu yapıların boyutlandırmaya esas teşkil edecek titreşim frekanslarının hesaplanması yaklaşık 40 yıldır araştırmacıların üzerinde titizlikle çalıştığı bir konudur. Boyutlar nanometre mertebesine indiğinde maddenin makro boyutlarda yani kütleli halde sahip olduğu mekanik, elektrik, vb. özellikleri son derece farklılaşmaktadır. "Olağanüstü" olarak tanımlanan bu farklılaşmanın bütünüyle sentezlenebilmesi, yorumlanabilmesi ve sonuca ulaşabilmesi nano yapılar üzerinde doğru bir analiz yönteminin yapılandırılmasına ve bu analizlerin sağlık olarak yürütülmesine bağlıdır. Buradan yola çıkarak nano boyuttaki bu sistemlerin analizi atomik modelleme, dinamik simülasyon ve sayısal modelleme olarak iç yöntemle yapılmaktadır. Diğer iki yöntemle göre daha ucuz bir yöntem olması ve sonuçların çok daha kısa zamanda alınabilmesi nedeniyle konuyla ilgili analizler genellikle "Sayısal Modelleme" yöntemiyle yapılmaktadır. Sayısal modelleme teknikleri arasından "Eringen" tarafından önerilen Lokal Olmayan Elastisite Teorisi'nin bu tez kapsamında belirlenen geometrideki ve sınır koşulları altındaki nano boyutlu sektör ve boşluklu sektör plakların titreşim ve eğilme analizlerinin yapılmasında sayısal modelleme aracı olarak kullanılması uygun görülmüştür. Bu Teori, alternatiflerine göre daha pratik bir yöntem olması, bunun yanında yine alternatif çözüm yöntemlerine kıyasla kısa sürede çözüme ulaşabilmesiyle zaman ve uygulama tekniği kriterlerinde sağladığı avantajlar nedeniyle tercih edilmiştir. Sektör plakların geometrik dönüşümlerinin yapılması, "Ayrık Tekil Konvolüsyon Metodu" kullanılarak diferansiyel denklemlere ayrıştırılması, gerekli sınır koşullarının uygulanmasıyla titreşim ve eğilme

hesabına ait denklemlerin ince plak teorisi ile çıkartılması amaçlanmıştır. LOET ile nanometre mertebesinde plak sistemlerin modellenmesi yapılarak mekanik davranışları irdelenecek, sonuçları tartışılacaktır. Sonuçların seçilen örnekler ve kullanılan yöntem dikkate alındığında literatürde nano boyutlardaki yapıların analizi ile ilgili diğer araştırmalara ve yayınlara katkı sağlayacağı açıktır.

Doktora tezim süresince değerli vaktini ve yardımlarını hiç bir zaman benden esirgemeyen kıymetli ve saygıdeğer danışman hocam Prof.Dr. Ömer CİVALEK'e, kaynak ve literatür çalışmalarımnda katkıda bulunan değerli çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Çiğdem DEMİR'e ve Arş. Gör. Bekir AKGÖZ'e, son olarak hayatımın her döneminde bana sonsuz destek veren çok değerli eşim Burcu GÜRSES'e, kısa süre önce ailemize katılarak hepimizi sevince boğan oğlum ve "uğurum" olarak tanımladığım Murat Güney GÜRSES'e, ayrıca her zaman yanımda olan anneme, babama ve kardeşlerime teşekkürlerimi bir borç bilir ve sonsuz saygılar sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER ve KAYNAK TARAMALARI.....	3
2.1. Nanoteknoloji Tanımı.....	3
2.2. Nanoteknolojinin Üretim Yöntemleri.....	8
2.3. Nanoteknolojinin Tarihçesi .....	9
2.4. Nano Yapılı Malzemeler: .....	12
2.4.1. Nanoparçacıklar .....	13
2.4.2. Karbon nanoyapılar .....	13
2.4.3. Karbon nanotoplar (Fullerenler):.....	18
2.4.4. Karbon nanotüpler: .....	19
2.4.5. Karbon nanoçubuklar: .....	23
2.4.6. Nano kapsüller ve kuantum noktalar:.....	24
2.4.7. Nano kristalin malzemeler: .....	24
2.4.8. Nano gözenekli malzemeler:.....	24
2.4.9. Nano yapılı kaplamalar: .....	24
2.4.10. Nano kompozitler ve dendrimerler: .....	25
2.5. Nanoteknolojiye yapılan yatırımlar .....	25
2.6. Nanoteknolojinin Gelecekteki Uygulama Alanları.....	26
2.6.1. Elektronik, fotonik, manyetik ve bilgisayar teknolojileri: .....	26
2.6.2. Tıp, sağlık ve ilaç sektörü: .....	27
2.6.3. Havacılık ve uzay .....	28
2.6.4. Çevre ve enerji.....	28
2.6.5. Biyoloji, gıda ve tarım : .....	29
2.6.6. Savunma sektörü.....	30
2.6.7. İnşaat ve ulaşım sektörü: .....	31
2.6.8. Bilim ve eğitim .....	32
2.7 Yüksek Mertebeden Elastisite Teorileri .....	32
3. MATERYAL ve METOT.....	34
3.1. Ayrık Tekil Konvolüsyon (ATK) Yöntemi.....	34
3.1.1. Geometrik dönüşüm için temel fonksiyonlar .....	37
3.2. Lokal Olmayan Elastisite Teorisi (LOET) .....	39
3.2.1. Plak titreşimi .....	41
3.2.2. Sınır koşulları.....	49
3.2.3. Eğilme denklemi.....	50
4. BULGULAR .....	52
5. TARTIŞMA.....	64
6. SONUÇ .....	65
7. KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ	

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler:

$a$	: Malzemenin iç ve dış karakteristik uzunluğu
$a,b,c$	: Üç boyutlu Plak için göz önüne alınan boyutları
$E$	: Elastisite modülü
$f_l$	: Kütle kuvveti yoğunluğu
$G$	: Kayma modülü
$I$	: Alan atalet momenti
$J$	: Jakobiyen indisi
$k$	: Plak kenar boyutları oranı ( $a/b$ )
$M$	: Eğilme momenti
$N_x, N_y, N_z$	: $x, y$ ve $z$ doğrultularındaki düğüm nokta sayısı
$P_x, P_y$	: Plak kenarlarına $x$ ve $y$ doğrultularında etkiyen basınç kuvveti
$q_0$	: Giriş üzerindeki düzgün yayılı yük
$t$	: Zaman değişkeni
$u, v, w$	: sırasıyla $x, y$ ve $z$ doğrultusundaki boyutsuz deplasmanlar
$u_l$	: Yer değiştirme vektörü
$U$	: Şekil değiştirme enerjisi
$U_o$	: Plak orta nokta boyutsuz deplasmanı
$v$	: Elastik cismin kapladığı hacim
$V$	: Kesme kuvveti
$W$	: Dış kuvvetlerin yapmış olduğu potansiyel enerji
$x, y, z$	: Her bir doğrultudaki boyutsuz koordinatlar
$\delta$	: Bitişik grid nokta dağılımı için alınan değer
$\nu$	: Poisson oranı
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	: İlgili doğrultudaki normal gerilmeler
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$	: İlgili doğrultudaki kayma gerilmeleri
$\gamma_{ij}$	: $ij$ yönündeki açısal şekil değiştirme
$\Omega$	: Plak için boyutsuz frekans
$\omega$	: Doğal frekans
$\lambda$	: Dikdörtgen plak için burkulma faktörü
$\tau_{kl}$	: Gerilme tansörü
$\rho$	: Kütle yoğunluğu
$\tau_{kl}(x')$	: $x'$ noktasındaki lokal gerilme tansörü
$\varepsilon_{kl}(x')$	: Cismin $x'$ noktasındaki lineer şekil değiştirme tansörü
$\alpha x - x' $	: Öklidyen formda uzaklık
$\mu, \lambda$	: Lamé sabitleri



**Kısaltmalar:**

AKM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
ATK	: Ayrık Tekil Konvolüsyon
CCCC	: Dört noktadan ankastre mesnetli plak
ÇDKNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
GPa	: Gigapascal
KNT	: Karbon Nanotüp
MPa	: Megapascal
N&T	: Nanoteknoloji
SCSC	: Farklı iki noktadan hem sabit hem ankastre mesnetli plak
SSSS	: Dört noktadan sabit mesnetli plak
TDKNT	: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
TK	: Tekil Konvolüsyon
TPa	: Terapascal
TTM	: Taramalı Tünelleme Mikroskobu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İşleme hassaslığının evrimi (Ramsden 2009).....	3
Şekil 2.2. Nanoteknolojinin temel bilimlerle etkileşimi .....	6
Şekil 2.3. Karbon elementi ve bağlanma şekilleri .....	14
Şekil 2.4. Karbon atomunun allotopları (Anderson 2009) .....	15
Şekil 2.5. Grafenin bal peteğine benzeyen yapısı ve Brillouin Bölgesi (Semenoff 1984) .....	16
Şekil 2.6. Atomik kuvvet mikroskopu (AKM) çalışma prensibi .....	17
Şekil 2.7. Karbon nanotüp örneği .....	20
Şekil 2.8. Tek duvarlı karbon nanotüp çeşitleri (Elibol 2009).....	22
Şekil 3.1. Sekiz Düğüm Noktasına Sahip Bir Geometrik Dönüşüm .....	37
Şekil 3.2. Nano ölçekli boşluklu sektör ve sektör plak.....	42
Şekil 4.1. SSSS mesnetli mikro ölçekli boşluklu sektör plağın ( $\varphi=45$ ) frekans oranı .... ( $b/a=0.4$ ).....	53
Şekil 4.2. CCCC boşluklu sektör plağın mod sayısına bağlı olarak frekans değeri ..... ( $\varphi=90$ ; $b/a=0.5$ ).....	54
Şekil 4.4. SSSS boşluklu sektör plağın sektör açısına bağlı frekans değerleri .....	55
( $e_0a=1$ ; $b/a=0.4$ ) .....	55
Şekil 4.8. SSSS boşluklu sektör plağın ( $\varphi=150$ ) lokal olmayan parametreye bağlı .....	57
frekans değeri.....	57
Şekil 4.9. Elastik zemin üzerinde tek katmanlı grafen tabaka..... (a) grafen tabaka b) kesit alanı c) sektör grafen d) boşluklu sektör grafen) ....	58
Şekil 4.10. Dört kenarından basit mesnetli boşluklu sektör grafen tabaka temel .....	58
frekans değerinin sektör açısı ve boyut etkisine bağlı değerleri ( $b/r=0.2$ ; ..... $K=15$ ; $G=10$ ).....	58
Şekil 4.11. Dört kenarından basit mesnetli boşluklu sektör grafen tabakanının temel....	59
frekans değerinin Pasternak zemin etkisi ve lokal olmayan parametreye .....	59
bağlı değişimi ( $\alpha=30$ ; $b/r=0.5$ ; $K=10$ ) .....	59
Şekil 4.12. Boşluklu sektör nano plak frekans değerinin Winkler zemin parametresi ....	60
ve boyut etkisine bağlı değişimi (SCSC mesnet; $\alpha=60$ ; $b/r=0.4$ ) .....	60
Şekil 4.13. Boşluklu sektör nano plak frekans değerinin Pasternak zemin .....	60
parametresi ve boyut etkisine bağlı değişimi ( $\alpha=60$ ; $b/r=0.4$ ; SCSC) .....	60
Şekil 4.14. SSSS mesnetli sektör grafen plak için fekans değerinin zemin katsayı .....	61
değerleri ve boyut etkisine bağlı değişimi ( $\alpha=60$ ).....	61
Şekil 4.15. CSCS mesnetli boşluklu sektör grafen plak için fekans değerinin mod.....	61
sayısı ve boyut etkisine bağlı değişimi ( $\alpha=60$ ; $b/r=0.5$ ).....	61
Şekil 4.16. CCCC mesnetli boşluklu sektör grafen plak için fekans değerinin çapa.....	62
bağlı değişimi ( $b=5\text{nm}$ ; $\alpha=30$ ).....	62
Şekil 4.17. Bütün kenarları basit mesnetli dikdörtgen biçimindeki plakların mod.....	63
şekilleri ( $e_0a=1.25$ ) .....	63

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Nano düzeyde boyutlar ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ).....	5
Çizelge 2.2. Ticari olarak satılan bazı nanoteknoloji ürünler ( <a href="http://www.nanotechproject.org">www.nanotechproject.org</a> ) .....	10
Çizelge 2.3. Karbon nanotüplerin karşılaştırmalı özellikleri.....	23
Çizelge 4.1. Basit mesnetli kare plak için maksimum deplasman değerleri .....	52
Çizelge 4.2. Basit mesnetli sektör plak için deplasman ( $0.75a$ ) değeri .....	52
( $\alpha=60$ ; $h/a=0.001$ ; $a=2 \text{ nm}$ ).....	52

## 1.GİRİŞ

İnsanlık tarihi geçmişten bugüne kadar karşılaştığı zorluklara karşı başa çıkabilme, hayatta kalabilme, sosyal ve ekonomik yönden refah düzeyini arttırabilme mücadelesi vermiştir. İhtiyaçlarına cevap veren en iyi yolu bulabilmek için sürekli yenilenme, yapılanma ve modernleşme çabasını da bu mücadelesiyle birlikte sürdürmüştür. Her geçen gün ortaya çıkan değişimler ile karşılaşılan farklı tür ihtiyaçlar ve bunlara cevap verme aşamasında yaşanan sancılı süreçler dolaylı olarak en basit halinden karmaşığa doğru teknolojik gelişmeleri de beraberinde getirmiştir.

Teknoloji kelimesi, yunanca “teknologia” kelimesinden gelmektedir. Kelime olarak incelendiğinde; “tecghkos-tehnikos” ustalık, teknik olarak işlem yapma, “λογία” ise sanat, bilim, bilgi, beceri anlamlarına gelmektedir (Ayhan 2002). Tanımdan da anlaşılacağı üzere teknoloji kavramı, insanoğlunun herhangi bir konu üzerindeki yüksek merakının ve hayal gücünün yardımıyla geçmişten bugüne kadar edinilen bütün bilgi birikimlerin farklı disiplinlerdeki bilim dallarıyla da etkileşerek harmanlanması; ustalık, teknik ve sistem silsilesi içerisinde kullanılmasıdır. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak teknolojik faaliyetlerin ülkelerin sosyal alanda refah, ekonomik alanda ise gelişmişlik düzeylerinin belirlenmesi ve askeri alanda bazı sonuçlarıyla ulusal güvenliğin sağlanması açısından da stratejik önem kazanmasından dolayı dünya gelinde her geçen gün daha farklı alanlara yayılarak sürdürüldüğünü görmekteyiz. Ancak, bu faaliyetler sonucunda elde edilen ürünlerin sağladığı kitlesel faydalarla birlikte bazı potansiyel riskleri de beraberinde getirmesi göz ardı edilmemelidir.

Yeni teknolojilere sahip olma isteği, günün şartlarına göre sürekli bir değişim gösteren yüksek teknoloji kavramını ortaya çıkarmıştır. 20’nci yüzyılda ortaya çıkan ve hâlihazırda etkisini sürdüren bilişim teknolojileri yüksek teknoloji olarak nitelendirilirken, 21’nci yüzyılda ise biyoteknoloji ve nanoteknoloji yüksek teknoloji sınıfı içerisinde yer almaya başlamışlardır. Yüksek teknoloji, insanoğlu tarafından geliştirilmiş sistemleri ve araçları ifade etmekte olup daha fazla bilgi ve daha yoğun bir teknolojik altyapıya sahiptir. 21’nci yüzyılda, ülkeler arası teknolojik uçurumu daha da artıracak yeni bir teknoloji ortaya çıkmıştır. Aslında doğada var olup insanoğlunun doğayı taklit ederek yaratmaya çalıştığı ve "nanoteknoloji" olarak adlandırılan bu teknoloji devriminin insanlığın yakın geleceğinde yaratacağı olumlu ve olumsuz değişiklikler ayrıntılı bir biçimde tahmin edilememekle birlikte, önümüzdeki 20 yıl içerisinde toplumda büyük etkiler bırakacak ve nanoteknoloji alanında hazır ülkelerle hazır olmayan ülkeler arasındaki farklar büyük ölçüde artacaktır. Bu gelişmeler çerçevesinde Nanobilim ve nanoteknoloji, 21’nci yüzyıla damgasını vuracak olan önemli bir teknolojik alan olarak görülmektedir (Özer 2008).

Ülkemizde çalışmalar daha çok akademik düzeyde devam etmekte ancak Devlet Planlama Teşkilatı’nın bilim ve teknoloji politikalarında ve ülkemizin 2023 hedeflerinde nanoteknoloji bilimi ve nanoteknolojik çalışmaların geliştirilmesi en ön saflarda yerini almaktadır. Olağanüstü mekanik ve elektrik özellikleriyle kendisine günlük hayatta bir çok kullanım alanı bulan ve her geçen gün etki alanları genişleyen nanoteknolojik yapıların analizi, "atomik modelleme" ve "dinamik simulasyonlama" yöntemlerine göre daha ekonomik olmasından ve zaman tasarrufu sağlamasından dolayı genellikle "matematiksel modelleme" yöntemiyle yapılır. Özellikle nano ölçekli

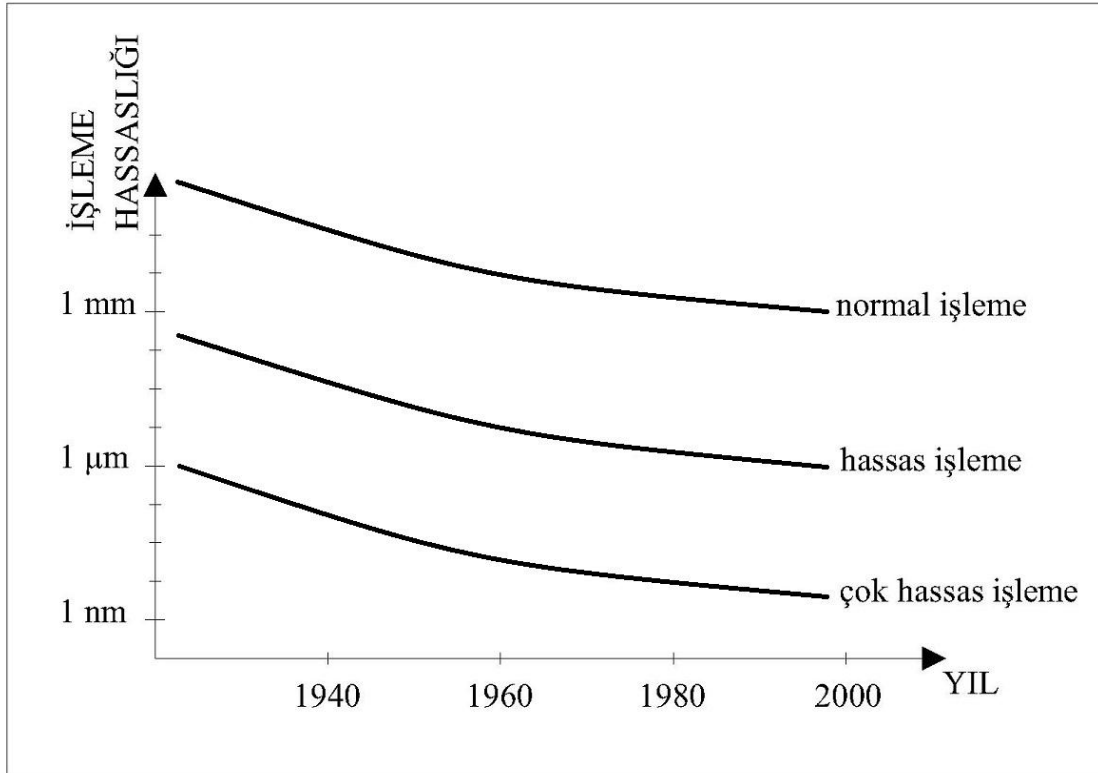
mekanik ve biyolojik sistemlerin davranışları (eğilme, burkulma ve titreşim) dizayn esnasında önemli büyüklüklerdir. ARGE çalışmalarına, bilimsel ve ekonomik yönden kaydedilen ilerlemelere paralel olarak gerek ülkemizdeki gerekse dünyadaki çalışmalara katkıda bulunması amacıyla bu tez çalışması kapsamında, nano ölçekli sektör ve boşluklu sektör plaklara ait temel denklemlerinin lokal olmayan elastisite bağıntılarına bağlı olarak titreşim ve eğilme için çıkartılması ve titreşim hesabı için ilgili denklemler tamamen çözülerek hem titreşim ve hem de eğilme sonuçlarının boyut etkisine bağlı olarak elde edilmesi ve sonuçların değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Denklem çözümlerinin yapılabilmesi için ayrık tekil konvolüsyon yöntemi kullanılmıştır. Birinci bölümde, tezin amacı ve bölümleri ile ilgili kısa bir özet verilmiştir. İkinci bölümde, nanoteknoloji ile ilgili genel bilgiler verilmiş; nanoyapılar, nanoteknolojinin uygulama alanları ve nanomalzemeler hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde; ayrık tekil konvolüsyon yöntemi ve lokal olmayan elastisite teorisi ile ilgili literatür taraması yapılmış ve belirlenen örnek için temel denklemlerle ilgili sayısal dönüşümler yapılması suretiyle örneğe ait matematiksel model oluşturulmuş, istenilen denklem kümeleri elde edilmiştir. Dördüncü bölümde; bulunan sonuçlarla ilgili grafikler ve tablolar sunulmuştur. Beşinci ve son bölümde; sonuçlar irdelenmiş, tartışılmış ve buna göre nano ölçekli yapıların mekanik eylemlerinin araştırılması ve anlaşılması aşamasında boyut etkisinin önemli olduğu, lokal olmayan bir takım etkenlerin de nano yapıya önemli ölçüde tesir ettiği dolayısıyla lokal olmayan elastisite teorisinin moleküler boyutlardaki eylemlerini açıklamakta daha etkin ve güvenilir bir yöntem olduğu, klasik elastisite teorisinin ise bu anlamda lokal olmayan elastisite teorisine göre yeterli bulgulara ulaştıracak bir yöntem olmadığı tespiti yapılmıştır. Bu doktora tezi sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde ilgili çalışma konularına ışık tutacaktır. Ayrıca nano boyutlu farklı geometriye sahip plak sistemlerin modellenmesiyle mekanik davranışları hakkında fikir sahibi olunacaktır.

## 2. KURAMSAL BİLGİLER ve KAYNAK TARAMALARI

### 2.1. Nanoteknoloji Tanımı

Maddenin atomik boyuttaki (<100 nm) fonksiyonlarının irdelenmesi, anlaşılması ve kontrollü olarak üretim ve uygulama mühendisliği aşamaları bütünüyle "Nanoteknoloji" olarak adlandırılır. Yunancada "Cüce" anlamına gelen "Nano" kelimesi bir skaler büyüklüğün milyarda biri boyutundaki halini ifade eder. O halde nanometre, metrenin milyarda biri (1 nm = 1/1000000000 m ) ya da daha iyi anlaşılması açısından yaklaşık olarak insan saçının yüzbinde biri büyüklüğündedir. Gözle görülebilen en küçük büyüklüğün yaklaşık 10000 nm olduğu dikkate alındığında bahsedilen çalışmaların boyutu ne denli küçük olduğu daha iyi anlaşılabilir. Başındaki "nano" kelimesinden de anlaşılacağı üzere nanoteknolojik faaliyetler nanometre mertebesindeki atomik ve moleküler yapıların nano boyutlu dünyalarında gerçekleşir. Nano boyuttaki bilimi, mühendisliği ve teknolojiyi kapsayan nanoteknoloji, maddenin bu ölçekte görüntüleme, ölçüm, modelleme ve yapılandırma süreçlerini kapsamaktadır.

Maddelerin ölçüm hassasiyetinin nano ölçek mertebesinde yapılması ihtiyacı mühendislik çalışmalarının daha hassas bir şekilde yapılması süreçlerini de beraberinde getirmiştir. Buna bağlı olarak madde üzerindeki mühendislik çalışmaları mikroskobik ortamdaki konumundan ultra hassas mühendisliğe doğru kademeli olarak ilerlemiştir (Bkz. Şekil 2.1).



Şekil 2.1. İşleme hassasiyetinin evrimi (Ramsden 2009)

Biyo-teknoloji, nanoteknoloji, malzeme ve bilgi teknolojilerinin bütünleşmiş bir biçimde gelişmesiyle ortaya konabilecek teknolojik gelişmeler, sağlık, enerji, sosyal hayat, askeri teknolojiler, çevresel etkiler, yönetim, toplumsal güvenlik ve refah, ekonomik, ticari kalkınma gibi birçok alanda etkiye sahip olacaktır. Bundan dolayı ülkelerin ve toplumların gelişimi, refah düzeyi ve sürdürülebilir bir kalkınmanın sağlanabilmesi açısından bu teknolojik alanlardaki gelişmeler önemli bir konuma sahiptir. N&T, olanaklar platformudur. Daha önce uygulanabilir olmayan yeni ürün sınıflarının geliştirilmesi olanağının ufkunu açar ve tüm endüstriyel alanlarda yeni ürünler ve süreçler geliştirilmesine olanak sağlar (Tüsiad 2008).

Nanobilim ve nanoteknolojiyi bilinen bütün diğer bilim ve teknoloji alanlarından ayıran ve ön plana çıkartan en büyük ve en önemli özelliği "atomik düzeyde hassasiyettir." Nano boyutta, malzemelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, tek tek atomların ve moleküllerin ya da kütsel haldeki malzemenin özelliklerinden temel olarak ve yararlı bir yönde farklı olmaktadır. Nanoteknoloji alanında Ar-Ge, bu yeni özelliklere sahip olan gelişmiş malzemeler, aygıtlar ve sistemlerin anlaşılması ve yaratılmasına yönelmiştir (NNI 2004 ve Sharifzadeh 2006).

Roco'ya (2005) göre, nanoteknolojinin geliştirilmesi yapılan bilimsel ve mühendislik çalışmalarının etkinliğiyle doğru orantılıdır. Bu noktada nanobilim, malzemelerin atomik ve moleküler ölçekte anlaşılması, modellenmesi ve işlenmesi adına yapılan çalışmaların bütünü olarak tanımlanmıştır. Nano mühendislik ise " Üç boyutlu malzeme, cihaz ve sistem mimarisi, tıp, enerji transferi ve dönüşümü, büyük ölçek atomik modelleme ve benzetim, çevresel güvenlik ve nano ölçek düzeyinde üretim gibi konularla uğraşan mühendislik alanı" olarak belirtilmiştir.

Maddenin nanometre ölçeğinde (1-100 nm) kontrolü ve işlenmesi, özgün özelliklere sahip fonksiyonel malzemeler, makineler, robotlar ve sistemlerin yaratılması açısından kritik öneme sahiptir. O halde maddenin atomsal dizilişine planlı ve kademeli olarak müdahale edilebilmesi ve bu yöntemle ulaşılabilecek her bir farklı atomsal diziliş için farklı bilimsel özellikte ve/veya hedeflenen moleküler yapıya sahip maddeler ortaya çıkabilmesi nanoteknolojik çalışmalarla mümkün olacaktır. Bu şekilde oluşturulan maddenin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinde sıradışı değişimler gerçekleşmesi, alışlagelmişin dışında yeni elektronik, manyetik, optik ve fotonik özelliklere sahip olması beklenir. Nanoteknolojinin maddeleri atomik düzeyde işleme yeteneği ile ihtiyaca yönelik ideal atomik yapılar üretilebilecek olması onun gücünü, sıra dışı özelliklerini ve çalışma sınırlarının boyutunu açıkça ortaya koymaktadır. Ramsden'e (2009) göre nanoteknolojinin kontrol kabiliyeti kendisi ile kıyaslanan kimyadan ayıran özelliktir.

Maddenin yapıtaşı olan atomdan yola çıkacak olursak atomlar, oluşturdukları bağ yapılarıyla kimyasal bileşenlerin en küçük parçası olan molekülleri, moleküller de yaşamın temel parçası olan hücreleri oluşturmaktadır. Nanometre ölçeğindeki faaliyetlerin daha iyi anlaşılabilmesi açısından aşağıdaki tablo atom çekirdeğinden insana kadar olan farkı boyutları nanometre düzeyinde vererek kıyaslama yapılmasını amaçlamıştır (Bkz. Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Nano düzeyde boyutlar (1 nm = 10<sup>-9</sup> m )

SIRA	NESNE	BOYUT
1	Atom çekirdeği	0,000001-0,000007 nm
2	Su molekülü	0,37 nm
3	Karbon nanotüp	1-3 nm
4	DNA molekülü	2 nm
5	Protein molekülü	6 nm
6	Kan Hücresi	2500 nm
7	İnsan saçı	50000-100000 nm
9	Arı	5000000 nm
10	Elma	80000000 nm
11	İnsan	2000000000 nm

Kimyasal ve fiziksel özellikler, yapının büyüklüğüne ve atom yapısının ayrıntılarına, dışarıdan sisteme bağlanan yabancı bir atomun cinsine ve yerine göre çok farklı ve sıra dışı davranışlar sergilemektedir. Şöyle ki, mevcut bir nanoyapıya yabancı bir atomun yapışması, elektronik özelliklerini fark edilebilir şekilde değiştirmektedir. Bu yabancı atom bir geçiş elementi olduğunda yapıdığı nanoyapıya manyetik özellik kazandırmaktadır. Kısaca bir nanoyapının fiziksel özellikleri, bağ yapısı ve dolayısıyla mukavemeti onun büyüklüğü ve boyutuna bağlı olarak önemli değişimler gösterebilmektedir (Çıracı 2006).

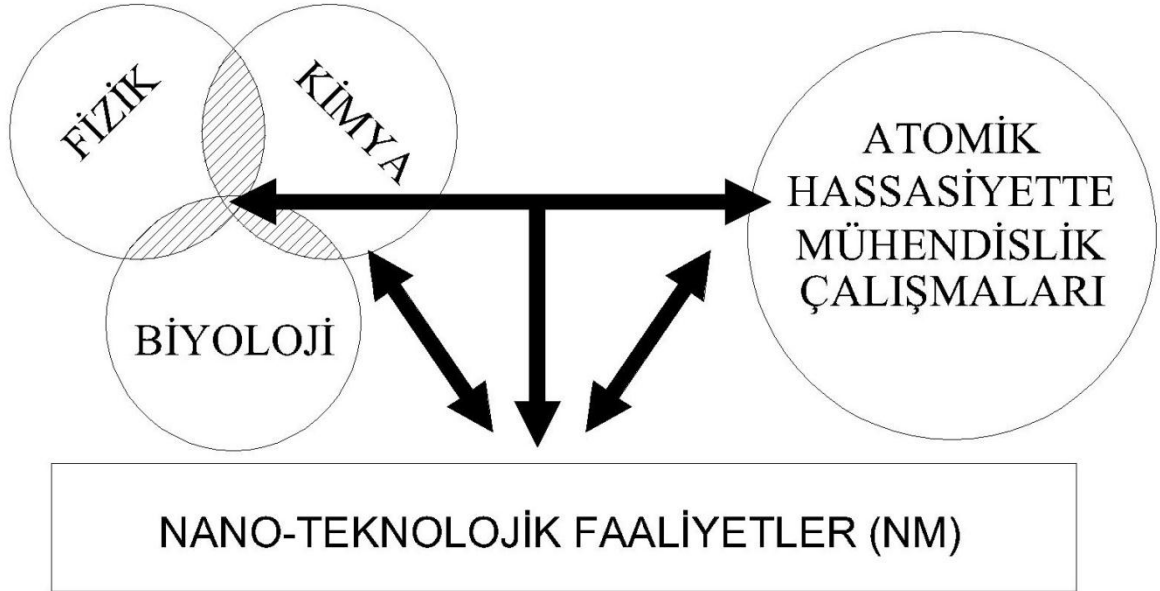
N&T bir yandan sahip olduğu yönetim, dizayn ve üretim özellikleriyle birlikte maddenin elektriksel ve mekanik özelliklerinin anlaşılması, yeni yapıların modellenmesi, analiz, imalat süreçlerini ve Ar-Ge çalışmalarını etkin ve kontrollü bir şekilde yürütürken diğer yandan nano boyutta hassasiyete sahip cihazların geliştirilmesi, böylelikle mekanik, statik ve ısıl yönden daha dayanıklı ve hafif yapıların optimum seviyede malzeme, enerji ve zaman harcanarak yapılması gibi faaliyetlerin teknolojik sorumluluğunu üstlenir. Nanoteknolojik faaliyetler yoluyla üretilen malzemelerin ergime sıcaklığı, elektriksel ve ısıl iletkenlik, yüzey gerilimleri, manyetik ve diğer mekanik vb. özelliklerinde olağan dışı farklılıklar gözlenmektedir.

Madde yapısındaki atomsal dizilişe müdahale edilebilmesiyle birlikte nanoyapıların hedeflenen düzeyde ve asgariye indirgenmiş kusurlarıyla ya da mükemmel yakın kusursuz haldeki özellikleriyle tasarlanabilmesi mümkün olduğundan nanobilim ve nanoteknolojilerle ilgili beklentileri günden güne artmaktadır. Anlaşılacağı gibi nanoteknoloji, bilim dünyasının çok geniş bir alanına hitap ettiğinden dolayı bilim çevreleri bu konuya farklı açılardan yaklaşarak değerlendirmelerde bulunmuş ve sonuç olarak farklı tanımlamalar ortaya çıkmıştır. Bu tanımlar ışığında, nanoteknolojiyi kısaca "atomik düzeyde mühendislik çalışması" olarak tanımlamak; nanobilim ve nanoteknolojinin hedefinin, nano sistemler ve nano yapılar modellemek ve bu modellerin üretimini gerçekleştirerek yaşamın her alanında kullanılmasını sağlamak olduğunu söylemek mümkündür.



Nanoteknolojinin etki alanı günümüzde hedeflenene göre çok daha kısıtlıdır. Fakat bu etkileşim giderek artmakta ve paralel olarak güncel kullanımı toplumsal hayatta hissedilir ölçüde yer edinmektedir. Ülkelerin hemen hemen her alanda önemli ihtiyaçlarının karşılanması adına akademik ve endüstriyel çerçevede geleceğe yönelik yeni ürünler ve süreçler geliştirilmesi bakımından bu ilerleme son derece önemlidir. Kullanılan teknolojiyle birlikte yeni üretim süreçleri, daha ekonomik olmasının yanında yüksek standartlarda ürünler üretebilmesi potansiyeliyle nanoteknoloji, bugüne kadar kullanılan diğer teknolojilerin yerini kolaylıkla alabilecek güce sahiptir. Ayrıca süratle ilerleme kaydedilmesi gereken birçok alanda umut veren çalışmalarla toplumlarda, bilim ve endüstri çevrelerinde heyecan yaratmakta, çalışmalara kaynak oluşturan konular son derece ilgi çekmektedir.

Teorik ve pratik uygulama alanlarından sadece bir kaçı olan Matematik (modelleme), Fizik (teorik öngörü), Kimya (seçici depolama), Biyoloji (biyosensörler), Eczacılık-Tıp (yapay kemik), Bilgisayar (kuantum bilgisayar), Elektronik (nanoelektronik), Malzeme Bilimi (hafif ve kuvvetli malzeme) vb. gibi farklı bilim dallarında sürdürülen araştırmaların ortak alanda birleşmesiyle nanoteknoloji meydana gelir (Bkz. Şekil 2.2). Birçok bilim dalını kapsayan bu faaliyetlerin gelişmesiyle ve dolaylı yollarla birçok sektörü beraberinde etkilemesiyle birlikte her geçen gün N&T faaliyetlerinde çalışan kişi sayısı artmakta ve böylelikle yeni iş sahaları oluşmaktadır. Konu ile ilgili olarak Roming (2004) tarafından, nanoteknoloji ve nanobilim araştırmalarının endüstrinin pek çok sektörünü derinden etkileyerek devrimsel değişim ve dönüşümlere yol açabileceği ve böylelikle, pek çok bilim, teknoloji ve endüstri alanında yeni oluşumlar, yeni kombinasyonlar, yepyeni alanlar filizlenmekte olduğu bildirilmiştir.



Şekil 2.2. Nanoteknolojinin temel bilimlerle etkileşimi

Nanoteknoloji ürünlerinin, üretimi ve kontrolü için hali hazırdaki kapasitesinin 2020 yılına ürün ve süreç olarak dört ana evrede ortaya çıkacağı tahmin edilmektedir. Bu

evreler; 2000- 2005 yıllarını kapsayan pasif nanoyapılar, 2005-2010 yıllarını kapsayan aktif nanoyapılar, 2010-2015 yıllarını kapsayan üç boyutlu nanosistem sistemleri ve 2015-2020 yıllarını kapsayacak moleküler nanosistemler olarak sıralanmaktadır ( Roco 2005).

Nanoteknolojik faaliyetlerin, "Kuantum Fizik Yasaları" yardımıyla açıklanması mümkündür. Böylelikle maddenin optik, elektronik, manyetik, fotonik gibi bir çok özelliği daha iyi anlaşılakta ve analiz süreçleriyle birlikte irdelenmektedir. Nanoteknolojinin, enerji yönetimi & depolanması, bilgi yönetimi & depolanması, sağlık (ilaç, medikal, doğa düzenleyici vb.), inşaat, elektronik gibi alanlarda ortaya koyduğu faaliyetler sonucunda günlük olarak kullandığımız ürünlerin yerlerini daha akıllı, estetik ve işlevsel; hafif ve son derece dayanıklı olan ürünler alacaklardır. N&T ile sağlığa, çevre kirliliğinin azaltılmasına, hammadde ve enerji tasarrufuna yönelik yeni süreçler yapılandırılacağı açıktır. Küçük boyutlu bilgisayarlar, yüksek kapasiteli nano hafızalar, transistörler üretilmesi, kronik hastalıkların tedavi edilmesi, insan vücudunda kanser hücrelerinin olduğu dokuyu bulup iyileştiren, yok eden ve hatta ameliyat yapabilen nanorobotların imalatı, insan vücudu ile dokusal uyum sağlayabilecek yapay organlar modellenmesi; termal, kendi kendini temizleyen, renk değiştiren elbiseler tasarlanması, bu faaliyetlerin en sıra dışı sonuçlarında bazıları olarak sıralanabilmektedir.

Gelişmiş ülkelerde teknolojik yatırımların artarak devam ettiği bilinmektedir. Bu ülkelerin ekonomik ve sosyal gelişmelerinin temeli, kat edilen teknolojik ilerlemelerdir. Teknolojik çalışmalar zamanla, maddenin yapıtaşına kadar inebilen ve mümkün olan en küçük boyutlarda çalışma gerekliliği gerçeğini ortaya çıkarmıştır. Nanoteknolojik çalışmaların doğuşu bu ihtiyaca cevap verebilme çabasıyla birlikte olmuştur. Büyük kaynaklar ayırarak yatırım yapan, maddi/manevi destek veren ülkelerdeki yönetimler, N&T ile ilgili yatırımlarını en öncelikli olarak planlamaktadır. Akademik çevreler ve iş dünyası öncülüğünde; devlet desteğiyle ve yine devlet tarafından denetime tabii tutularak devam eden bu yatırımların sonuçları, bu ülkelerdeki toplumların ekonomik ve sosyal anlamdaki refah düzeylerinin hızlı bir şekilde yükselmesine vesile olmaktadır. Son derece avantajlı sonuçlarıyla birlikte dünyayı belki de yeni bir çağın kapanışına ve yepyeni bir dünyanın kapısını aralayacağı bir döneme sürükleyecek olan bu gelişmelerle birlikte bu ülkelerin kısa vadede farklı alanlarda olmak üzere bir kaç basamak birden gelişme gösterecekleri tahmin edilmektedir. Nanoteknolojik faaliyetlerin evrensel bir boyut kazandığı yapılan bütün bu çalışmaların sonuçlarıyla da açıkça görülebilmektedir. Ülkemizde ise nanoteknolojik çalışmalar gerek kişisel gerekse kurumsal tabanda daha çok bireysel olarak yürütülmekte ancak bu çalışmaların daha geniş alanlara yayılarak koordineli ve sistemli yürütülebilmesi için gerekli adımların atılması yönünde çaba sarf edilmektedir. Ancak dünya genelinde yapılan çalışmalara bakılırsa, ülkemizin bu çalışmaları geriden takip ettiği açıkça görülmektedir.

## 2.2. Nanoteknolojinin Üretim Yöntemleri

N&T, moleküler boyutta sistemler üreterek daha büyük sistemleri kontrol etmeyi (bottom-up) ya da moleküler boyutta çalışan nanometre mertebesine kadar küçültülmüş makineler yaratmayı (top-down) amaçlar. Arnall (2003) tarafından yukarıdan aşağı (top-down) yaklaşımı, malzemelerin minyatürleştirilmesinin yanında nano ölçekli yapıların makinede işlenmesi ile üretilmesi, aşağıdan yukarı (bottom-up) yaklaşımı ise, moleküler nanoteknoloji olarak tanımlanmaktadır. Bahsi geçen her iki yaklaşımın birbirine göre her ne kadar avantajları ve dezavantajları olsa da özet olarak yukarıdan aşağıya üretim pahalıdır, uzun süreçler gerektirir ve az miktardaki üretimler için daha uygundur. Yukarıdan aşağı (top-down) yaklaşımı, maddenin makro yapısının parçalanarak nanometre ölçeğine indirgenmesi süreçlerin kapsar ve günümüzde kullanılan bilgisayar çipleri, minik hafıza ve veri depolama birimleri ve bilgisayarlarda kullanılan birleştirilmiş elektrik devreleri bu yaklaşımın birer ürünü olarak dikkat çekmektedir. Genel olarak fiziksel üretim yöntemleri yukarıdan aşağı yaklaşımı ile üretim grubuna girer. Bu üretimler mekanik, yüksek enerji, ısı (termik), kimyasal, litografik (baskı) ve doğal gibi çeşitli alt yöntemler uygulanarak yapılmaktadır. Aşağıdan yukarı yaklaşımı ile yapılan üretimde ise atom veya molekül seviyesinde yapılan çalışmalarla ideal nano yapılar üretilir ve oldukça ekonomik bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım ile moleküler boyutta sistemler üreterek daha büyük sistemlerin kontrol edilmesi, organik veya inorganik yapıların, maddenin en temel birimi olan atomlardan başlayarak atom atom ve molekül molekül inşa edilmesi yöntemlerini ifade etmektedir. Aşağıdan yukarı (bottom-up) yaklaşımının bilinen en önemli aleti, taramalı uç mikroskopudur. Karbon nanotüp ve fullerenler, bu yaklaşım içerisinde tanımlanabilecek tipik örneklerdir. Bu yaklaşım ile üretim yöntemleri genellikle kimya ve biyoloji disiplinlerini kapsar ve organik malzemelerde görülür. Bu yaklaşım yardımıyla yapılan üretimlerde sıcaklık, basınç, pH vb. uygun ortam koşulları baskın değildir ve doğal yollarla süreç kendi kendini tamamlayabilmektedir. Aşağıdan yukarı (bottom-up) yaklaşımıyla gerçekleşen üretimlerde üretim şekli, yine maddenin en güzel örneklerini içinde barındırdığı doğal ortamdaki katı, sıvı ve gaz fazı haline göre sınıflandırılır.

Nanoteknolojik faaliyetler 100 nm ve daha küçük ölçekte gerçekleşir. Madde boyutu nanometre mertebesindeyken sahip olduğu yüzey alanının hacmine oranında sıra dışı bir artış meydana gelmektedir. Dolayısıyla nano yapının sahip olduğu boyutsal büyüklüğün onun fiziki davranışı için önemli bir etken olduğu kesin olarak ifade edilebilmektedir. Örneğin, makro ve mikro boyutlarda sarı renk olan altın, nano boyutlarda kırmızı ve mavi renge dönüşmektedir. Bununla birlikte maddenin nanometre mertebesinde mukavemeti olağan üstü boyutlarda artmakta, sıra dışı elektrik, optik, manyetik özellikler gösterebilmekte ve ısı & ışık iletkenliği şaşırtıcı şekilde artmaktadır. Bazı iyi iletken maddeler nanometre boyutundayken son derece iyi yalıtkan; yarıcı maddeler de tam tersi şekilde sönümleyici bir hal alabilmektedir. Kayır ve Başçıl'a (2010) göre maddenin nanometre boyutunda özelliklerinin farklılık göstermesinin nedenleri şu şekilde belirtilmiştir:

1. Nano boyutlarda malzemenin yüzey/hacim oranı hızla artmaktadır. Bu durumda yüzeydeki atomların oranı malzemenin tümüne göre artmakta, malzemenin yüzey enerjisi artmakta, malzeme daha reaktif olmaktadır. Örnek verirsek normal şartlarda 1064°C ergiyen altın 2,5 nm boyunda 600°C civarında ergimektedir. Kristal kütlelerde

boyut nano düzeyine yaklaştıkça kütleinin içindeki ara yüzeyler artmakta ve bu durum mukavemet ve elektrik özelliklerine çok etki etmektedir. Örneğin nano boyuttaki nikel sertleştirilmiş çelik kadar dayanıklıdır.

2. Nano boyutlarda ve özellikle nano ölçeğin dibine doğru gidildikçe kuantum özellikleri maddenin özelliklerine hâkim olmaya başlamakta; optik, elektrik ve manyetik özelliklerini değiştirmektedir. Kuantum özellikleri (tesirleri) kuantum fiziğinde belirtilen özelliklerdir. Bütün bu temel bilimlerin katkı sağlamasıyla birlikte nanoteknolojik yeni modelin fonksiyonları alışıl gelmişin dışında ve öncekinden daha üstün olmaktadır.

### 2.3. Nanoteknolojinin Tarihçesi

N&T, gücünü doğanın eşsiz gizeminden almaktadır. Birbirini izleyen bir dizi doğal ve bilimsel süreçten geçen N&T, sahip olduğu bütün birikimini günümüze kadar ulaştırmıştır. Öyle ki son yıllarda yoğunlaşan Ar-Ge çalışmalarının çağımızın teknolojisine damga vuran sonuçları nanoteknolojinin her yüyılda var olduğu gerçeğinin ispatı niteliğindedir. MS 4. yy.da tasarlanan Lycurgus Kupası üzerindeki cam işçiliğinde kullanılan maddeler, canlı hayatın başladığı dönemden günümüze kadar bir çok özel örneğin bulunduğu nano mertebesindeki faaliyetlerin ilk örneklerindedir. Buna Selçuklular ve Osmanlılar döneminde kullanılan vitray, çini, ebru vb. sanatlarda kullanılan renk maddelerini de eklemek mümkündür. Nanoteknolojinin vizyonunu belirleyen ilk kişi şüphesiz ki Richard P. Feynman (1918-1988)'dir. 29 Kasım 1959 tarihinde düzenlenen Amerikan Fizikçiler Cemiyeti toplantısında "Aşağıda Çok Yer Var: Fiziğin Yeni Bir Sahasına Davet (There's Plenty of Room at the Bottom- An Invitation to Enter a New Field of Physics)" başlıklı bir konuşma yaparak maddenin en küçük seviyesinden itibaren kontrol edilmesi ile atomsal dizilişin istenilen şekilde yapılabileceği ve yeni üretimlerin bu çalışmalarla yeni amaçlar doğrultusunda sıradışı özellikte olacağı öngörüsünde bulunmuştur. N&T ilgili değerlendirmeleri sayesinde dünyanın ilgisini kısa zamanda bu alana çekmesiyle nanoteknoloji çağının Feynman'la başladığını söylemek mümkündür. "Nanoteknoloji" kelimesini terim anlamıyla ilk defa kullanan kişi Japon bilim adamı Norio Taniguchi'dir. "Nanoteknolojinin Temel Konsepti Üzerine (On the Basic Concept of Nanotechnology)" başlıklı makalesinde nanoteknolojiyi "malzemelerin atom atom ya da molekül molekül işlenmesi, ayrılması, birleştirilmesi ve bozulması" olarak tanımlamıştır. 1970' li yıllarda Massachusett Teknoloji Enstitüsü (MIT) başta olmak üzere o dönem Amerika Birleşik Devletlerinde eğitim faaliyetlerini sürdüren birçok üniversite nanoteknoloji alanındaki çalışmalarına hız vermiştir. N&T alanındaki ilk yazılı ve basılı örnekleri veren K.Eric Drexler 1986 yılında yazdığı "Tasarım Motorları: Nanoteknolojin yaklaşan devri (Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology)" başlıklı kitabında, nanorobotlar yardımıyla günümüzdeki makinelerden daha güçlü ve hafif ve kendi kendini kopyalayabilen nano ölçek seviyesinde makineler üretilebileceğini iddia etmiştir. Nanobilim ve nanoteknolojideki gelişmelerin devam edebilmesi maddenin nano boyuttaki hareketlerinin gözlemlenmesine bağlı olduğundan nano seviyede görüntü verebilen elektron mikroskobu zamanla ihtiyaçlara cevap verememiş ve bu kısır döngü 1981 yılında Taramalı Tünelleme Mikroskobu bulunana kadar devam etmiştir. 1986 yılında Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM)'nin geliştirilmesiyle birlikte nanometre boyutundaki maddelerin detaylı olarak incelenebilmesinin önü açılmıştır. Canlı hücreler

AKM ilk kez incelemiş ve günümüzde üzerinde hassasiyetle çalışılan ve birçok hasta için çare niteliği taşıyan hastalıklı dokuların tedavisi, kanser hücrelerinin yok edilmesi, damar tıkanıklarının kan hücrelerine ilave edilecek nano hücrelerle açılması v.b. gibi hayati konuların ilk adımları böylelikle atılmıştır. Bununla beraber genç kalma süresinin uzaması ya da yaşlılık belirtilerinin azaltılması, doğanın kendini temizleyebilmesi ve zehirli atıklardan arınması nanoteknolojinin yaşamımıza katacağı mucizelere örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca, nano ölçekli yüksek kapasitörlerin, ultra hızlı makinelerin ve bilgisayarların çağımızın süper buluşları arasında yerini alacaktır. Bu sonuçlar doğrultusunda nanoteknolojinin içinde bulunduğumuz yüzyılın teknolojik devrimini gerçekleştireceği gerek akademik çevrelerde gerekse iş dünyasında geniş kitleler tarafından kabul edilmektedir.

Bu devrimin sonucu olan ve günümüzde sıklıkla kullanılan nanoteknolojik ürünlere örnekler Çizelge 2.2'de verilmiştir:

Çizelge 2.2. Ticari olarak satılan bazı nanoteknoloji ürünler (www.nanotechproject.org)

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Şeffaf güneş kremleri</li> <li>• Kozmetik</li> <li>• Isıya duyarlı, kir tutmaz, ter ve koku tutmaz elbiseler</li> <li>• Gıda katkıları</li> <li>• Yiyecek paketlenme ambalajlama</li> <li>• Tarımsal gübreler</li> <li>• Uzun süre dayanımla mobilya ve oto boyaları</li> <li>• Kendi kendini temizleyen pencere, cam ve bina yüzeyleri</li> <li>• Bilgisayar devreleri, cep telefonu</li> <li>• Mürekkepler</li> <li>• Manyetik kayıt teypleri ve hafıza depolama aygıtları</li> <li>• Optik fiberler</li> <li>• Kimyasal-mekanik parlatma</li> <li>• Mayın tespit</li> <li>• Katı-hal pusulalar</li> <li>• Kir ve çizik tutmaz duvar kaplamaları</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yakıt pilleri</li> <li>• Endüstriyel Katalizörler</li> <li>• Dizüstü bilgisayar, cep telefonu, dijital kamera ekranları</li> <li>• Özel otomotiv ve havacılık komponentleri</li> <li>• Askeri alandaki uygulamalar</li> <li>• Futbol stadyum ışıklandırma</li> <li>• Yansıma önleyici gözlük ve oto cam kaplamaları</li> <li>• Dezenfektan ve anti-bakteriyel uygulamalar</li> <li>• Katalitik konvektörler</li> <li>• Oto çamurluk ve diğer parçalar</li> <li>• Tenis topları ve raketler</li> <li>• Dişçilik yapıştırma malzemeleri</li> <li>• Yanık ve yara bandajları</li> <li>• Biyo-görüntü ürünleri</li> <li>• Çevre koruma malzemeleri</li> <li>• Metal kesme uçları</li> </ul>
--	--

Nanoteknolojik faaliyetlerle ortaya çıkan yeni ürünler, gıda (katkı ve ambalaj), tarım (gübre), sağlık-medikal (hedef ilaç), elektrik-elektronik (nanoelektronikler, organik ışık yayan diyotlar, algılayıcılar, optik-elektronik), bilgisayar, dijital depolama ve iletişim (optik fiber,kayıt ve hafıza depolama), sanayi, inşaat-yapı (seramik, katalizör, kompozit malzemeler, kaplama, ince filmler, tozlar), turizm, temizlik, tekstil (leke, koku tutmayan termal giyecekler ), kozmetik (vücut bakım, makyaj ürünleri),

otomotiv (parça, boya ve cam), havacılık, kırtasiye sektöründe ve askeri ve ulusal güvenlik, spor, kimya, biyoloji, ve çevresel koruma (nanofiltrasyon ve membran filtrasyonu) gibi bir çok ticari alana yayılmıştır. Nanoteknoloji bu faaliyet alanlarında ilgili hammadde, imalat, montaj malzemeleri, sarf malzemeleri ve araç, gereç, makine üretimini de kapsayarak düşük maliyetle yüksek kalitede ürün ve seri üretim yapılmasını sağlamıştır. Kendi üretim araçlarını yeniden üretebilme yeteneği sayesinde hızla gelişme göstermektedir. Özin'e (2009) göre tipik bir "nano imalat" sürecinin aşamaları şu şekildedir:

- Nanoteknolojinin gelişimi büyük ölçüde, verimli bir şekilde elde edilecek ve 100 nm den küçük boyutta yapılara bağlıdır;
- Günümüzde çiplerin üzerinde devrelerin işlenmesini sağlayan fotolitografi teknolojisi nanometre boyutu için uyarlanmak/ayarlanmak durumunda; şu an için bu son derece pahalı ve teknik olarak zor görünmesine karşın endüstriyel uygulamalarla hızla artmaktadır.
- Nano imalat için iki türlü yaklaşım söz konusu: "yukarıdan-aşağıya (top-down)" diyebileceğimiz bir yüzeye moleküllerin veya atomik yapıların ilavesi, buna örnek olarak yumuşak-litografi ve dip-pen litografi teknikleri verilebilir; ya da "aşağıdan-yukarı (bottom-up)" olarak nitelendirilebilecek nano yapıların atom atom, molekül molekül inşası şeklinde olabilecektir, buna örnek olarak biyolojik tanı boyası olarak kullanılan kuantum noktacıkları (quantum dots) verilebilir.
- Kuantum noktacıkları, birkaç yüz atomdan oluşan kristallerden oluşmakta, noktacıklar harekete geçirildiğinde (excitation) tek dalga boyunda ışın yayabilmektedir. Bu yüzden biyolojik işaretleyici olarak kullanımları mümkündür. Kadmiyum selenit nanoparçacıkları bu amaçla üretilebilmektedir. Proteinler ve nükleik asit bu noktacıklarla işaretlendiğinde, ultraviyole ışık altında bu kristaller belirli dalga boylarında ışıyacağı için ilgili protein veya nükleik asidin yerini bulmak mümkün olmaktadır. Noktacığın boyutu değiştirilerek ışıma rengi de değişmektedir.
- Taramalı tünel mikroskopi ve atomik kuvvet mikroskopisi, özel problemleri ile nanoparçacıkları bir yerden bir yere taşıyarak devre tasarımlarına uygun patternler, bir atom genişliğinde halka ve tellere (nanowires) oluşturmak ve yapmak mümkündür. Ancak seri üretim için henüz çok erken olmakla birlikte son derece yavaş yapılabilmektedir.
- Nanotüpler en potansiyel alanlardan birisi; özellikle karbon nanotüplerle ilgili çalışmalar giderek artmaktadır.
- Cornell Üniversitesinde, bir bakteri hücresinden bir rotary motor proteini alınarak metalik bir nano çubuğa bağlanmıştır (litografi tekniği ile 750 nm uzunluğunda 150 nm genişliğinde bir silindir). Bu 11 nm boyundaki motor hücredeki kimyasal enerji kaynağı olan adenosin trifosfatla işlemektedir. Burada nano çubuk dakikada 8 dönüş gibi bir hızla çalışmaktadır.

## 2.4. Nano Yapılı Malzemeler:

Temel bilim alanlarından dünyada en önde gelen sektörel pazarlara uzanan farklı alanlardaki uygulamalarıyla geniş bir yelpazede faaliyet gösteren nanoteknoloji ve günlük yaşamın birçok yerinde etkisini gösteren bu teknolojiyle üretilen nano malzemeler, çağımızın en önemli teknoloji devrimini gerçekleştirmektedir.

Nano malzemeler çok çeşitlidir ve birçoğu gel-git olayı, deprem, erozyon, tsunami vb. gibi doğal süreçler yoluyla oluşan nanoparçacıklar halinde doğada bulunmaktadır. Nanoteknoloji ile elde edilen ürünler birçok yönden daha işlevsel, daha küçük boyutlarda ve hafif olmalarına karşın dayanımları son derece yüksek ve uzun ömürlü olmaktadır. Maddenin nano ölçek boyutlarında geliştirilebilmesinin, özelliklerinin anlaşılmasının ve tüm üretim süreçlerinin kontrol edilebilmesinin sıra dışı özelliklere sahip yeni nano malzemeler üretilmesine olanak sağlayacağı önceki bölümlerde anlatılmıştı. Nano malzemeler ağırlıklı olarak, nanoanalitik, nano biyoteknoloji ve nanokimya gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu malzemeler üzerinde şimdiye kadar yapılan bütün bu araştırma ve geliştirme faaliyetleri sonucu ulaşılan sonuçlar, gelişmekte olan potansiyel nanoteknoloji alanlarına ışık tutmaktadır.

Parçacık boyutu mikro ölçeklerden nanometre düzeyine geldiğinde parçacıkların yüzey alanlarının hacimlerine olan oranları artmaktadır. Aynı zamanda parça boyutu küçüldükçe yüzeyinde tutunan atom sayısının yüzey alanına olan oranında da bir artış olmaktadır. Bu artışların atomik madde yapısının reaktiflik, direnç, sertlik, elektriksel, vb. özelliklerini değiştirebilmektedir. Dolayısıyla makro ölçekten nano ölçeğe doğru gidildikçe madde yapısının hassasiyetinin arttığını söylemek gerekir. Ayrıca nano madde yapısında kuantum etkileri oluşarak maddenin optik, elektrik ve manyetik özelliklerini değiştirmektedir. Bu nedenle "yüzey alanı ve kuantum etkileri" nano malzemeleri farklı kılan özellikler olarak ifade edilir.

Tüm bu bilgilerin ışığında nanoteknolojinin gelecekteki potansiyel uygulama alanları ile genel bir yaklaşım yapılacak olursa N&T ile;

- Daha hafif boyalar, çevre bakımından önemli olan çözücüsü azaltılmış, deniz araçları, ısı esanjörleri için tortu tutmayan, sıcakta ve kimyasal ortamda renk değiştirebilen boyalar üretilmesi
- Nanoparçacıkların topraktaki ve yeraltı sularındaki kirlilik ile reaksiyona girerek onları zararsız hale getirebilmesi ve doğanın temizlenmesi
- Rezervleri giderek azalan fosil yakıtlara olan bağımlılıktan kurtulmak için farklı özellikte yakıt hücrelerinin üretilmesi ve hidrojen depolanması tekniğinin geliştirilmesi ve bu anlamda özellikle bilişim, elektronik, telekomünikasyon ve otomotiv sektörlerine yeni bir vizyon kazandırılması ile önümüzdeki süreçte ısı ve elektrik ihtiyacına alternatif ve temiz enerji kaynağı olan hidrojen depolanması ile cevap verilmesi
- Karbon nanotüpler kullanılarak düşük enerji tüketen, sağlam, net görüntülü ekranlar üretilmesi
- Mobil elektronik ekipmanlar için hafif, yüksek enerji kapasiteli bataryalar üretilmesi

- Nanoparçacıklar sahip oldukları geniş yüzeyinden kaynaklanan üstün reaktivite özelliklerinden faydalanan ve özellikle ağır sanayide kullanıma hizmet edecek katalizör çalışmaları
- Sahip olduğu yüksek mukavemet ve hafiflik özellikler sayesinde karbon nanotüplerden oluşan son derece dayanıklı kompozit yapıların yapılması
- Nanoküreler yardımıyla yüzey sürtünmesi ortadan kaldıracak kuru yağlayıcılar üretilmesi
- Nanokristal esaslı mıknatısların üstün manyetik özellikleri ile motorlar, manyetik rezonans gibi cihazlar, mikro sensörler, ve bilgi depolama aygıtlarında kullanılabilir olması
- Nanokristal zirkonyum oksit (zirkonya) yüksek dayanımı ve hafifliği, sertliği, korozyona dayanıklılığı ve dokuya uyumlu yapısı ile implant teknolojisinde kullanılması
- Kütleli halde sert ve kırılabilir olan zirkonya nano boyutlarda son derece elastik özellik gösterdiğinden endüstride işlenebilir seramik malzemelerin kullanılması mümkün olabilecektir (Kayır ve Başçıl 2010).

Bu tez kapsamında, N&T'nin potansiyel araştırma ve uygulama konuları 10 başlıkta sunulmuştur:

#### 2.4.1. Nanoparçacıklar

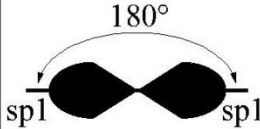
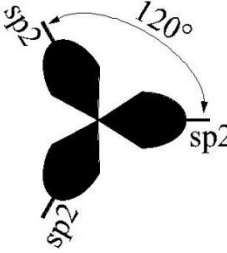
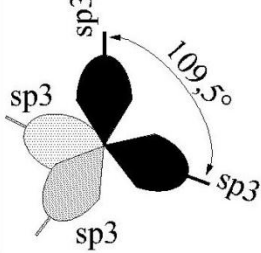
Nanoparçacıkların yüzey alanlarının hacimlerine oranındaki belirgin artışla birlikte fiziksel özelliklerinde görülen sıra dışı değişim, genellikle kuantum hareketleri ile açıklanmakta, nano ölçek seviyesinde kuantum hareketleri makro ölçek seviyesindeki kütle haline oranla büyük farklılıklar göstermektedir. Örneğin nanometre boyutunda, şekerin çözünürlüğü ve kristalleşmesi mikro ve/veya makro boyutlarına göre artmakta, altının iletkenliği artarken bakırın ki yok olmaktadır. Bundan dolayı nano ölçek mertebesinde daha hafif olmalarıyla beraber dayanımı yüksek, olağan dışı elektrik, optik, mekanik özelliklere sahip yapılara ulaşmak mümkündür. Nanoparçacıklar, kozmetik sektörü (güneşin zararlı "ultraviyole" ışınlarını yansıtmasını ve saydam yapılarıyla cilt üzerinde gözükmemesini sağlayan titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) ve çinko oksit ( $ZnO$ ) maddelerini içeren güneş kremleri), tekstil ve inşaat sektörü (kendi kendini temizleme özelliği, hafiflik ve dayanıklılık, boyalar), sağlık ve ilaç sektörü (ilaçları vücudun hedef bölgesine gönderilmesi) vb. birçok alanda geniş kullanım potansiyeline sahiptir. Ayrıca katalizörlerde olduğu gibi yüzeylere tabaka halinde uygulanıp yüzeyin aktivitesini artırır. Aşınmaya dayanıklılık özelliğiyle alüminyum silikat ve anti bakteriyel özelliğiyle gümüş nanoparçacıkların en sıra dışı olanlarıdır. Ayrıca doğada 50- 500 nm boyutunda bulunan bentonit (montmorillonit) kili inşaat ve otomotiv sektörlerinde genişleyen kullanım alanlarıyla son dönemde gözde nano malzemeler arasına girmiştir.

#### 2.4.2. Karbon nanoyapılar

Nanoteknoloji adına yapılan çalışmaların çoğu; karbon esaslı malzemeleri oluşturmaktadır. Simgesi C, atom sayısı 6, atom ağırlığı 12,0107 olan karbon, periyodik çizelgenin II periyot IVA grubunda yer alır ve ametaller grubunda sınıflandırılmıştır. Proton sayısı 6 olan karbon serbest haldeyken 1s kabuğunda 2 elektron vardır, 2s ve 2p

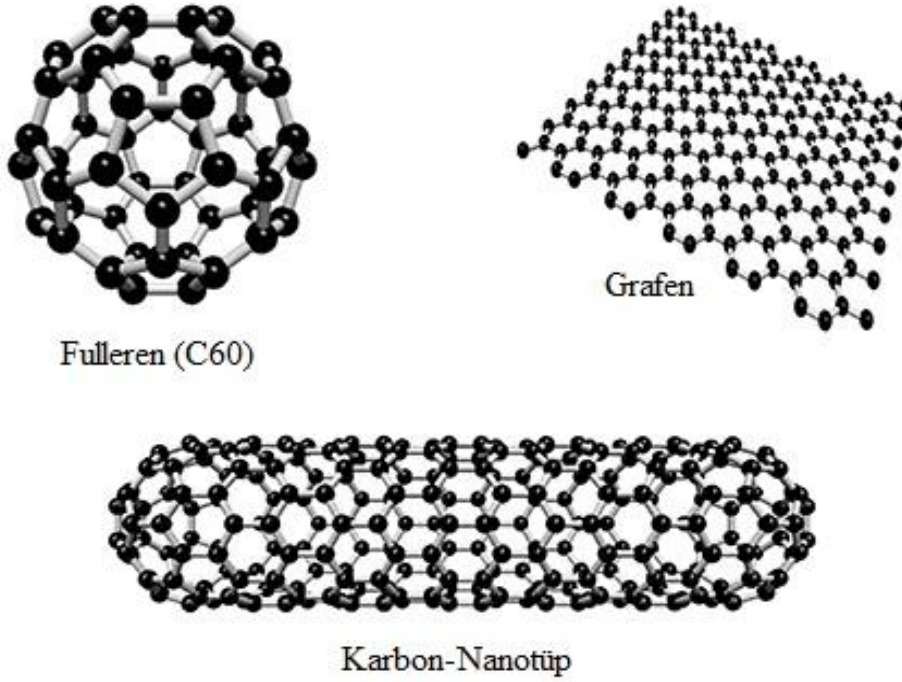


kabuklarında ise bağ yapımında kullanılan toplam 4 elektronu vardır. Karbonun atomlar arası bağları kovalent denilen, elektronun ortak kullanımına dayalı bir bağ türünden meydana gelir. Evrende doğal halde veya diğer elementlerle bileşik halinde bulunabilir. Karbon farklı özelliklerinden dolayı evrende birçok bileşiğin yapısından bulunur, doğadaki bileşiklerin yaklaşık olarak %94 ü karbon elementi içerir. Karbon esaslı malzemelerin fiziki boyutu yapacağı bağ çeşidini (sp, sp<sup>2</sup>, sp<sup>3</sup>) belirlemektedir (Bkz. Şekil 2.3). Doğada bulunan tüm canlı varlıkların yapısında karbon elementi vardır ve canlı hücrelerin oluşumunda yapıtaşı olarak görev yapar. Karbon, elementler içerisinde sıfır boyuttan üç boyuta kadar izomerleri olan tek element olmasının yanında doğada en çok allotropu bulunan özel bir elementtir. Karbon atomunun her bir farklı geometrik yapısı, farklı bir malzeme anlamına gelmektedir. Bunlardan bazıları elmas, grafen, fulleren ve nanotüpler olarak sıralanabilir.

<p>6 12.0107</p> <p><b>C</b></p> <p>Carbon</p>	 <p>180°</p> <p>sp<sup>1</sup> sp<sup>1</sup></p>	 <p>120°</p> <p>sp<sup>2</sup> sp<sup>2</sup> sp<sup>2</sup></p>	 <p>109.5°</p> <p>sp<sup>3</sup> sp<sup>3</sup> sp<sup>3</sup> sp<sup>3</sup></p>
<p>Karbonun Periodik Cetveldeki Gösterimi</p>	<p>1 Boyutlu (sp<sup>1</sup>) Bağlanma Şekli</p>	<p>2 Boyutlu (sp<sup>2</sup>) Bağlanma Şekli</p>	<p>3 Boyutlu (sp<sup>3</sup>) Bağlanma Şekli</p>

Şekil 2.3. Karbon elementi ve bağlanma şekilleri

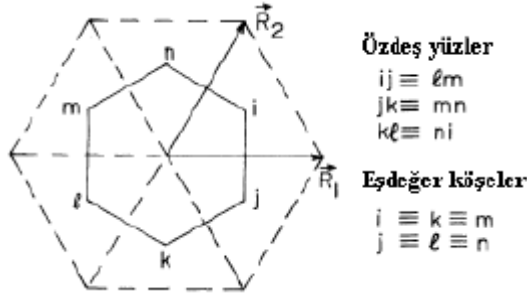
Grafenin buharlaştırılması sırasında oluşan karbon nanoyapıların en küçüğü 20 atomlu olup 1000 atomlu olanları da gözlenmektedir. Bu yapıların temelini oluşturan karbon atomları kendi aralarında, bağlanmaya katılan elektronların yapısına göre bir boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ( sp<sup>1</sup>, sp<sup>2</sup> ve sp<sup>3</sup> ) şeklindeki üç farklı bağ yapısıyla bağlanır. Bu bağ çeşitlerinin hepsini her ne kadar karbon atomları oluştursa da her biri kendi içinde farklı kararlı yapıları ile birçok sıra dışı farklı özellik gösterir. Bu bağ çeşitlerini kısaca irdelenecek olursak; bir boyutlu bağ yapısında, karbon atomları birbiriyle asetilen molekülerinin birbirleriyle olan bağı gibi doğrusal bir geometri oluştururlar. Karbon atomlarının petek şeklindeki bağ yapısıyla oluşan grafen, fulleren ve karbon nanotüp iki boyutlu (sp<sup>2</sup>) melezleşmesinin ürünüdür ve bunların arasında nanotüpler iletken veya yarı iletken özellik gösterir (Bkz. Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Karbon atomunun allotopları (Anderson 2009)

Elmas ise  $sp^3$  melezleşmesi ve dört-yüzlü ağ örgüsü ile öncekilerden farklı bir kategoridedir. Elmas, doğada bulunan en sert elementlerden birisidir, ısıyı ve elektriği iyi iletmez bir başka ifadeyle yarı iletkenidir. Elmasın sertliği, karbon bağlarının dayanıklı ve diğer bağlarla ortaklaşa kenetlenmesinden kaynaklanır.

Grafen iki boyutlu karbon yapıların en özel örneklerindedir. Karbon atomları  $1s$  ve  $2p$  orbitallerinin birleşimi ile  $120$  derece açılı  $sp^2$  melezleşmesi yaparken boşta kalan  $p_z$  orbitalleri de grafen malzemesine sıra dışı özellikler kazandırmaktadır (Bkz. Şekil 2.5). Grafen yapısında karbon-karbon bağ uzaklığı yaklaşık olarak  $1.42$  Angström iken grafen tabakalarının üst üste gelmesi ile meydana gelen grafente iki grafen tabakası arasındaki mesafe yaklaşık  $3,35$  Angström'dür. Grafen güçlü karbon bağ yapısıyla şimdiye kadar bilinen en sağlam yapılardan biri olmasının yanında grafen katmanlardan oluşan grafenteki katman arası bağlar son derece zayıftır. Grafen katmanının arasında elektronlar son derece hızlı etkileşim gösterdiğinden bu nano yapı, günümüze kadar elektronik-dijital dünyada kullanılan diğer malzemelerin ikamesi olarak yerini almasıyla ortaya çıkan yeni ürünler çok daha kullanışlı ve avantajlıdır. Yüksek yük mobilitesine, sıcaklık direncine, termal iletkenliğe ve gerilme direncine sahip olan grafen, boyut bakımından oldukça küçük olmasına rağmen aynı zamanda yüksek dayanımlı bir malzemedir. İnşaat sektöründe önümüzdeki yıllarda kullanılmasıyla ağır yüklerin, küçük kesitlerle optimum şekilde taşınabilmesi mümkün olacaktır.



Şekil 2.5. Grafenin bal peteğine benzeyen yapısı ve Brillouin Bölgesi (Semenoff 1984)

İki boyutlu kristalleri elde etmek için, basit ancak etkili bir yöntem kullanılır. Çok tabakalı bir kristalin yüzeyi başka bir yüzeye sürtülerek orada bırakacağı katmanlar ele alınır. Bu katmanları optik mikroskoplar, elektron mikroskopları veya tarama uçlu mikroskoplar yardımıyla gözlemlemek mümkündür. Mikroorganizmaların gözlemlenebilmesi için hassas lenslere sahip ışık mikroskopları, organizmayı gerçek boyutuna yaklaşık 1000 kat büyütürken 200 nm.ye kadar küçük maddelerin araştırılması için yeterlidir. Ancak maddenin temeline inerek temelden kontrol edilmesi ve ideal malzemeye ulaşılması hedefi doğrultusunda 200 nm.den çok daha küçük boyutlarda çalışmalar yapılması gereksinimi ve ışık mikroskopları bu ihtiyaca cevap verememesi bilim adamlarını yeni bir arayışa sürüklemiş ve zamanlar bu mikroskopların yerini çok daha karmaşık ve çok daha güçlü cihazlar olan elektron mikroskobu olarak atomik mertebedeki araştırmalar bu cihazlarla sürdürülmüştür.

Elektron mikroskopları, adından anlaşıldığı gibi, elektron demeti kullanılmaktadır. Bir elektron demeti bir malzemeye çarptığı anda birtakım elektron ve ışın yaymaktadır. Söz konusu ışınların ve elektronların kaynakları; malzeme atomlarının bileşimi hakkında bilgi sağlayan X-Işınları, malzeme atomlarının elektronik yapısı hakkında bilgi veren katot ışınları, malzeme atomlarının bileşimi hakkında bilgi veren auger elektronları, malzeme atomları ve yüzey yapısı hakkında bilgi sağlayan birincil ve ikincil geri saçılan elektronlar olarak sınıflandırılmaktadır (Erkoç 2007).

Bilim adamları, nanomoleküllerin özellikleri hakkında çalışma yapmak üzere çeşitli elektron mikroskopları kullanmışlardır. Bunlar;

- Taramalı Elektron Mikroskobu
- İletim Elektron Mikroskobu
- Analitik Elektron Mikroskobu

olarak sıralanmaktadır.

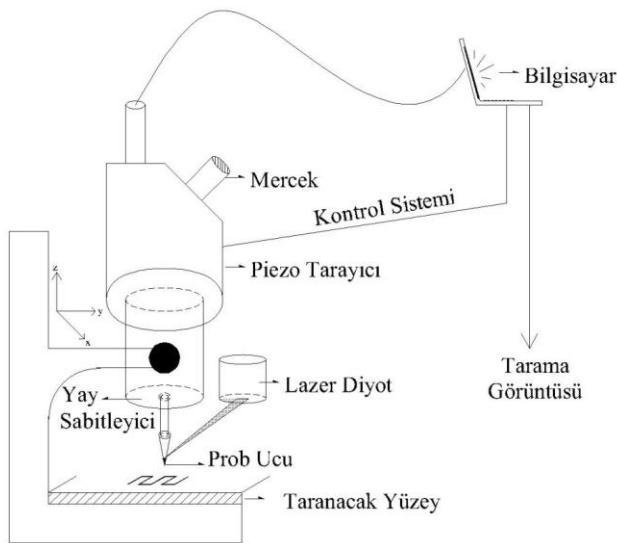
Örneklere ve ihtiyaç duyulan bilgilere bağlı olarak, bu cihazlar nanometre ölçeğinde çalışmak üzere dizayn edilmişlerdir. Elektron mikroskopları, örnekleri 10 ile 1.000.000 kez arasında büyütme için elektronlardan yararlanmaktadır. Elektron mikroskopları, nano ölçek seviyesindeki çok küçük örneklerin görülmesi ve örneklerin; şekil ve boyutlarının, yapıların, element ve bileşen miktarlarının, atom ve moleküllerin düzenlerinin ve özelliklerinin daha iyi analiz edilebilmesi için yüksek enerji elektron ışınları kullanılmaktadır (Williams ve Adams 2007).

Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM), ince veya kalın yüzeyleri taramak için odaklanmış elektron ışınlarını kullanarak görüntüleri, üç boyutlu mikroskoplar gibi daha görünür hale getirmekte ve çok iyi bir çözünürlük sağlamaktadır. İletim Elektron Mikroskobu (IEM), kalınlığı 100 nm.den az olan örnekleri araştırmak için yüksek enerjili elektron ışını kullanmaktadır. Elektron ışını büyütülmek istenen nesneye yönlendirilmekte, elektronlardan bazıları nesne tarafından emilirken veya nesne üzerinden sıçrarken, diğerleri nesnenin içinden geçerek malzemenin büyütülmüş görüntüsünü oluşturmaktadır. IEM, nano teknoloji ile uğrasan bilimsel çevrelerde güçlü ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. X-ışını ve elektron spektrometre gibi analitik cihazlarla donatılmış IEM'ler, Analitik Elektron Mikroskobu (AEM) olarak adlandırılmaktadır. Bu cihazlar, elektronlar malzemelere geçiş yaptığında elektronlardaki enerji kaybını ölçmektedir. Bu ölçümler, karbon atomları ve nitrojen atomları ile demir ve nikel atomları arasındaki farklılıkları göstermektedir. AEM'lerin oldukça yüksek performansları, bilim adamlarına 0,1 nm.ye kadar oldukça yüksek oranda çözünürlüğe sahip görüntüler sağlamaktadır. AEM ayrıca, malzemelerin atomik bileşimleri, moleküler bağları ve elektrik iletkenliği ile ilgili bilgileri sağlamaktadır. Araştırmacılar AEM vasıtasıyla, nano malzemelerin molekülleri ve nano malzemelerden yapılmış cihazların performansı ve özellikleri ile ilgili detaylı bilgi elde etme şansına sahip olmuşlardır (Özer 2008).

Tarama Uçlu Mikroskoplar; atomdan nanoölçeğe kadar olan malzemelerin yüzey karakteristiklerini incelemek amacıyla kullanılan mikroskoplardır. Bu mikroskoplar, sabit veya çıkarılabilir uçlara sahiptir. Uçların aşağı yukarı hareketi, lazer ışınları tarafından ölçülmekte, ışın titreşimi şeklindeki salanımlar, yüzeyde görüntü elde eden optik detektör tarafından ölçülmektedir. Bilim adamları, nanoteknoloji alanındaki çalışmalarında iki çeşit tarama uçlu mikroskop kullanmışlardır. Bunlar;

- Tarama Tünel Mikroskobu (TTM)
- Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) (Bkz. Şekil 2.6)

olarak sıralanmaktadır.



Şekil 2.6. Atomik kuvvet mikroskobu (AKM) çalışma prensibi

İlk tarama uçlu mikroskop, 1981 yılında, Heinrich Rohrer ve Gerd Karl Binning tarafından IBM'in İsviçre'deki Zürih Araştırma Laboratuvarlarında keşfedilen, elektron mikroskopuyla görülemeyen atom parçacıklarını 2.000 kez daha fazla büyütme özelliği bulunan ve atomik ölçekte çözünürlük sağlayan tarama tünel mikroskopudur. Bu devrimsel mikroskop, malzemelerin yüzeylerinin elektriksel karakteristiklerini ölçmek için sabit uç kullanmaktadır. Bu icat, 1986 yılında Heinrich Rohrer ve Gerd Karl Binning'e Fizik alanında Nobel ödülü kazandırmıştır. TTM, çok yüksek vakum ortamı gerektirmesi ve çok hantal bir yapıya sahip olmasına rağmen birçok akademik ve endüstri çevresi tarafından iletken malzemeleri görüntülemek amacıyla kullanılmış ve yüzey bilimcileri tarafından tercih edilmiştir (Kaiser 2006). Atomik Kuvvet Mikroskobu, 1986 yılında G.Binnig, C.F.Quate ve Ch.Gerber isimli bilim adamları tarafından keşfedilmiştir. TTM'nin aksine AKM, açık havada çalıştığından dolayı çok yüksek vakuma gerek duymamakta, iletken, iletken olmayan, organik veya inorganik malzemelerin görüntülenmesinde kullanılmaktadır. Kullanımı çok daha kolay ve daha esnek olmasından dolayı endüstri ve akademik çevre tarafından yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. AKM, yüzey topoğrafisini angström (Å) ( $10^{-10}$ m) mertebesinde 100 mikrona ( $\mu$ ) kadar görüntüleyebilme kabiliyetine sahip bir mikroskoptur (Bkz. Şekil 2.6). Bu cihaz ile moleküller arası kuvvetler hassas bir şekilde ölçülebilmiş, özel bir hazırlama işlemi gerektirmeden malzemeler her ortamda görüntülenebilmiştir (Çınar ve diğerleri 2005). AKM ve TTM, görüntü elde edilmesinin yanında nanoyapıların oluşturulmasında da kullanılmaktadır.

#### **2.4.3. Karbon nanotoplar (Fullerenler):**

Nano yapılar arasında olan karbon nanotoplar, karbon atomlarının bağlanarak topak şeklini aldıkları, farklı büyüklüğe sahip top şeklindeki kafes yapılarıdır. Fulleren olarak anılmasının nedeni ise Mimar Buckminster Fuller'in geodetik kubbesine benzemesindedir. 1984 yılında R.E. Smalley ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda grafenin eritilip buharlaştırılması sonucunda bir nano kütleyle ulaşılmasıyla futbol topunu andıran karbon nanotoplar keşfedilmiştir. 60 adet karbon atomundan (C60) oluşan bu karbon nanoyapılar, bağ yapısı olarak grafen atomlarına benzer. Karbon nanotopların, en çok üretilen ve yaygın olarak kullanılan biçimi, 60 karbon atomudur ve atomlar birbirlerine  $sp^2$  şeklinde bağlanmaktadır. Fullerenler (C60), çok sayıda karbon atomunun bir araya gelerek küresel biçimde yapılar oluşturmasıyla meydana gelen sıfır boyutlu yapılardır. "Grafinin buharlaştırılması" şeklinde yapay yöntemlerle elde edilen fullerenler bu yöntemle elde edilen diğer yapılarla karşılaştırıldığında mekanik ve elektronik özellikleri bakımından en iyi bilinen ve en sağlam olanıdır. Grafen benzeri yapıya sahip olmasıyla birlikte grafen gibi sadece altıgen değil, beşgen veya yedigen kristallerin ana düzleminin kıvrılmasıyla da küresel yapılar oluşturabilirler.

Fullerenler (C60), 12 yüzlü simetrisi 12 adet beşgen ve 20 adet altıgen yüzüyle futbol topuna benzemektedir. İki boyutlu ve yarı metaliktir özellik gösteren grafinin yapısındaki karbon atomları  $sp^2$  şeklinde; birbiri üzerine binmiş levhalar, Van der Waals kuvveti ile bağlanmaktadır. Bu bağ çok zayıf olduğu için grafen bir yüzeyle temas ettiğinde levhalar birbiri üzerinden kayma eğilimindedir. Fullerenlerin bulunması sürecindeki çalışma faaliyetlerinin ışığında 2007 yılında 80 adet bor (B80) atomundan

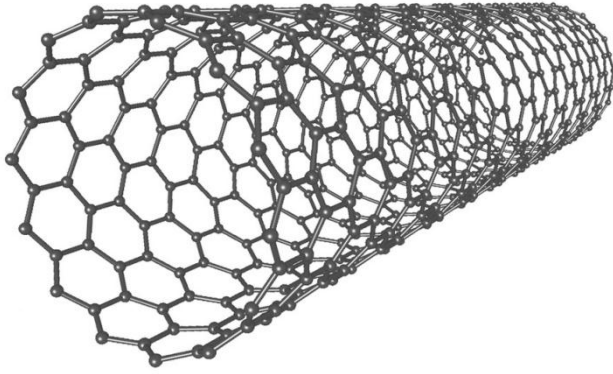
oluşan bir nano kütle daha bulunmuştur ve bu madde ile ilgili nanoteknik çalışmalar devam etmektedir.

Nanotoplar optik sınırlayıcı olarak kullanılır; malzemeleri aşırı ışıktan korumaya yardımcı olmaktadır. Karbon top içeren polimerler fotoiletkenlik özellik göstermektedirler. Bu özellikleri nedeniyle foto diyot ve transistör olarak, ayrıca güneş pillerinde de kullanılabilirler. Oksitlenmeye karşı iyi bir koruyucu olmalarından dolayı yüzey kaplama malzemesi olarak da kullanılabilirler. Ayrıca elektronik aygıtlarda ve mikro mekanik sistemlerde yüksek sıcaklığa dayanıklı olması nedeniyle kullanılmaktadırlar (Cenger 2006).

Karbon nanotoplar, saf veya katkılı halde yerleştirildikleri kristal yüzeylerinin, elektronik ve optik özelliklerini değiştirmesinden ve iki yüzey arasında zıplayarak hareket etmesinden ötürü sahip oldukları özellikleriyle bu yapılardan nano transistörler yapılması, güneş pilleri olarak kullanılması ve yüksek enerjili kapasitörler dizayn edilmesi mümkündür. Bununla beraber kaplandıkları yüzeyler için zararlı ışınlar, aşınmalara ve oksitlenmeye karşı koruyucu özellik gösterirler. Ayrıca kendi ağırlığının 300 milyon katı kadar mukavim olması onu olağanüstü kılmaktadır. Son yıllarda fulleren bazlı bir maddenin HIV virüsünün ilerlemesini yavaşlattığı, alternatif enerji depolama kabiliyetine sahip fullerenlerin enerji probleminin çözümüne katkı sağlayacağı ve hidrojen deposu olabilme potansiyelleriyle önemli çevre kirliliği problemlerine çare olacağı öngörülmektedir.

#### **2.4.4. Karbon nanotüpler:**

Karbon nanotüpler sadece karbon atomlarından oluşan karbon atomlarının bağlanışı biçimiyle de silindir şeklini andıran fulleren tipi ve karbon allotropu yapılarıdır. Fullerenler gibi yapay yöntemlerle üretilen karbon nanotüpleri şekil olarak grafen yüzeyinin rulo şeklinde kıvrılması hali gibi düşünebiliriz (Bkz. Şekil 2.7). Karbon nanotüplerin üretimi için ilk adım fullerenlerin oluşturulmasıdır. Daha sonra oluşturulan fulleren yapılar "arc-discharge" buharlaştırma yöntemiyle grafenlere ayrıştırılır ve bu ayrıştırma işlemi sonucu ortaya çıkan petek şeklinde ince zar tabakası halindeki grafenler kıvrılarak farklı mekanik özellikteki karbon nanotüplere dönüştürülürler. Karbon nanotop molekülünün ortadan kesilmiş yarım küre hali kıvrılmış rulo halde karbon nanotüpün her iki ucuna yerleştirilip uçların kapanmasıyla iki ucu kapalı karbon nanotüp üretimi tamamlanmış olmaktadır. Silindirik yapının uçları kapalı olabileceği gibi açık olarak da şekillenebilmektedir ve bu yapıdaki karbon nanotüpler yaklaşık 20 ile 100 nanometre uzunluğunda olabilmektedir. Ayrıca karbon nano tüplerin oluşum biçimleri grafen plakalarının kıvrılma yönüne göre tüpler ya zikzak ya da koltuk yapıda olmaktadır. Ayrıca her iki yapıdan birinin biraz bükülmesi ile bükük yapıda tüpler olabilmektedir. Bu yapı çeşitliliği sayesinde tüpler birbirinden farklı değişik mekanik ve elektronik özellikler gösterirler. Koltuk modeli metal özelliği gösterirken, zikzak modeli yarı iletken özelliği göstermektedir. Zikzak modelde tüpün çevresindeki halka sayısı için katları ise metal özelliği göstermektedir (Tepe 2007).



Şekil 2.7. Karbon nanotüp örneği

Grafen tabakaların silindirik olarak katlanması sonucunda içi boş bir boru görümlü tam bir silindirik yapıda oluşan karbon nanotüpler çaplarına göre çok daha uzun olan boylarının birbirine oranının (çap/boy) olağan dışı sonuçlar ortaya koyması nedeniyle mekanik özellikleri ve elektronik yapıları da son derece ilginç özellikler göstermektedir. Özellikle elektrik iletkenliğinin ve mekanik dayanımının fazla olmasıyla nano boyuttaki elektronik devrelerde ya da kuvvetlendirilmiş polimer malzemelerde kullanılabilir olmasına olanak sağlamış, bilimsel ve teknolojik alanda faaliyet alanını her geçen gün daha fazla genişletmesinin yolunu açmıştır. Karbon nanotüp alanındaki çalışmalar ilk kez 1970’de başlamıştır. Belirli aralıklarla devam eden bu çalışmaları Sumi Iijima (1991)’nın karbon nanotüp oluşumunun yüksek çözünürlüklü mikroskop yardımıyla araştırma ve geliştirme faaliyetlerine başlaması hızlandırmıştır. Tüm bu gelişmelerle beraber Sussex Üniversitesinden Harold Kroto (İngiltere) ve Rice Üniversitesinden Richard Smalley ve arkadaşlarının (1984) fullerenleri keşfiyle, araştırmacılar daha yoğun bir şekilde karbon malzemeleri araştırmaya başlamışlardır. 1996’da Smalley başkanlığında Rice Grubu sıraya konulmuş tek katmanlı karbon nanotüp demetlerini ilk kez sentezlemiştir. Tek-katmanlı nanotüpler aynı zamanda çok-katmanlı nanotüplerin temel oluşum yapısını oluşturduklarından bu sentez karbon nanotüplerin ortaya çıkışı ve kullanım alanlarıyla birlikte yaşamımızda üstlendikleri roller itibarıyla son derece önemlidir. Günümüzde de farklı ülkelerden pek çok araştırma grubu karbon nanotüpler üzerindeki çalışmalarını genişleterek devam ettirmekte ve bu çalışmalar ışığında karbon nanotüplerin kullanım alanları günden güne genişlemektedir. Karbon nanotüplerin güçlü bağlardan oluşması ve gerilmeye karşı dayanımının yüksek olması; bununla beraber elastisitesinin yani esnekliğinin de sıra dışı özellik göstermesi, karbon nanotüpler kullanılarak meydana gelen yapıların hafif olması, nano ölçekli farklı boyutlarda tam iletken ya da yarı iletken özellikler gösterebilmesi, geometrik parametrelerinin değiştirilmesiyle ortaya çıkan mükemmel elektronik özellikleri ve yüksek ısı iletkenliği onun diğer nano yapılardan farklı bir yerde olmasının en önemli nedenleri olarak sıranabilir. Örneğin, tek katmanlı nano tüpün çapı 1-2 nm, boyu ise en fazla birkaç cm, çekme mukavemeti 63 Gigapaskal düzeyindedir. Bu değer çeliğin 100 katı olmasına karşın çelikten çok daha hafif ve esnektir. Karbon nanotüplerin yüksek maliyetinin azaltılması, bazı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin de iyileştirilmesiyle; karbon nanotüp demetleriyle yapılan karbon nanotüp lifler ile dokunacak membranlar, üstün dayanımları ve esneklikleri ile gelecekte geniş yüzeylerin üzerini örtebileceği öngörülmektedir. Karbon nanotüplerle üretilen fiber, gerilmeye karşı bilinen en sağlam ve tok malzemedir. Ve yine karbon

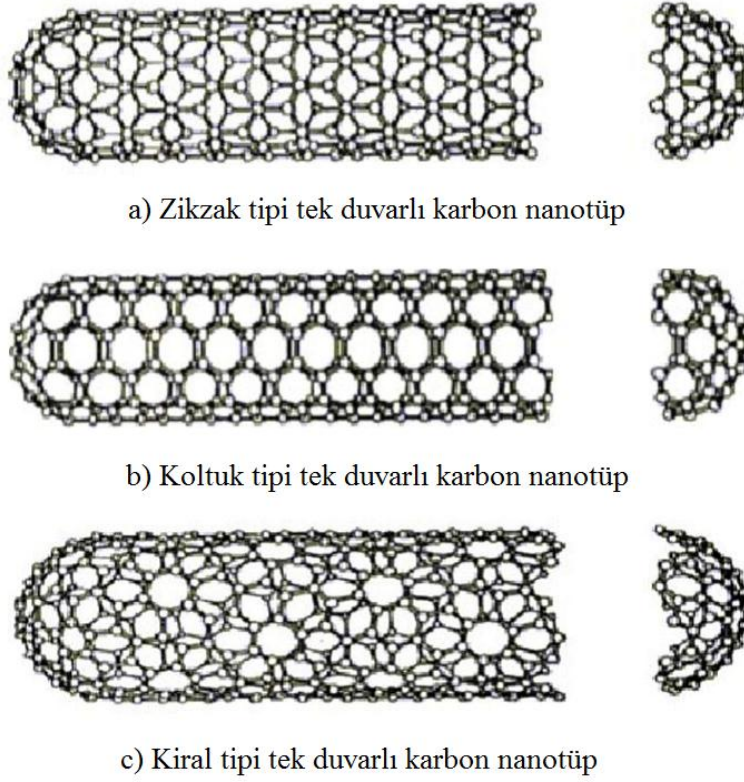
nanotüpler yardımıyla taşıyıcı elamanları oldukça küçük kesit ölçülerine sahip olmasına karşın yüksek dayanımlı, istenilen esneklikte ve depreme dayanıklı sıra dışı mimarlık ve mühendislik yapıları inşa edilebileceği öngörülmektedir. İletken ve elektrik alanına duyarlı oldukları için, elektronik malzeme olarak manyetik ve optik nano aygıt yapımında; ayrıca hafıza elemanı, kapasitör, transistör, diyot, mantık devresi ve elektronik anahtar yapımı gibi geniş bir elektriksel uygulama alanı bulunmaktadır. Karbon nanotüplerin kullanım alanlarının genişletilmesi ve yaygınlaştırılması, üretim maliyetlerinin azaltılmasına ve dinamik ve sistemli bir üretim şemasının oluşturulmasına bağlıdır. Karbon nanotüpleri, ark-buharlaştırma yöntemi, lazer ile buharlaştırma yöntemi ve kimyasal buharlaştırma yöntemi olmak üzere üç yöntemle üretmek mümkündür.

Küçük çaplı karbon nanotüpler yüksek esneklik ve dayanıklılığıyla grafenden çok daha ileri mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikler karbon nanotüplerin kompozit malzemeleri güçlendirmek için kullanılacak yeni bir malzeme olduğunu göstermiştir. Ayrıca karbon nanotüp lifleri, beton ve yapı plastikleri içerisinde güçlendirme malzemesi olarak kullanılması mümkündür. Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri üzerindeki kuramsal çalışmalar, nanotüp üretiminin kolay anlaşılmasını ve nanometre boyutundaki malzemelerin kolay işlenememesi nedeniyle deneysel çalışmalardan çok daha ileridedir. Ancak, AKM' deki ilerlemeler daha doğru sonuçlar alınmasına yardımcı olmaktadır (Salvetat 1999).

Karbon nanotüplerin aşağıdaki önemli uygulama ve kullanım potansiyelleri dikkat çekmektedir (Baykara vd. 2010 ):

- Yapısal kompozit yapılarda; Son derece yüksek dayanımlı fiber takviye elemanı olarak;
- İletken kompozitlerde; Kablo ve fiber olarak uzay-havacılık, güç sistemleri, yapı-inşaat uygulamalarında;
- Yakıt pillerinde hidrojen depolamada; Katalizör altlıklarında; Elektrot malzemesi uygulamalarında; Güneş Pillerinde; Kimyasal Sensörlerde;
- Elektronik ve veri depolamada, tıp ve ilaç uygulamalarında.





Şekil 2.8. Tek duvarlı karbon nanotüp çeşitleri (Elibol 2009)

Karbon nanotüpler en genel anlamda “Tek Duvarlı ve Çok duvarlı Karbon Nanotüpler” olmak üzere ikiye ayrılır. Bunlardan tek duvarlı karbon nanotüpler kendi içinde üçe ayrılarak, katlanmış şekillerine göre sınıflandırılıp zikzak, koltuk ve kirale isimlerini alırlar (Bkz. Şekil 2.8). Bir başka önemli parametre ise kirale (kiriş) açısıdır. Bu iki indis, genellikle  $(n,m)$  şeklinde gösterilir. Karbon nanotüp üzerindeki altıgen parçalar grafin yüzeyindeki karbon atomunu temsil eder,  $c$  vektörüne dik vektör yüzeyin kıvrılma eksenini gösterir. Her karbon atomuna bir numara verilmiştir ve  $c$  vektörünün ucu nerede ise karbon nanotüpün adı da o olur. Tek duvarlı nanotüpler;  $m=0$  ve kirale açı 0 ise zikzak tipi adını alır ve yarı iletken özelliği gösterir. Kirale açı 300 ve  $n=m$  ise nanotüp koltuk tipi adını alır. Yukarıdaki şekilde görülen koltuk tipi nanotüp, metal özelliğindedir. Kirale açı 00 ile 300 arasında kalan tüm nanotüpler ise kirale tipindedir.

Çok duvarlı karbon nanotüpler iç içe geçmiş karbon tüplerinden oluşmakta ve çok sayıda grafin katman içermektedirler. İki tüp arasındaki uzaklık, genellikle tüpü oluşturan karbon atomları arasındaki bağ uzaklığından fazladır (Toksöz 2010). Demir (2011) tarafından çizelge 2.3’te, karbon nanotüplerin diğer malzemelere göre avantaj ve dezavantajları bir tablo ile sunulmaktadır:

Çizelge 2.3. Karbon nanotüplerin karşılaştırmalı özellikleri

Özellik	Tek duvarlı Karbon Nanotüp	Başka Malzemeler
<b>Ebadı:</b>	0,6-1,8 nm çapında	Elektron demeti ile 50 nm x 5nm ebatında çizgiler oluşturulabilir
<b>Yoğunluk:</b>	1,33-1,40 gr/cm <sup>3</sup>	Alüminyum: 2,7 gr/cm <sup>3</sup>
<b>Gerilme Mukavemeti</b>	45 Gigapascal	En sağlam çelik alaşımları 2 megapascalda kopar
<b>Esneklik</b>	Düğüm yapabilecek kadar esnek	Metaller ve karbon fiberler kırılır
<b>Akım Taşıma Kapasitesi</b>	1 gigaamper/cm <sup>2</sup>	Bakır teller 1 megaamper/cm <sup>2</sup> de yanar
<b>Alan Yayma</b>	1 mikro metre uzaklıkta fosfor atomlarını 1-3 Volt civarında uyarabilir	Molibdenum uç 50-100 Volt/mikrometre (kısa ömürlü)
<b>Su İletimi</b>	Oda sıcaklığında 6000 W/Mk	Saf elmas 3320W/Mk
<b>Sıcaklığa Karşı Dayanıklılığı</b>	Havada 750 °C'ye kadar vakumda 2800 °C'ye kadar	Mikroçiplerdeki metal teller 600-1000 °C'de erir.
<b>Maliyet</b>	1500 \$/gr	Altın: 10\$/gr
1nm= 10 <sup>-9</sup> m; 1mikrometre= 10 <sup>-6</sup> m; 1Gigapascal=10 <sup>9</sup> Pascal;1Pascal= 1N/m <sup>2</sup>		

#### 2.4.5. Karbon nanoçubuklar:

Karbon nanoçubuklar, nanotüplerin içlerinin tamamen ya da kısmen dolu hali olarak tanımlanır. İç içe geçmiş karbon tüplerinde (çok duvarlı tüplerde), iki tüp arasındaki uzaklık, genellikle tüpü oluşturan karbon atomları arasındaki bağ uzaklığından fazladır. Eğer iç içe geçmiş tüplerde, tüplerin duvarları arasındaki uzaklık, karbon atomlarının bağ yapmalarına olanak verecek kadar azsa (< 0.15 nm), karbon atomları birbirleriyle sp<sup>3</sup> melezleşmesiyle bağlanarak karbon nanoçubukları oluşturur. Bu oluşumla beraber her bir karbon atomunun, dört bağlı komşusu bulunur. Karbon nanoçubuklar, nanotüplere göre daha gevrek halde olup tek duvarlı tüplerden farklı mekanik ve elektronik özellik gösterirler.

#### **2.4.6. Nano kapsüller ve kuantum noktalar:**

130-600 nm arasında boyutlardaki nano kapsüller özellikle yaygın bir biçimde ilaç salınımı ve kozmetik alanlarında kullanılmaktadırlar. Günümüzde, nanoteknolojinin en yaygın kullanım sahası olan kozmetik kremlerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Kuantum noktalar ise yapısındaki serbest elektronların ve boyut etkisinin neden olduğu kuantum tesirlerinin kattığı özellikleriyle seçili dalga boyunda çalışan hassas lazer teknolojilerinde, biyoanalizlerde kullanılmakta ve uzun dönemli olarak geleceğin teknolojisi olacağı öngörülen kuantum bilgisayarlar da kullanılabileceği öngörülmektedir. Kompozitlerde, optikte, elektrikte, enerji üretiminde, güneş hücrelerinde, biyolojik analizlerde, geleceğin bilgisayarlarında yaygın kullanım potansiyeline sahiptirler.

#### **2.4.7. Nano kristalin malzemeler:**

Mikro ölçekteki seramik ve metaller, nano düzeylere ulaştığında (nanokristalin yapı) dayanım, sertlik, elektriksel rezistans, özellikli ısı kapasite değerlerinde önemli artış olurken; daha gelişmiş ısı genleşme özelliği, daha düşük ısı iletkenlik ve daha iyi manyetik özellikler söz konusu olmaktadır. Seramik malzemelerde oluşturulan nanokristalin yapı tokluk değerlerinin artmasına ve malzemenin kırılabilirliğinin azalırken daha sünek bir yapı kazanmasına yol açar. Bu malzemeler yüzey kaplamasında kullanılır.

#### **2.4.8. Nano gözenekli malzemeler:**

Doğal koşullar içerisinde, doğada var olan pek çok yapının bu niteliklere sahip oldukları görülmektedir. Başta doğal mineraller olmak üzere, biyolojik sistemlerde nano gözenekli yapılar gözlemlenir. Nano gözenekli malzemeler içerisindeki nano gözeneklerin boyutlarının kontrolü ve buna bağlı olarak homojen bir şekilde oluşturulması ile bazı uygulama alanları şunlardır: Kimya endüstrisinde gelişmiş katalistlerde; filtrasyon ve ayrıştırma teknolojilerinde (su arıtma, ilaç saflaştırma, enzim ayrıştırma gibi); medikal ve ilaç endüstrisinde (ilaç ve ilaç salınımında, analiz, teşhislerde); İletişimde (elektronik, elektrik ve optik); uzay-havacılık ve savunmada (aerogeller); enerji alanlarında (süperkapasitörlerde, batarya ve yakıt hücrelerinde); çevre teknolojilerinde.

#### **2.4.9. Nano yapıli kaplamalar:**

Nano yapıli kaplamaların bir başka türü olan Sol Jel Kaplama yöntemi, koloidal bir çözelti "sol" içerisindeki molekülleri veya parçacıkları iki fazlı "jel" haline getiren bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Burada, söz konusu moleküller veya parçacıkların nano ölçekte uygulanması ile nano yapıli sol jel kaplamalar oluşturulur. Bu teknoloji ile nano yapıli işlevsel kaplamalar her türden yüzeyler üzerinde elde edilirler. Yüzeylerin bir anlamda tasarlanarak hedeflenen nitelikte oluşturulması sağlanmakta, metalik, seramik, cam, polimerik, kompozit, ahşap her türlü yüzeye arzu edilen işlevsellik kazandırılmış olmaktadır. Böylelikle, hidrofilik, hidrofobik, çizilme dayanımlı, anti-statik, anti-korozif, anti-bakteriyel, anti-mikrobik yüzeyler sağlanması mümkün olabilmektedir (Andreeva 2008).

#### 2.4.10. Nano kompozitler ve dendrimerler:

Nano kompozitler kompozit malzemeler arasında önemli bir yer tutmaktadır. Kompozit yapı içerisinde kullanılan dolgu/takviye malzemelerinin (tanecik veya fiber formunda) nano boyutta uygulanmasıyla "nanokompozitler" üretilir. Daha basit bir ifadeyle üretimi organik polimer, metal veya seramik içine nanomalzemelerin yerleştirilmesiyle yapılır. Söz konusu dolgu/ takviye malzemeleri nanotanecik veya nanofiber olarak doğal killer veya sentetik tabakalı silikatlar olarak uygulanmaktadır. Burada, dolgu/takviye malzemelerin nano boyutta homojen olarak matris içerisinde dağılmasıyla kompozit yapıda önemli ölçüde gelişmiş mekanik, fiziksel ve ısı özelliklerine (mukavemet ve elektrik değerlerine) ulaşılmaktadır. Bunun sebebi katılan nanomalzemelerin yüzeylerinin çok fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bugünlerde bu konuda yapılan araştırmaların çoğu organik (plastik) bazlı nano kompozitler üzerinedir. Daha gelişmiş özellikleriyle nanokompozitler otomotiv endüstrisinde, ambalaj sektöründe, yapı-inşaat, imalat endüstrilerinde kullanılmaya başlamışlardır. Dendrimerler ise büyük ve karmaşık moleküllere sahip, iyi tanımlanmış polimerik yapılardır. Mükemmel dizilimli monodisperse makro molekül yapıda düzenli ve yüksek ölçekte dallanmış 3-boyutlu bir yapıya sahiptirler. Esnek moleküller yapılarından dolayı çoklu-işlevsellik ve spesifik şekillerde daha büyük ve karmaşık organize yapıların elde edilmesinde uygulanırlar.

#### 2.5. Nanoteknolojiye yapılan yatırımlar

Nanoteknoloji alanındaki çalışmalar ülkelere kattığı ekonomik ve askeri güç ile insanların ulaşabileceği refah düzeyinin kalitesini yükseltmesi nedeniyle günden güne artarak devam etmektedir. Bilim ve teknolojiye bir devrim niteliği taşıyan bu çalışmaların ulaşacağı boyutlar günümüz dünyasında hayal gücümüzü zorlamakta bununla beraber ancak ana temasıyla irdelenebilmektedir. Gıda, tekstil, sağlık, elektrik-elektronik, bilişim, yapı-inşaat, otomotiv vb. gibi halkın iç içe olduğu ve yaşamını kolaylaştıran birçok sektörde geniş faaliyet alanına sahip olan nanoteknolojinin önümüzdeki yıllarda bilimsel ve teknolojik çalışmalara damga vurması gerek akademik çevreler, önde gelen bilim adamları gerekse iş dünyası tarafından öngörülmektedir. Böylece ilerleyen zaman dilimlerinde nanoteknolojik faaliyetlerin ve buna bağlı olarak üretilen nanoteknolojik ürünlerin yeri günlük hayatımızda hissedilir biçimde artacaktır. Nanoteknolojiyle üretim, yönetim süreçleri ve çeşitleri geniş bir yelpazeye ayrılacaktır. Bu alanda faaliyet gösteren veya çalışmalarını daha etkin yürüten ülkeler güçlerine güç katacak, ekonomik-sosyal kalkınmaya paralel olarak güçlü ile zayıf ülkeler arasında bu alanlardaki fark giderek açılacaktır. Geniş bir yelpazede yapılan destekler arasında nanoelektronik cihazlar, karbon nanotüpler, bio-sensörler, moleküler tanımlama sistemleri, nanokompozit malzemeler ve yeni mikroskop teknolojileri öne çıkmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nin bu çalışmaların liderliğini yürüttüğü görülmektedir. Avrupa Birliği ülkeleri (Almanya ve Fransa) ve Asya ülkeleri içinde Japonya çalışmalara en çok katkıda bulunan ülkelerdir. Japonya dünyada ABD'den sonra nanoteknoloji alanında en fazla AR-GE harcaması yapan ikinci ülke konumundadır. Asya ülkeleri arasında Japonya'yı takip eden ülkeler arasında Çin ve Kore öne çıkmaktadır.

Dünyada yapılan birçok araştırma, gelecekteki nanoteknoloji pazarını tahmin etmeye çalışmaktadır. Araştırmalar kapsamında, nanoteknoloji uygulamaları ve buna yönelik oluşan pazar göz önüne alındığında, nano esaslı ürünlerin gelecekte büyük bir yer edineceği ve günlük yaşamın bir parçası olacağı düşünülmektedir. Dünyadaki genel eğilime uygun olarak, Türkiye'de de nanoteknoloji alanındaki çalışmalar akademik olarak başlamış ve halen ağırlıklı olarak pek çok üniversite ve araştırma kuruluşunda araştırma etkinlikleri olarak yoğunlaşmış bulunmaktadır (TÜSİAD 2008). Ancak başta KOBİ nitelikli firmalarımız olmak üzere nanoteknoloji alanlarına yönelik yoğun bir ilgi söz konusudur. Bunun da ötesinde, Türkiye için nanoteknoloji alanlarında inisiyatif alıcı, öncü yatırımlarla birlikte üretim ve uygulamaya yönelik önemli potansiyellerin mevcudiyeti bir gerçekliktir.

## **2.6. Nanoteknolojinin Gelecekteki Uygulama Alanları**

Birçok bilim adamı nanomalzemelerin, önümüzdeki dönemlerde yeni nesil tüketim ürünlerinde, minyatürleştirilmiş bilgisayar çiplerinde, nano ölçek sensörlerde, DNA moleküllerini sıralayan cihazlarda, entegre mikro sistemler ve biyoteknoloji gibi alanlarda çok fazlasıyla etkili olacağını öngörmektedir (Miyazaki ve Islam 2007). Kaynağını bütünüyle doğadan alan nanoteknoloji, molekülleri birbirine bağlayarak güçlü yapılar oluşturması veya gerektiğinde enzimlerle bu bağları kopararak yapısını yeniden düzenleyebilmesi nanoteknolojinin doğadaki varlığının en güzel ispatıdır. Lotus çiçeğinin yaprağı yüzeyinde bulunan mikro ve nano boyutlarındaki hidrofobik tüycük yapılar, yaprak üzerine düşen su damlalarını yüzeyde tutunmamakta ve düşen su damlacıklarıyla birlikte yaprak yüzeyinin temizlenmesini sağlamaktadır. Lotus çiçeğinin bu özelliği tekstil, otomotiv, imalat, vb. sektörlerindeki yüzeyi kuru kalan ve kendi kendini temizleyen maddelerin üretimine ilham kaynağı olmuştur. Doğanın sahip olduğu eşsiz nanoteknoloji potansiyelinin, gelecekteki birçok bilimsel araştırmanın neferi olmasıyla beraber farklı sektörlerden birçok alanda yaşamı kolaylaştıran, fonksiyonel, ihtiyaçlara cevap veren ve daha önce çözümünün olmadığı birçok probleme çare olan özellikteki nano ürünler günlük hayatımızda yerini alacaktır.

### **2.6.1. Elektronik, fotonik, manyetik ve bilgisayar teknolojileri:**

İletim kablolarının, elektronik devre elemanlarının nanoteknolojik yöntemlerle üretimi ile elektrik-elektronik ve bilgisayar teknolojilerinde devrim niteliğinde gelişmelerin olacağı açıktır. Nanoteknoloji arge faaliyetleri, elektronik ve bilişim sektöründe hali hazırda kullanılan mikro yapıları nanometre mertebesine doğru küçültecektir. Kuantum etkisi hedeflenen bir seviyede ve amaca yönelik tesir edebilecektir. Kuantum noktaların ışınal yayılım ve emilim frekansları ayarlanabilecektir. Elektronik ve fotonik alanında az enerji harcayan, daha kapasiteli ve hızlı olmasının yanı sıra son derece küçük devreler yapılabilecektir. Elektronik ve fotonik sektörüne paralel olarak karbon nanotüplerden yararlanılması ile çok daha dayanıklı, görüntü kalitesi ve işlevi yüksek ve düşük enerji ihtiyacı duyan ekranlar üretilecektir. Nano elektroniğin önemli bir bileşeni olan OLED teknolojisi, daha hafif cihazlar içerisinde düşük enerji kullanan ve yaydığı ışıkla çok daha geniş bir alanı aydınlatabilen bir teknoloji olarak göze çarpmaktadır. Hali hazırda mevcut dizüstü bilgisayarlarda, cep telefonlarında, otomobil gösterge panellerinde, GPS sistemlerinde ve dijital kameralarda kullanılmaya başlanan OLED teknolojisinin daha fazla görüntü

kalitesi sunmasından dolayı LCD ekranların yerini alması beklenmektedir. Nanoteknoloji, elektronik alanında en çok silikon-tabanlı çiplerin yerini, organik-tabanlı çiplerin almasıyla bilgisayar çip üretim teknikleri ve bununla ilgili sanayi sektöründe köklü değişimlerin meydana gelmesi beklenmektedir. Günümüzde uygulamalı mikro elektronik araştırmaları için temel girdiler, telekomünikasyon, bilgisayar, ticari elektronik ve askeri uygulamalar olarak göze çarpmaktadır.

Bilişim teknolojilerinin pazar payının 2020 yılına kadar 3 trilyon dolara çıkacağı öngörülmekte ve en önemli aktör, minyatür ve hızlı işlemciler olacaktır. Bu teknolojilerin etkisiyle daha güçlü ve hızlı bilgisayar, hesaplama ve iletişim yetenekleri ortaya çıkmış olacaktır. Bilişim teknolojilerinde nanoteknoloji uygulamalarının hedefi, ekonomik ve yüksek performansa sahip malzemeler ve cihazlar üretmektir. Nanoteknoloji ürünü bilgisayarların, günümüz teknolojisi ile üretilen bilgisayarlara nazaran boyut olarak daha küçük ancak hız ve kapasite olarak daha büyük olması ve daha az enerji harcaması beklenmektedir. Günümüz bilgisayarlarının alışlagelmiş yapısından daha farklı, çok daha küçük boyutlarda ve oldukça performanslı işlem gücüne sahip yeni nesil nanoteknolojik bilgisayarlar üretilmesi ve bununla beraber erişim, iletişim, telekomünikasyon ve ışın-ışık yönetimi alanlarındaki gelişimin günümüz teknolojisinin sınırlarıyla tahmin edilemeyecek boyutlarda olması beklenmektedir.

#### **2.6.2. Tıp, sağlık ve ilaç sektörü:**

Nanoteknoloji, insanoğlunun hayatını daha rahat ve daha kolay sürdürebilmesi için sağlık alanında hastalıkların tespiti, teşhisi ve tedavisi gibi süreçlerde kullanılması gerekmektedir. Bilim adamları nanoteknolojik ürünlerin kendisine en çok sağlık alanında yer bulacağını ve birçok alanda çalışmalar yürütülerek üretilen veya üretilen bu ürünlerin sadece bir çalışma alanı olan nano ilaçların akıllı nanorobotlarla hedefe yönelik gönderilmesi ve diğer bir önemli çalışma alanı olan nanosensörlerle hastalığın erken teşhisi ve tedavisinin yapılması mümkün olabilecektir. Bu uygulamalar canlı organizmaların hücresel yapılarında nano ölçekte yapılan müdahalelerle yenilenme ve yapılanma imkânı sunar. Organizma genetiğinde yapılan bütün bu analizlerin ve faaliyetlerin sonucunda ulaşılabilecek erken teşhis ve tedavi yöntemlerindeki yenilikler, günümüzdeki birçok hastalığın tedavisi için yapılan harcamalara kıyasla daha ekonomik bir yöntem olacağı, nano aygıtların vücut içerisinde yapacağı kontrollerle son derece hassas sonuçlara ulaşılabileceği için hastalıkların tedavisi açısından son derece önemli olduğu bilinmektedir. Hücre genetiğine dışarıdan müdahale yoluyla yapılan bu değişikliklerle günümüzde tedavisi çok zor olan hatta bazıları için çaresi olmayan hastalıkların tedavi süreçlerinin ve yöntemlerinin minimum risk altında gerçekleştirilebilmesi mümkün olabilecektir. Ayrıca nanoteknolojik çalışmalarla üretilen nano&biyo sensörler, nanoelektronik ve nanofotonik tıp makinelerinin ve nano ilaçların kullanılması doğrudan hastalıklı bölgeye ulaşmasını sağlayacak nano sistemlerin araştırma ve geliştirme çalışmalarının devam etmesiyle gelecekte, çok daha etkili ve hızlı sonuçlanabilen tedavi süreçlerinin gerçekleşeceği açıktır. Nanotıp aygıtları ve ameliyat sürecinde (öncesi, anında ve sonrasında) kullanılan sağlık ürünleriyle düşük riskte başarılı ameliyatların yapılması veya ilaç sektöründeki ürünlerinin kontrollü bir şekilde vücudun sadece tedavi isteyen bölgesine odaklı ve tedavisi ölçeğinde etki edebilme kabiliyetinde ilaçların kullanılması mümkün olacaktır. Böylelikle ilaçların

kullanılması esnasında görülen yan etkiler minimuma indirilecektir. Nano biyoloji alanındaki uygulama tekniklerinde süregelen gelişimin de önümüzdeki yakın süreçte bizleri; yapay organ nakillerinin gerçekleştirilebileceği, proteinlerin ve çeşitli organik maddelerin kopyalanabileceği, böylece nanoteknolojinin ilaç, tıp ve sağlık sektöründe çok daha iyi uygulanabilir ve kontrol edilebilir bir görev üstleneceği öngörülmektedir.

Nanoteknolojinin tıp alanındaki uygulama alanlarına topluca "nanotıp" denilebilir. Özellikle, nanoteknolojinin günümüz itibariyle henüz emekleme aşamasında olan "moleküler imalat" veya buna bağlı "moleküler cihaz ve donanım" kullanımlarının büyük ölçüde nanotıp uygulamalarında ön plana çıkabileceği değerlendirilmektedir. Geline aşamada, nanotıp ilk başlangıç çalışmalarında hassasiyetle yapılandırılmış nanoparçacık uygulamalarına ağırlık verilmektedir, bunlara örnek olarak dendrimerler, karbon füllerenler ve nano-shell olarak adlandırılan özel uygulamalar özellikle ilaçların doğrudan doku ve organlara hedefe odaklı (targeted) olarak uygulamalarını içermektedir. Bu nanoparçacıklar hem teşhise hem de tedaviye dönük anti-viral, anti-tümör veya anti-kanser ajanlar olarak işlev görmektedirler (Freitas 2005 - Van Lente 2006). Nanoteknolojinin özellikle sağlık konusunda sorunların çözümüne ve yaşamın uzatılmasına yönelik sağlayacağı katkılar, insanoğlunun nanoteknolojiye olan ilgisini artırmaktadır.

### **2.6.3. Havacılık ve uzay**

Nanoteknoloji kullanılarak olağan üstü yapısal özelliklere sahip ürünler elde edilebilmektedir. Nanomalzemeler, makro ölçekteki kütleli hallerine göre daha hafif, sağlam ve termal dayanıklılığına sahip olma özellikleriyle roket ve uzay istasyonlarının yapımında büyük önem arz etmektedir. Örneğin karbon nanotüpler çelikten çok daha yüksek mekanik ve ısı dayanıma sahip olmalarına karşın oldukça hafiftirler. Havacılık ve uzay araştırmaları için gerekli olan yapıların dizaynında karbon nanotüp vb. gibi malzemelerin kullanılması ile havacılık ve uzay araştırmalarının ihtiyacını fazlasıyla karşılayabilecek ekonomik, ergonomik, işlevsel, yüksek dayanıma sahip ve estetik yüksek yapılar yapılabilecektir. Bununla beraber uzay araçları gerekli dönüşümler gerçekleştirilip nano yakıtlarla çalıştırılabilirse bu araçlar önemli ölçüde hafifleyeceğinden hareket için daha az enerji gerekecek ve daha uzun yolculuklar daha ekonomik olarak yapılabilecektir. Yine bu alanda kullanılacak nano bilgisayar, nanoelektronik ve nanofotonik ile çok daha kapasiteli işlemciler ve güçlü bir bilgi ağı sistemi oluşturularak nanosensörlerle desteklenen çalışmalar takip kolaylıkla edilebilecektir. Ayrıca radyasyon ışınlarına karşı koruyucu özellik taşıyan ve son derece hafif giysiler bu çalışmaları kolaylaştıracaktır. Bütün bu yenilikler toplumlarca çok merak edilen havacılık ve uzay araştırmalarının çok daha etkin bir şekilde yürütülmesini sağlayacağı belirtilmektedir.

### **2.6.4. Çevre ve enerji**

Dünya üzerinde giderek azalan fosil kökenli ve petrol türevli yakıtlar ülkeleri alternatif enerji arayışına sürüklemiş ve bu doğrultuda üretimi ve işlenmesi ekonomik, güvenilir, çevre dostu ve yenilenebilir yeni enerji kaynakları arayışı başlamıştır. Günümüzde bu arayışlar çerçevesinde yapılan çalışmalar hızla devam etmektedir. Nanoteknoloji alternatif enerji üretmede ve bu enerjinin aynı zamanda depolanmasında

önemli görevler üstlenmiştir. Nanoteknolojik çalışmalarla geliştirilen enerji yönetimi ve üretim sistemleriyle bu kaynakların düzenli ve çevreye zarar vermeden kullanımı yolunda da önemli adımlar atmaktadır. Dolayısıyla günümüz enerjisinin gelecekte yerini alacak olan bu kaynaklarla çevre atıkları & sera gazı salınımı düşürülecektir. Günümüzde hayatın temel taşı olarak son derece önem arz eden ve gelecekte önemliliği ve ihtiyacı çok daha kritik seviyelere ulaşacak olan suyun temizlenmesinde nanofiltreler kullanılmasıyla birlikte gerekli arıtım yapılması mevcut kaynakların ekonomik ve yenilenebilir şekilde kullanılmasına güzel bir örnektir. Gelişmiş toplumlar eğitim, sosyal, endüstriyel, vb. ihtiyaçlara cevap verebilmek amacıyla yüksek enerji tüketimi yapmaktadır. Ancak bu tüketim azaltılmazsa gelecekte ülkeler için son derece büyük ekonomik risklerle karşı karşıya kalacaklardır. Nano boyutlardaki çalışmalarla birlikte nano enerji sistemleriyle, güneş, jeotermal ve hidrojen gücünün etkinliğini artıracaktır. Bu hedef doğrultusunda güneş pilleriyle güneş enerjisi depolanabilecek ve bu pillerle donatılan evler ve iş merkezleri son derece ekonomik bir şekilde tüm enerji ihtiyacını karşılayabilecek, enerji kaynakları daha verimli kullanılabilir. Ayrıca nanoelektronik ve fotonik temelli Led ışıkları sayesinde çok daha az enerji tüketimiyle güçlü aydınlatma elde edilebilecek, Oled teknolojisinin dijital dünyada yerini almasıyla hafif, az yer kaplayan ve ekonomik sistemler oluşturulabilecektir. Mevcut enerji kaynaklarına diğer bir alternatif hedefi ise hidrojen pilleri teknolojisi olarak göze çarpmaktadır. Gaz ve sıvı halde depolanması son derece riskli olan hidrojen, karbon nanotüplerin bu teknolojiye kullanılmasıyla birlikte emniyetli ve işlevsel aynı zamanda ekonomik bir hidrojen depolama sistemi geliştirilebilecektir. Hidrojen pilleri günümüzde kullanılan ve son derece pahalı olan birçok enerji kaynağının yerini alarak enerji üretimi ve kullanılması risklerinin ortadan kalmasına katkı sağlayacaktır. Nanosensör ve nanorobotlar ile nükleer atıklar tespit edilebilecek, bu atıkların kontrolü ve filtrelenmesi sağlanabilecektir.

#### **2.6.5. Biyoloji, gıda ve tarım:**

Nanoteknoloji kullanılarak biyolojik dokuların analizlerinin yapılması ve işlenmesi ile ilaç, tarım ve hayvancılık sektöründe biyo-teknoloji ve bilişim teknolojisinin de desteğiyle beraber radikal uygulamaların ve üretimlerin gerçekleşmesi beklenmektedir. Tarım ürünlerinin DNA'ları üzerindeki analizlerle besin değeri yüksek yiyecekler üretilmesinde ve bu yiyeceklerle beslenerek hastalıklara karşı dirençli ve dolayısıyla daha sağlıklı, güçlü bir toplumun yapısının oluşmasında bu faaliyetlerin oldukça kritik bir önemi olacaktır. Bu nedenle günümüzde akademik olarak bu alandaki çalışmalar hızla devam etmekte ve özel teşebbüslerle de desteklenmektedir. Ticari anlamda bazı ürünlerin üretilmiş olması da bu faaliyetlerin bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Su içerisinde çözünmeyen vitamin ve benzeri maddeler, nanoteknolojiyle üretildiklerinde suda kolaylıkla çözünerek biyolojik yönden insan vücuduna daha uygun bir yapıya olacaklardır. Ayrıca paket ve ambalaj sektöründe de nanoteknolojinin kullanılmasıyla uzun süre tazeliğini koruyabilen çok daha sağlıklı besinler muhafaza edilebilecektir.



## 2.6.6. Savunma sektörü

Endüstriyelmiş ülkelerde silahlı çatışmalarda zafer kazanmak için yeni ve yüksek teknolojiler kullanılmıştır. Askeri teknolojiler, savaş ortamının dışında barışın sürdüğü ortamlarda da sivil hayata direkt veya direkt olmayan etkiler sunmuşlardır. Askeri ve sivil teknolojiler, gün geçtikçe birbirleriyle örtüşmekte ve karşılıklı etkileşim içerisinde bulunmaktadırlar. Nanoteknolojinin savunma sektöründe kullanımı da bu temele dayandırılarak incelenmeli ve çift kullanım esasına dayalı askeri ve sivil alanlardaki etkileri göz önüne alınmalıdır. Nanoteknoloji, özellikle savunma sanayinde ki uygulamalarında, bu teknolojiyi elde bulundurana avantaj sağlarken karşı taraf için ölümcül etkiler bırakabilecek bir güç yaratacaktır. Tarih boyunca yaşanan savaşlarda süper teknolojiler karar verici faktör olarak yer alırken, sadece son yüzyılda Silahlı Kuvvetler kendi yapılarında bilime de yer vermeye başlamışlardır. İkinci Dünya Savaşından sonra gelişmiş ülkeler, askeri AR-GE için büyük merkezler oluşturmaya başlamışlar, askeri endüstrideki yenilikler için önemli kaynaklar ayırmaya başlamışlardır. Bu çalışmaların birçoğu, ilk zamanlarda nükleer silahlar ve taşıyıcıları ile bağlantılı iken zamanla artan bir şekilde savaşın diğer alanlarına doğru taşınmıştır (Özer 2008).

Nanoteknolojinin etkin olarak kullanılması ülkelerin ulusal güvenlikleri açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Atomik düzeydeki faaliyetleriyle meydana gelen ve mükemmel yakın mekanik ve elektronik davranış gösteren malzemelerin savunma sektörüne uyarlanmış hali hafif, dayanıklı ve etki düzeyi son derece yüksek silah yapımında, darbeye ve ısıya karşı koruyan, kamufla edebilen son derece dayanıklı ve hafif giyecekler üretilmesinde, askeri haberleşme ve iletişimin geliştirilmesinde yerini almaktadır. Ayrıca nanoteknolojik robotların askeri uygulamalarda insan kapasitesinin çok üstünde faaliyet gösterebilmesi ve simülasyon kabiliyeti olan elektronik cihazların gelişmesiyle askeri eğitimlerin daha efektif şekilde verilebilmesi de nanoteknolojinin savunma sektörüne olan katkılarıdır. Uygulama alanı olarak en önemli potansiyelinin savunma teknolojilerinde olan nanoteknolojinin başta erken uyarı ve teşhis, hızlı ve uzaktan algılama, hafif ve etkin korumalı yapılar gibi konularda yaygın kullanımı olacağı öngörülmektedir. Bütün bu çalışmalar doğrultusunda ülkelerin savunmasını ve güvenliğini sağlayan gelecek nesil askeri personelinin savaş giysileri:

- Nefes alıp verebilen,
- Aşırı soğuk ve aşırı sığağa karşı koruma sağlayabilen,
- Kimyasal savaş ajanlarına, biyolojik savaş unsurlarına karşı koruma sağlayabilen,
- Gerekli koşullarda üstün-performans dayanımı sağlayabilen,
- Savaşçının fiziki durumunu izleyen ve buna bağlı olarak gerekli takviyeleri yapabilen (vitamin, kan şekeri, tansiyon, beslenme, uyarıcı, sakinleştirici gibi)
- Yaralanma durumunda doğrudan müdahil olan tedavi sistemlerini devreye sokan
- Anında iletişim anında veri sağlama ekranları ve bilgi bankalarına bağlanabilen

donanımlara sahip olan "akıllı" teknolojiler haline gelecektir. Tüm bu radikal değişim ve yeniliklerin ana itici gücünün "nanoteknolojiler" olacağı ve buna uygun olarak daha hafif, daha dayanımlı ve daha küçültülmüş etkin ve etkili sistemlerin bu sayede geliştirilebileceği öngörülmektedir. Kısacası, geleceğin savaşçısının donanımı "nanoteknolojik bir donanım" olacaktır. (Altmann 2004)

Bahsedilen savaş giysisi vücuda sıkı sıkıya yapışan farklı katman ve farklı malzemelerden oluşacaktır. Bu katmanlar arasındaki farklı özellik ve nitelikte işlevsel ara-tabakalarla ilaç ve tedavi sistemleri, vücudun gereksinim duyan bölgelerine özel algılayıcıların tespiti ve teşhisi doğrultusunda gönderilebilecek ve bu bölgeler yine koşullara uygun olarak bu katmanlarca ısıtılabilir ve soğutulabilir, darbe veya çarpma anında sertleşme özelliği gösterebilecektir. Bu özelliklere sahip olan yeni nesil savaş giysileri aynı zamanda son derece esnek ve hafif olma özellikleriyle de kullanıcı personele hareket serbestliği sağlayacaktır.

Savunma sektöründe kullanılacak nano giysilerin üretimi, nanoteknolojinin tekstil sektöründeki gelişime paralel olarak yürüyeceği apaçıktır. Buradan tekstil sektöründeki nanoteknolojiyi özet biçimde irdeleyecek olursak en başta; tekstil sektörünün nanoteknolojideki gelişmelerden en çok pay alacak sektörlerin başında geldiğini söylemek mümkündür. Günümüzde askeri alanda ve savunma sektöründe kullanılan teknolojiler artık sivil alanda da kullanılmakta ve toplumların sosyal hayatında hızlı bir şekilde yerini almaktadır. Tıpkı savunma sektöründe kullanılacak olan ve nanoteknolojiyle üretilecek olan giysilerin sahip olduğu özelliklere benzer olarak sivil toplumun kullanacağı giysilerde veya diğer tekstil ürünlerinde nanoteknoloji yardımıyla kendi kendinin temizleyebilen daha az kırılgan ve daha az tamir& bakım ihtiyacı duyan, gerekli sensör entegrasyonunun sağlanmasıyla sağlıklı bilgi akışı, güçlü koruma, algılama ve sağlık hizmetleri verebilen ürünler üretilebilecektir. Bu alanda kil, metal oksit ve siyah karbondan oluşan nanoparçacıklar, grafen nanofiberler ve karbon nanotüpler gibi nano ölçekli astarlar, kumaşların mekanik dirençlerini artırmak, iletkenlik ve anti-statik davranışlar gibi fiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır.

#### **2.6.7. İnşaat ve ulaşım sektörü:**

Nanoparçacıkların ve nanokompozit yapıların inşaat sektöründe etkin olarak kullanılmasıyla akıllı malzemelerin üretilme imkânı doğacaktır. Önemli miktarlarda ekonomik getirisi olmasından dolayı inşaat sektöründe faaliyet gösteren birçok firma bu malzemelerin üretimi için gerekli AR-GE, bütçe çalışmaları ve planlamaları yapmakta, faaliyet alanlarını bu tarafa doğru geliştirmektedir. Nanoteknoloji kullanılarak üretilen boya maddeleri ve türevleri, yüzey kaplayıcıları ve temizleyicileri inşaat sektöründe yeniliklerin ve rekabetin öncüsü olacaktır. Aynı zamanda karbon nanoyapıların; çelik, betonarme, kompozit vb. makro yapılarda kullanılan yapı malzemelerinde daha etkin bir konuma gelmesiyle birlikte çok daha sabit, hareketli, deprem vb. yüklere karşı dayanıklı yapılar optimum seviyede son derece küçük kesit alanlarına sahip taşıyıcı mekanizmalarla, ekonomik, işlevsel ve uzun ömürlü şekilde tasarlanabilecektir.

Ulaşım sektöründe özellikle bu sektörün ana taşıyıcı elemanları olan otomobil, kamyon, otobüs, tır, tren, uçak vb. taşıma araçlarında kullanılacak olan nanoteknoloji ürünü malzemelerle daha güvenli ve konforlu yolculuklar yapılırken aynı zamanda doğal çevre daha az tahrip olacaktır. Ayrıca karbonnanotüplerin kullanılmasıyla birlikte araçlar günümüzdekilere oranla ihmal edilemez boyutlarda hafifleyeceğinden araç daha az yakıtla ihtiyaç duyacak, aynı zamanda bu yakıtların alternatif enerji kaynaklarından (yakıt pilleri, hidrojen depolanması) sağlanmasıyla da yolculuklar çok daha ekonomik hale gelecektir. Yine hafifleyen bu araçların fren sistemlerine gelecek olan yük

azalacağından ve bu sistemlerde kullanılacak olan malzemelerin nanoteknoloji aracıyla üretilmesiyle birlikte çok daha gelişmiş ve güçlü fren sistemi oluşturulabileceğinden yolculukların daha güvenli olacağı öngörülmektedir. Araç kaplamaları diğer sektörlerdeki ürünlere benzer olan kendi kendini temizleme yeteneğine sahip olabilecektir. Ayrıca araç üzerine yerleştirilecek nanosensörler ile araç kontrol sistemleri ve bakım döngüsü rahatlıkla yönetilebilecektir.

İnşaat ve ulaşım sektörlerinin ortak paydası olan yol inşaatlarının önemli bir alt konusu olan üstyapı inşaatında nanoteknolojinin kullanılmasıyla malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi, görüntüleme, modelleme, test etme, üretim ve dizayn alanında asfalt üstyapı teknolojilerinde büyük gelişim potansiyeli sağlayacağı düşünülmektedir. Özellikle, asfalt üstyapı analizinde çalışılan alanların, agregalar arasındaki bağların, katmanlar arasındaki bağların, mastik özelliklerinin, binderin kendini onarma ve yenilemesi, yaşlanma (oksidasyon) etkileri ve tekerlek özelliklerinde yüzeydeki gelişmeleri de içermesi gerekmektedir. Nanoteknoloji karakterizasyon süreci agrega ve binder arasındaki ara yüzey özelliklerinin modellenmesi ve gelişmiş algının artmasına öncülük etmektedir (Saltan vd. 2013).

### **2.6.8. Bilim ve eğitim**

Nanobilim ve nanoteknoloji fizik kimya biyoloji gibi temel bilimlerle malzeme, elektronik, kimya makine bilgisayar mühendisliği gibi uygulamalı bilimlerin ortak ilgi alanına girdiğinden dolayı nanoteknoloji disiplinleri arası işbirliği yapılarak sonuç alınabileceği bir sahadır. Eğitim programlarında da bu gelişmeye uygun olarak yeni düzenlemeler yapılması gerekir. Birçok gelişmiş ülkede bu alandaki gelişmeler dikkate alınarak yeni programlar açılmaktadır. Türkiye de bu yönde gelişmelerin başarmış olması sevindiricidir (Erkoç 2014).

## **2.7 Yüksek Mertebeden Elastisite Teorileri**

Elastisite, dış kuvvetlerin etkisi altındaki bir elastik katıdaki gerilme, şekil değiştirme ve deplasman dağılımının belirlenmesiyle uğraşan sürekli ortamlar mekaniği dalıdır. Burada, doğrusal küçük deformasyon teorisindeki genel varsayımlarla pek çok mühendislik ve bilim dalındaki uygulamalarda karşılaşılan birçok problemin çözümü için matematiksel model kurulur (Akgöz 2010). Matematik modellemeyle oluşturulan formüllerin çözümü ve sonuçların irdelenmesi için fourier yöntemleri, varyasyonel hesaplama, integral dönüşümleri, kompleks değişkenler, sonlu farklar, sonlu elemanlar vb. çözüm teknikleri kullanılır. Elastisite teorileri inşaat, makine, jeoloji, havacılık ve uzay vb. birçok mühendislik alanında karşılaşılan çubuk, kiriş, plak ve kabuk elemanlardan oluşmuş yapıların gerilme, şekil değiştirme, ısıl gerilme, çatlak ve yorulma problemlerinin analizlerinin yapılmasında önemli rol oynamaktadır.

Klasik (makro) elastisite teorilerinin yeterli olmadığı, boyut etkisinin önemli olduğu nanotüp, nanoplak, mikrotüpçük, mikro elektrik devre elemanları, AKM gibi nano ve mikro ölçekli yapılarda iç malzeme uzunluğu boyut parametresi olmaksızın, klasik kiriş modelleriyle bu mikro yapıya bağlı boyut etkisi yorumlanamamış ve bu nedenle ek malzeme boyut parametresi içeren yüksek mertebeden elastisite teorilerine

ihtiyaç duyulmuştur (Hung ve Senturia 1999, Moser ve Gijs 2007). Bu teoriler literatüre giriş sırasıyla:

- Cosserat (Mikropolar) Elastisite Teorisi
- Gerilme Çifti Elastisite Teorisi
- Lokal Olmayan Elastisite Teorisi
- Yüzey Enerjili Basit Şekil Değişirme Değişimi Elastisite Teorisi
- Değiştirilmiş Gerilme Çifti Elastisite Teorisi
- Değiştirilmiş Şekil Değişirme Değişimi Elastisite Teorileri

olarak sıralayabiliriz.

Bu tez kapsamında problemin çözümü için matematik modelleme "Lokal Olmayan" elastisite teorisi ve modelleme için oluşturulan diferansiyel denklemlerin integral dönüşümleri "Ayrık Tekil Konvolüsyon" yöntemi yardımıyla oluşturulmuştur.

### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1. Ayrık Tekil Konvolüsyon (ATK) Yöntemi

Ayrık tekil konvolüsyon (ATK) yöntemi ilk olarak Wei (1999) tarafından ortaya atılmıştır. Wei'nin de belirttiği gibi (Wei 2001) çeşitli fen bilimleri ve mühendislik problemlerinde görülen tekil konvolüsyonlar (TK), Hilbert, Abel ve Radon dönüşümleri gibi, matematik dönüşümlerinin özel bir sınıfını oluşturur. Gerçektende çoğu pratik uygulamada bu dönüşümlerin kullanılması gerekir. Mesela son bir kaç yılda gelişme gösteren matematiğin yeni dalı Wavelet (dalgacık) bu yöntemin esasını teşkil eder (Wei 2002).

Wei ve arkadaşları ayrık tekil konvolüsyon algoritmasını ilk olarak katı ve akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde uyguladı (Wei 2001, Zhao 2002). ATK algoritmasını kullanarak yüksek frekanslı titreşime sahip plakları ve düzensiz iç destekli plak titreşimlerini analiz etti. Yakın zamanda, ayrık tekil konvolüsyon algoritmasının ve diferansiyel quadrature yönteminin dikdörtgen plakların titreşim hesabında karşılaştırılması Ng ve diğerleri tarafından (Ng vd 2004), tabakalı konik kabukların ve elastik temel üzerindeki plakların serbest titreşimlerinin sayısal çözümleri ise Civalek (2006) tarafından sunulmuştur. Bu çalışmalar ATK algoritmasının özellikle dikdörtgen plakların yüksek frekanslı titreşimleri olmak üzere plakların titreşim analizinde son derece işe yaradığını açıkça belirtmektedir. Bundan başka, ATK algoritmasının mekanikte uygulanan türevsel eşitliklerin çözümünde esneklik sağlayan evrensel yöntemlere sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Yakın zamanda, ATK-Ritz yöntemiyle Mindlin plaklar ve kalın basık kabukların serbest titreşim analizi Hou ve diğerleri (2005) ve Lim ve diğerleri (2005) tarafından sunulmuştur.

Diğer sayısal yöntemlerde olduğu gibi ayrık tekil konvolüsyon yöntemi (ATK) de mevcut bir türev denklemi yani sürekli bir sisteme ait denklemi yaklaşım veya test fonksiyonu olarak kerneller kullanarak ayırıştırır. Kernel olarak Shannon kernel, Shannon delta kernel, Dirichlet kernel, de la Vallee kernel vb. kullanılır. Eşitlikteki  $T$  ve  $\eta(t)$  test fonksiyonundaki elaman değerleridir.

Tekil konvolüsyon,

$$F(t) = (T * \eta)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} T(t-x)\eta(x)dx, \quad (3.1)$$

olarak ifade edilebilir (Wei 2001).  $T(t-x)$  tekil kernel olarak ifade edilir.

Örneğin tekil kernel delta şeklinde:

$$T(x) = \delta^{(n)}(x); \quad (n=0,1,2,\dots). \quad (3.2)$$

Belirtilen "Ayrık Kernel" delta tipinde verilmiştir. Kernel  $T(x) = \delta(x)$  eşitliği yüzeysel ve eğrisel interpolasyon için önemlidir.  $T(x) = \delta^{(n)}(x)$  eşitliği  $n>1$  için

türevsel eşitliklerin sayısal çözümünde gereklidir. Kararınca pürüzsüz bir yaklaşımla, ayrık tekil konvolüsyon yönteminin dikkate alınması son derece etkili olur (Wei 2001).

$$F_{\alpha}(t) = \sum_k T_{\alpha}(t - x_k) f(x_k), \quad (3.3)$$

$F_{\alpha}(t)$ 'nin  $F(t)$  ve  $\{x_k\}$ 'ye benzeştiği yer ATK'nın iyi tanımlandığı ayrık noktalar dizisidir. Burada orjinal test fonksiyonu  $\eta(x)$ ,  $f(x)$  olarak tanımlanmıştır. Bu yeni ayrık sentezin bilgisayarla gerçekleştirilmesi mümkündür. Matematiksel özellik veya  $f(x)$  gereksinimi benzer kernel  $T_{\alpha}$  tarafından belirlenir. Yakın geçmişte, bazı yeni kernellerin ve delta düzenleyicileri gibi bir takım düzenleyicilerin kullanımı mekanik ve uygulamalı matematik problemlerinin çözümünde önerilmiştir. Araştırmacılar bu zamana kadar genellikle Düzenleyici Delta Shannon Kernel'i kullanmışlardır. Buna göre Shannon Kerneli (Wei 2002):

$$\delta_{\Delta,\sigma}(x - x_k) = \frac{\sin[(\pi/\Delta)(x - x_k)]}{(\pi/\Delta)(x - x_k)} \exp\left[-\frac{(x - x_k)^2}{2\sigma^2}\right]; \sigma > 0. \quad (3.4)$$

şeklinde düzenlenmiştir (Wei 2001). Burada  $\Delta = \pi/(N-1)$  her bir düğüm arası aralık ve  $N$  düğüm nokta sayısı olarak verilmiştir. Burada  $\sigma$  parametresi Gauss zarfı genişliği olarak bilinir ve  $\sigma = rh$  ile hesaplanır. Burada  $r$  hesaplamamanın başında seçilecek bir parametredir. Gauss düzenleyicisinin kullanılmasından dolayı kesme hatasının oldukça küçük olduğu bilinmektedir. Denklem (3.4)'te verilen formül pratik ve rakamsal interpolasyon için pekiştirici ve destek özelliğe sahiptir.

Denklem (3.4) tekil konvolüsyon kernellerinin ayrık yaklaşımlar sağlaması için kullanılabilir (Zhao 2005). Örneğin bir fonksiyon için herhangi bir mertebeden türev aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$f^{(n)}(x) \approx \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta}(x - x_k) f(x_k), \quad (3.5)$$

“ $\delta_{\Delta}(x - x_k) = \Delta \delta_{\alpha}(x - x_k)$ ” olarak belirtilmiştir.

(n) türevin mertebesini göstermektedir.  $(2M+1) \times$  çevresinde konumlanan ve genellikle toplam değerinden daha küçük toplam hesap genişliğidir. ATK yönteminde herhangi bir  $f(x)$  fonksiyonunun  $x_i$  noktası için  $x$  koordinat yönündeki türevi aşağıdaki toplam ile verilir.

$$\left. \frac{d^n f(x)}{d x^n} \right|_{x=x_i} = f^{(n)}(x) \approx \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta,\sigma}^{(n)}(x_i - x_k) f(x_k); \quad (n=0,1,2,\dots). \quad (3.6)$$

Denklemden "n" x değişkenine göre n. mertebeden türev olarak tanımlanır. " $x_k$ " x noktası civarında konumlanmış, ayrık örnekleme noktaları dizisidir. " $\sigma$ " düzenleyici parametre, " $\Delta$ " düğüm noktaları mesafesidir ve  $2M+1$  genellikle hesaplanan çalışma alanından daha küçük boyutta hesaplanan bant genişliğidir (Wei 2001).

Örneğin ATK kernellerinin " $x=x_i$ " deki ikinci mertebeden türevi aşağıdaki gibidir (Zhao, Wei ve Xiang 2002) :

$$\delta_{\Delta\sigma}^{(2)}(x-x_j) = \frac{d^2}{dx^2} \left[ \delta_{\Delta\sigma}(x-x_j) \right] \Big|_{x=x_i}, \quad (3.7)$$

Ayrık formda denklem (3.7) deki bu türev,

$$f^{(2)}(x) = \frac{d^2 f}{dx^2} \Big|_{x=x_i} \approx \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta\sigma}^{(2)}(k\Delta x_N) f_{i+k,j}. \quad (3.8)$$

olarak formüle edilebilir.

ATK kernellerinin " $x \neq x_k$ " deki ikinci mertebeden türevi de, aşağıdaki örnekteki gibi verilebilir (Zhao ve Wei 2002):

$$\begin{aligned} \delta_{\sigma,\Delta}^{(2)}(x-x_k) = & -\frac{(\pi/\Delta)\sin(\pi/\Delta)(x-x_k)}{(x-x_k)} \exp[-(x-x_k)^2/2\sigma^2] \\ & -2\frac{\cos(\pi/\Delta)(x-x_k)}{(x-x_k)^2} \exp[-(x-x_k)^2/2\sigma^2] \\ & -2\frac{\cos(\pi/\Delta)(x-x_k)}{\sigma^2} \exp[-(x-x_k)^2/2\sigma^2] \\ & +2\frac{\sin(\pi/\Delta)(x-x_k)}{\pi(x-x_k)^3/\Delta} \exp[-(x-x_k)^2/2\sigma^2] \\ & +\frac{\sin(\pi/\Delta)(x-x_k)}{\pi(x-x_k)\sigma^2/\Delta} \exp[-(x-x_k)^2/2\sigma^2] \\ & +\frac{\sin(\pi/\Delta)(x-x_k)}{\pi\sigma^4/\Delta} (x-x_k) \exp[-(x-x_k)^2/2\sigma^2] \end{aligned} \quad (3.9)$$

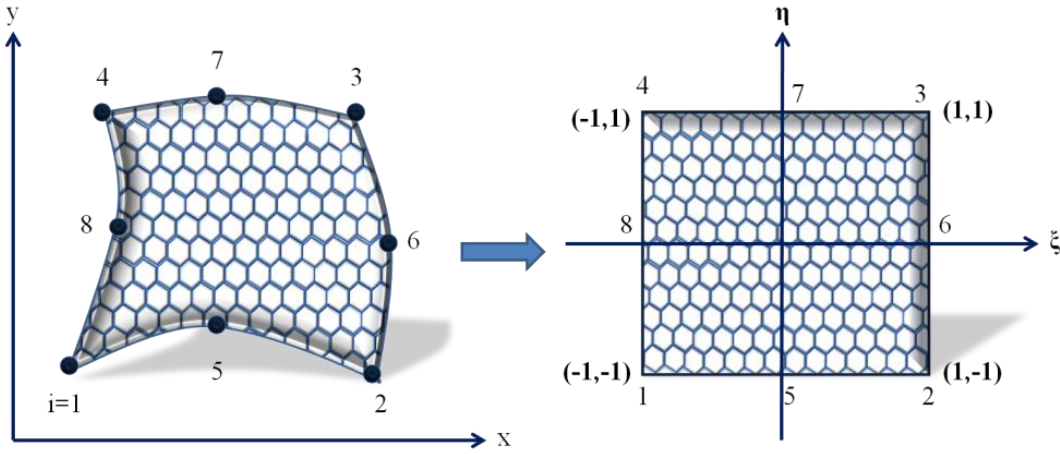
"  $x = x_k$  " için bu türev,

$$\delta_{\sigma, \Delta}^{(2)}(0) = -\frac{3 + (\pi^2 / \Delta^2) \sigma^2}{3\sigma^2} = -\frac{1}{\sigma^2} - \frac{\pi^2}{3\Delta^2} \quad (3.10)$$

olarak verilmiştir (Civalek 2007).

### 3.1.1. Geometrik dönüşüm için temel fonksiyonlar

Şekil 3.1'de görülen sekiz düğüm noktalı eğrisel yüzey elamanı, sektör plak dönüşümü için dikkate alalım:



Şekil 3.1. Sekiz Düğüm Noktasına Sahip Bir Geometrik Dönüşüm

İlgili koordinat dönüşümleri için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır (Han ve Liew 1997) :

$$x = \sum_{i=1}^N x_i \Phi_i(\xi, \eta) \quad \text{ve} \quad y = \sum_{i=1}^N y_i \Phi_i(\xi, \eta) \quad (3.11, 3.12)$$

Bu denklemde  $x_i$  ve  $y_i$  değerleri  $i$ . düğümün koordinatları,  $N$  düğüm nokta sayısı, ve  $\Phi_i(\xi, \eta)$ ;  $i=1,2,3,\dots,N$  değerleri şekil fonksiyonlarıdır. Her iki koordinat için dönüşüm formülleri,

$$x = \sum_{i=1}^8 \Psi_i(\xi, \eta) x_i \quad (3.13a)$$

$$y = \sum_{i=1}^8 \Psi_i(\xi, \eta) y_i \quad (3.13b)$$

Zincir kuralı kullanılarak birinci ve ikinci dereceden türev fonksiyonları,



$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = [J_{11}]^{-1} \begin{Bmatrix} u_\xi \\ u_\eta \end{Bmatrix} \quad (3.14a)$$

$$\begin{Bmatrix} u_{xx} \\ u_{yy} \\ 2u_{xy} \end{Bmatrix} = [J_{22}]^{-1} \begin{Bmatrix} u_{\xi\xi} \\ u_{\eta\eta} \\ u_{\xi\eta} \end{Bmatrix} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \begin{Bmatrix} u_\xi \\ u_\eta \end{Bmatrix} \quad (3.14b)$$

olarak verilmiştir. Burada  $\xi_i$  ve  $\eta_i$  i. ci düğümün  $\xi$ - $\eta$  düzlemindeki değerleri ve  $J_{ij}$  Jacobian matristir. N düğüm nokta sayısı ve  $\Phi_i(\xi, \eta)$ ;  $i=1,2,3,\dots,N$  değerleri şekil fonksiyonlarıdır. Bu değerler literatürde tanımlanmıştır (Liew 1997). Bu matris elemanları şu şekilde ifade edilmiştir;

$$[J_{11}] = \begin{bmatrix} x_\xi & y_\xi \\ x_\eta & y_\eta \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

$$[J_{21}] = \begin{bmatrix} x_{\xi\xi} & y_{\xi\xi} \\ x_{\eta\eta} & y_{\eta\eta} \\ x_{\xi\eta} & y_{\xi\eta} \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

$$[J_{22}] = \begin{bmatrix} x_\xi^2 & y_\xi^2 & x_\xi y_\xi \\ x_\eta^2 & y_\eta^2 & x_\eta y_\eta \\ x_\xi x_\eta & y_\xi y_\eta & \frac{1}{2}(x_\xi y_\eta + x_\eta y_\xi) \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Yukarıdaki dönüşümler, temel yönetici diferansiyel eşitlikleri ve x-y fiziksel değerinden  $\xi$ - $\eta$  hesap değerine doğru ilgili sınır koşulları dönüştürmek için daha sonra kullanılacaktır. Böylece rastgele bir sekizgen levha, farklı sayısal uygulamalardaki doğal koordinatlar cinsinden tanımlanmış bir kare plakaya eşlenerek ifade edilebilmektedir (Civalek 2010). Her bir düğüm noktası için şekil fonksiyonları aşağıdaki gibidir:

$$\Psi_i(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(\xi\xi_i + \eta\eta_i - 1) \quad (i=1,3,5,7 \text{ için}) \quad (3.18)$$

$$\Psi_i(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta\eta_i) \quad (i=2,6 \text{ için}) \quad (3.19)$$

$$\Psi_i(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi\xi_i)(1 - \eta^2) \quad (i=4,8 \text{ için}) \quad (3.20)$$

### 3.2. Lokal Olmayan Elastisite Teorisi (LOET)

Atomik yapı boyutunun önemli olduğu mikro ve nano yapılarda daha yaygın kullanılan Lokal Olmayan Elastisite Teorisi (LOET) sürekli ortamlar mekaniğinin güncel ve etkin bir dalıdır. LOET, zamanla süregelen bilimsel ve teknolojik gelişmelerle birlikte, klasik elastisite teorisinden istenilen sonuçların alınamaması nedeniyle nano boyut mertebesinde karşılan problemlerin çözümü için A.C. Eringen (1983) tarafından bulunan ve geliştirilen bir yöntemdir.

Klasik Elastisite Teorisinde sadece lokal etkiler göz önüne alınır. Bu teoriye göre nano boyuttaki maddenin herhangi bir noktasında oluşan gerilme hali, aynı noktada meydana gelen şekil değiştirme ile ilgilidir. Hesaplar, bu nokta çevresindeki gerilmeler ve şekil değiştirmeler ya da başka bir ifadeyle iç uzunluk ölçüsü parametreleri dikkate alınmadan yapılır. Bununla beraber klasik (makroskopik) bünye denklemleri ile gerilme bileşenleri arasında cebirsel bir ilişki vardır. Ancak bu teori makro ölçekli yapılar için geçerlidir. Dolayısıyla atomik teori ile deneysel gözlem içermez ve şekil değiştirmelere bağlı olarak oluşan iç gerilmelerin hesaba katılması gerektiği durumlarda yetersiz kalır. Temel denklemlerin boyut etkisini tanımlaması amacıyla, malzeme uzunluğu ölçü parametreleri hesaba katılmalıdır. Şimdiye kadar bu nano ölçekli yapıların modellenmesi ve analizi için; atomistik modelleme yöntemi, atomistik-sürekli birleşik yöntem ve sürekli modelleme yöntemi olmak üzere çözüm için üç farklı yaklaşım kullanılmıştır. Ancak bu yöntemler çözüm için oldukça pahalıdır. Bu durumu ortadan kaldırmak adına kullanılan en etkin yöntem Lokal Olmayan Elastisite Teorisi'nin kullanılmasıyla çözüme gidilmesidir.

Lokal Olmayan Elastisite Teorisi (LOET), mikro ve nano ölçekli yapıların modellenmesi için yaygın olarak kullanılan üst düzey bir teoridir (Reddy ve Pang 2008). LOET, bir noktadaki gerilmeyi hesaplarırken sadece o noktadaki şekil değiştirmelerin bilinmesinin yeterli olmadığına, aynı zamanda diğer tüm noktaların şekil değişikliğinin bir fonksiyona bağlı olarak hesaba katılması gerektiğine dayanır (Demir 2012). Formülasyon bazında ele alacak olursak, problemin çözüm aşamasında lokal etkilerin dışındaki etkiler de göz önünde bulundurulacağından çözüm aralığı klasik elastisite teorisine göre daha genişler ve farklı bünye denklemleri kullanılarak çözüme gidilir. Boyut etkisinin önemli olduğu mikro ve nano ölçekli yapılarda (karbonnanotüp, biyolojik virüslerin ve kanser hücrelerinin matematik modellenmesi, mikrotüpçükler, mikro-elektro aygıtlar, mikro devreler gibi) özellikle Eringen tarafından önerilen lokal olmayan elastisite yaygın olarak kullanılmaktadır (Civalek ve Akgöz 2011).

Klasik (makro) elastisite teorilerinin yeterli olmadığı, boyut etkisinin önemli olduğu nanotüp, nanoplak, mikrotüpçük, mikroelektrik devre elemanları AKM gibi nano ve mikro ölçekli yapılarda iç malzeme uzunluğu boyut parametresi olmaksızın klasik giriş modelleriyle bu mikro yapıya bağlı boyut etkisi yorumlanamamış ve bu nedenle ek malzeme boyut parametresi içeren yüksek mertebeden elastisite teorilerine ihtiyaç duyulmuştur (Akgöz 2012). A.C. Eringen tarafından önerilen iki ek malzeme sabiti içeren Lokal Olmayan Elastisite Teorisi, mikro ve nano boyuttaki yapıların analizinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.

Özetle atomik yapının bünyesinden meydana gelen gerilmeler ihmal edilebilecek durumdaysa çözüm için klasik elastisite teorisi kullanılırken, gerilmelerin ihmal edilemeyecek kadar büyük olması durumu ve lokal şartların dışındaki şartlarında dikkate alınması gerektiği durumlar için lokal olmayan elastisite teorisi kullanılır.

Homojen ve izotrop elastik bir katının lokal olmayan Cauchy hareket denklemi,

$$\sigma_{kl,l} + \rho(f_l - \frac{\partial^2 u_l}{\partial t^2}) = 0, \quad (3.21)$$

Bünye denklemi,

$$\sigma_{kl}(x) = \int_V \alpha(|x - x'|, \chi) \tau_{kl}(x') dV(x'), \quad (3.22)$$

şeklindedir. Burada  $\sigma_{kl}$  lokal olmayan gerilme tansörünü,  $\rho$  kütle yoğunluğunu,  $f_l$  kütle kuvveti yoğunluğunu ve/veya uygulanan kuvveti,  $u_l$  kütle her hangi bir “a” referans noktasına göre yer değiştirme vektörünü,  $V$  elastik cismin kapladığı hacmi,  $t$  zamanı,  $\varepsilon_{kl}$  şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.

$$\tau_{kl}(x') = \lambda \varepsilon_{mm}(x') \delta_{kl} + 2\mu \varepsilon_{kl}(x'), \quad (3.23)$$

$$\varepsilon_{kl}(x') = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_k(x')}{\partial x'_l} + \frac{\partial u_l(x')}{\partial x'_k} \right), \quad (3.24)$$

şeklinde olduğu bilinmektedir.

$\tau_{kl}(x')$  klasik (Cauchy) veya kütle her hangi bir  $x$  noktasındaki lokal gerilme tansörünü,  $\varepsilon_{kl}(x')$  cismin  $x'$  noktasındaki lineer şekil değiştirme,  $t$  belirtilen zamanı,  $V$  mevcut elastik yapının kapladığı hacmi belirtir.  $\varepsilon_{klmn}$ ,  $(x - x')$  vektörünün bir fonksiyonu olmak üzere eşitlikten görülebileceği gibi  $x$  noktasındaki gerilme  $x'$  noktasındaki şekil değiştirmeye de bağlıdır.,  $\alpha|x - x'|$  öklidyen formda uzaklık  $\lambda$  ve  $\mu$  ise Lamé sabitleridir. Lokal olmayan kernel  $\alpha|x - x'|$  ise elastik cismin  $x$  noktasındaki gerilme değerinin  $x'$  noktasındaki şekil değiştirme etkisini tanımlar. Yine denklemlerdeki  $\chi$ ,  $(e_0 a/l)$  oranına bağlı bir malzeme sabitidir. Buradaki  $a$  değeri malzemenin iç (granüler mesafe, latik parametre C-C karbon molekülleri çapları arasındaki uzaklık) ve dış karakteristik uzunluğudur (kırılma veya dalga uzunluğu) ve  $e_0$  ise her bir malzeme için deneysel olarak belirlenmiş ve önerilmiş olan katsayıdır. Eğer,  $\alpha|x|$  green fonksiyonundaki lineer diferansiyel operatöründeki yerini alırsa;

$$\hbar\alpha(|x' - x|) = \delta(|x' - x|) \quad (3.25)$$

haline dönüşür (Eringen 1983). Denklem (3.22)' de verilen lokal olmayan bünye ilişkisi,

$$\hbar\sigma_{kl} = \tau_{kl} \quad (3.26)$$

denklemine indirgenir. Ayrıca (3.21) denkleminde verilen kısmi diferansiyel denklem,

$$\tau_{kl,l} + \hbar(f_l - \rho\ddot{u}_k) = 0 \quad (3.27)$$

haline dönüşür. A.C. Eringen (1983) bu diferansiyel bağıntı için,

$$\hbar = 1 - (e_0 a)^2 \nabla^2 = 0 \quad (3.28)$$

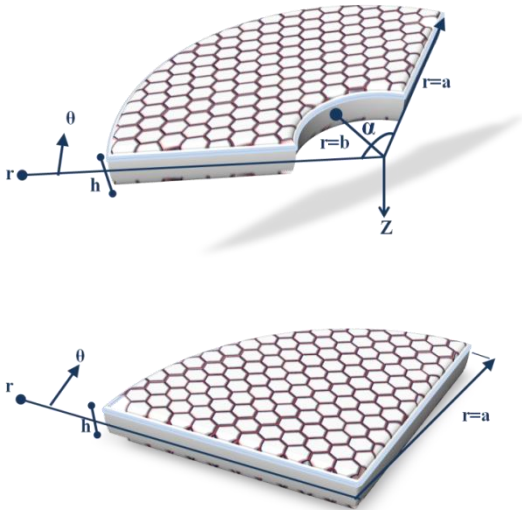
denklemleriyle ifade edilen lokal olmayan bir yöntem önermiştir. Burada  $\nabla^2$ , Laplace Operatörü olarak ifade edilir. Böylece bünye denklemi,

$$\left[1 - (e_0 a)^2 \nabla^2\right] \sigma_{kl} = \tau_{kl} \quad (3.29)$$

olarak yazılır.

### 3.2.1. Plak titreşimi

Klasik plak teorisi kullanılarak, sektör plak (Şekil 3.2) temel denklemleri için deplasman fonksiyonları,



Şekil 3.2. Nano ölçekli boşluklu sektör ve sektör plak

$$\bar{u}(x, y, z, t) = u(x, y, t) - z \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3.30)$$

$$\bar{v}(x, y, z, t) = v(x, y, t) - z \frac{\partial w}{\partial y} \quad (3.31)$$

$$\bar{w}(x, y, z, t) = w(x, y, t) \quad (3.32)$$

olarak verilmiştir. Burada  $u, v$  ve  $w$  plağın orta yüzeyindeki deplasman fonksiyonlarıdır. Şekil değiştirme bileşenleri ise,

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3.33a)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (3.33b)$$

$$\varepsilon_z = 0 \quad (3.33c)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) - z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (3.34a)$$

$$\varepsilon_{xz} = 0 \quad (3.34b)$$

$$\varepsilon_{yz} = 0 \quad (3.34c)$$

Denklem (3.29) kullanılarak, lokal olmayan ana denklemler içindeki gerilme bağıntısı ve kuvvet bileşenleri,

$$\left[ 1 - (e_0 a)^2 \nabla^2 \right] \sigma^{nl}_{kl} = \sigma_{kl} \quad (3.35a)$$

$$\left[ 1 - (e_0 a)^2 \nabla^2 \right] N^{nl}_{kl} = N_{kl} \quad (3.35b)$$

$$\left[ 1 - (e_0 a)^2 \nabla^2 \right] M^{nl}_{kl} = M_{kl} \quad (3.35c)$$

olarak yazılır. Bu denklemler kullanılarak normal ve kayma gerilme bileşenleri,

$$\sigma_{xx} - (e_0 a)^2 \left[ \frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{xx}}{\partial y^2} \right] = \frac{E}{1 - \nu^2} \varepsilon_{xx} + \nu \frac{E}{1 - \nu^2} \varepsilon_{yy} \quad (3.36a)$$

$$\sigma_{yy} - (e_0 a)^2 \left[ \frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{yy}}{\partial y^2} \right] = \nu \frac{E}{1 - \nu^2} \varepsilon_{xx} + \frac{E}{1 - \nu^2} \varepsilon_{yy} \quad (3.36b)$$

$$\tau_{xy} - (e_0 a)^2 \left[ \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial y^2} \right] = 2G \varepsilon_{xy} \quad (3.37)$$

olarak ifade edilir. Plâğın normal kuvvet ve moment bileşenleri ise,

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \quad (3.38a)$$

$$N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \quad (3.38b)$$

$$N_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz \quad (3.38c)$$

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz \quad (3.39a)$$

$$M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz \quad (3.39b)$$

$$M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz \quad (3.39c)$$

şeklinde verilir. Virtüel iş prensibi üzerinden plak hareket denklemi her üç deplasman doğrultusunda:

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = \rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.40a)$$

$$\frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} = \rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.40b)$$

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + q(x) = \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (3.41)$$

Denklem (3.35-3.37) ve (3.38-3.39) kullanılarak lokal olmayan kuvvet bileşenleri,

$$N_x - (e_0 a)^2 \left[ \frac{\partial^2 N_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_x}{\partial y^2} \right] = \frac{Eh}{(1-\nu^2)} \frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{Eh}{(1-\nu^2)} \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.42a)$$

$$N_y - (e_0 a)^2 \left[ \frac{\partial^2 N_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_y}{\partial y^2} \right] = \nu \frac{Eh}{(1-\nu^2)} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{Eh}{(1-\nu^2)} \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.42b)$$

$$N_{xy} - (e_0 a)^2 \left[ \frac{\partial^2 N_{xy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_{xy}}{\partial y^2} \right] = Gh \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.43)$$

şeklinde yazılır. Benzer olarak lokal olmayan moment bileşenleri,

$$M_x - (e_0 a)^2 \left[ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_x}{\partial y^2} \right] = -\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (3.44a)$$

$$M_y - (e_0 a)^2 \left[ \frac{\partial^2 M_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} \right] = -\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (3.44b)$$

$$M_{xy} - (e_0 a)^2 \left[ \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial y^2} \right] = -\frac{Eh^3}{12(1+\nu)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (3.45)$$

olarak ifade edilir.

Sonuç olarak (3.44-3.45) ve (3.41) denklemleri kullanılarak lokal olmayan teoriye dayalı ince plak serbest titreşim temel denklemi:

$$D \left[ \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial y^4} \right] + \rho h \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} - (e_0 a)^2 \rho h \left( \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial y^2 \partial t^2} \right) = 0 \quad (3.46)$$

biçiminde elde edilir. Harmonik çözüm için aşağıdaki deplasman formunu dikkate alacak olursak,

$$w(x, y, t) = W(x, y) e^{i\omega t} \quad (3.47)$$

eşitliğinden yola çıkarak (3.47) denklemi, (3.46)'daki temel hareket denklemine dönüştürülerek yazılır ve zaman parametresinden bağımsız denklem,

$$D \left[ \frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial y^4} \right] - \rho h \omega^2 \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} + (e_0 a)^2 \rho h \left( \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3.48)$$

olarak elde edilir. (3.48) denklemi aynı zamanda sıkıştırılmış biçimde,

$$D\nabla^4 W(x, y) - \rho h \omega^2 W''(x, y) + (e_0 a)^2 \rho h \omega^2 [\nabla^2 W(x, y)] = 0 \quad (3.49)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Denklemlerde;  $D$  plak eğilme rijitliği,  $h$  plak kalınlığı,  $\rho$  yoğunluk,  $x$  ve  $y$  kartezyen düzlemde orta nokta koordinatlarını tarif eder. Burada ilgili operatörler;

$$W''(x, y) = \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} \quad (3.50a)$$

ve

$$\nabla^4 () = \frac{\partial^4 ()}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 ()}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 ()}{\partial y^4} \quad (3.50b)$$

şeklinde tanımlanır. Çözüm için Laplace Operatörü yukarıdaki denklemlere dâhil edilecek olursa,

$$\nabla^2 W(x, y) = \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} \quad (3.51)$$

eşitliği elde edilir. Böylece Denklem (3.49) aşağıdaki basit formda yazılır:

$$D[\nabla^2] \nabla^2 W(x, y) - \rho h \omega^2 W''(x, y) + (e_0 a)^2 \rho h \omega^2 [\nabla^2 W(x, y)] = 0 \quad (3.52)$$

Ayrık tekil konvolüsyon çözümü için aşağıdaki yeni operatörler denklemlere dâhil edilirse,

$$\mathfrak{R} = \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} \quad \text{ve} \quad S = \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} \quad (3.53)$$

eşitlikleri elde edilir. Böylece dördüncü mertebeden türevler, ikinci mertebeden türevlere dayandırılarak,

$$\frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^4} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} [\mathfrak{R}] \quad (3.54a)$$

$$\frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial y^4} = \frac{\partial^2}{\partial y^2} [S] \quad (3.54b)$$



$$\frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} \right] = \frac{\partial^2}{\partial x^2} [S] \quad (3.55)$$

şeklinde yazılır.

Koordinat dönüşümü için ilgili denklemler kullanılarak türev operatörleri sırasıyla birinci, ikinci ve dördüncü mertebeden türevler için,

$$\frac{\partial W}{\partial x} = [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \xi} \quad (3.56a)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \eta} \quad (3.56b)$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \xi} \quad (3.56c)$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \eta} \quad (3.56d)$$

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} = \frac{\partial^2 \mathfrak{R}}{\partial x^2} = [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 \mathfrak{R}}{\partial \xi^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial \xi} \quad (3.57a)$$

$$\frac{\partial^4 W}{\partial y^4} = \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} = [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial S}{\partial \eta} \quad (3.57b)$$

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} = \frac{\partial^2 S}{\partial X^2} = [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 S}{\partial \xi^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial S}{\partial \xi} \quad (3.57c)$$

denklemleri olacaktır. Böylece (3.53-3.55) denklemlerindeki diferansiyel operatörler ve (3.52) yönetici denklem kullanılarak hareket denklemi bu operatörler cinsinden,

$$\frac{\partial^2 \mathfrak{R}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} - \rho h \omega^2 \mathfrak{R} + (e_0 a)^2 \omega^2 \rho h [\mathfrak{R} + S] = 0 \quad (3.58)$$

eşitliği biçiminde ifade edilir. Daha kısa biçimde ise,

$$\nabla^2 [W_{\xi\eta}] - \rho h \omega^2 \mathfrak{R} + (e_0 a)^2 \omega^2 \rho h [\mathfrak{R} + S] = 0 \quad (3.59)$$

olarak yazılır.

Koordinat dönüşüm matrisleri kullanılarak (3.59) hareket denklemi:

$$\begin{aligned}
& [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 \mathfrak{R}}{\partial \xi^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial \xi} \\
& + 2 \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial S}{\partial \eta} \right) \\
& + \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial S}{\partial \eta} \right) \\
& - \rho h \omega^2 \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \xi} \right) \\
& + (e_0 a)^2 \rho h \omega^2 \left\{ \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \xi} \right) \right. \\
& \left. + \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \eta} \right) \right\} = 0 \tag{3.60}
\end{aligned}$$

eşitliğine dönüşür.

(3.6) 'dan (3.60)'a kadar ifade edilen eşitliklerdeki ATK'nin türevler için kullanılan ayrıklaştırma formülü gereğince yukarıdaki türev denklemi ayrık formda,

$$\begin{aligned}
& [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(2)}(k \Delta \xi) \mathfrak{R}_{kj} \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(1)}(k \Delta \xi) \mathfrak{R}_{kj} \right] \\
& + 2 \left[ [J_{22}]^{-1} \left( \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(2)}(k \Delta \eta) S_{ik} \right) - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left( \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(1)}(k \Delta \eta) S_{ik} \right) \right] \\
& + \left[ [J_{22}]^{-1} \left( \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(2)}(k \Delta \eta) S_{ik} \right) - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left( \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(1)}(k \Delta \eta) S_{ik} \right) \right] \\
& - \rho h \omega^2 \left\{ [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(2)}(k \Delta \xi) W_{kj} \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(1)}(k \Delta \xi) W_{kj} \right] \right\} \\
& + (e_0 a)^2 \rho h \omega^2 \left\{ \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \xi} \right) \right.
\end{aligned}$$

$$+ \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \eta} \right) \Big\} = 0 \quad (3.61)$$

şeklinde ifade edilir. Yukarıda denklem (3.61) ile verilen denklemi işlemlerde ve hesaplama süresince kısaltmak amacıyla aşağıdaki yeni iki operatör kullanılarak farklı bir formda yazılır. Bu operatörler:

$$\mathfrak{Z}(W_{\xi\eta}) = (k\Delta\xi) \mathfrak{R}_{kj} + 2(k\Delta\eta) \mathfrak{R}_{ik} + (k\Delta\eta) S_{ik} \quad (3.62)$$

$$\mathfrak{X}(W_{\xi\eta}) = (k\Delta\xi) \mathfrak{R}_{kj} + 2(k\Delta\eta) \mathfrak{R}_{ik} + (k\Delta\eta) S_{ik} \quad (3.63)$$

Böylece (3.61) ile verilen ve lokal olmayan teoriye göre nano ya da mikro ölçekli plağın serbest titreşim denklemi daha kısa bir formda;

$$\begin{aligned} & [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta,\sigma}^{(2)} \mathfrak{Z}(W_{\xi\eta}) \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta,\sigma}^{(1)} \mathfrak{X}(W_{\xi\eta}) \right] \\ & - \rho h \omega^2 \left\{ [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta,\sigma}^{(2)} (k\Delta\xi) S_{kj} \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta,\sigma}^{(1)} (k\Delta\xi) S_{kj} \right] \right\} \\ & + (e_0 a)^2 \rho h \omega^2 \left\{ \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \xi} \right) \right. \\ & \left. + \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \eta} \right) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3.64)$$

olur. Denklem (3.52)'de ifade edilen denklemin doğal koordinatlarından ayırık formunu elde etmek için aşağıda verilen operatör kullanılır.

$$\nabla^4 (W_{\xi\eta}) = \nabla^2 \nabla^2 (W_{\xi\eta}) \quad (3.65)$$

Bu haliyle denklem (3.64)'nın ilk kısmı, denklem (3.65) ile tanımlı operatörün yerine geçerse doğal koordinatlarına dönüştürülmüş hareket denklemi ayırık formda,

$$\begin{aligned} & [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta,\sigma}^{(2)} \mathfrak{Z}(\xi, \eta) \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta,\sigma}^{(1)} \mathfrak{X}(\xi, \eta) \right] \Big] W_{ij}(\xi, \eta) \\ & \times [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta,\sigma}^{(2)} \mathfrak{Z}(\xi, \eta) \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta,\sigma}^{(1)} \mathfrak{X}(\xi, \eta) \right] \Big] W_{ij}(\xi, \eta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\rho h \omega^2 \left\{ [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(2)}(k\Delta\xi) S_{kj} \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(1)}(k\Delta\xi) S_{kj} \right] \right\} \\
& + (e_0 a)^2 \rho h \omega^2 \left\{ \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \xi} \right) \right. \\
& \left. + \left( [J_{22}]^{-1} \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \frac{\partial W}{\partial \eta} \right) \right\} W_{ij}(\xi, \eta) = 0 \quad (3.66)
\end{aligned}$$

eşitliği biçiminde ifade edilir.

### 3.2.2. Sınır koşulları

Bu doktora tezi çalışmasında; nano ölçekli sektör ve boşluklu sektör plak kenarları için iki farklı sınır koşullu kombinasyonları dikkate alınacaktır. Bunlar basit mesnet (S) ve ankastre mesnet (C) durumlarıdır. Evrensel literatürle uyum sağlamak için sınır koşullarına ait kısaltmalarda S ve C harfleri kullanılmıştır. Bu sınır koşullarına ait denklemler:

i) Basit mesnet (S),

$$W = 0, \quad -D \left( \frac{\partial^2 W}{\partial n^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial s^2} \right) = 0. \quad (3.67)$$

ii) Ankastre mesnet(C),

$$W = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial n} = 0. \quad (3.68)$$

olarak belirtilmiştir. Burada n ve s plağın normal ve teğetsel doğrultularını ifade eder. Dönüşüm denklemleri sınır koşullarına da uygulanırsa, ATK formatında sınır koşullarına ait denklemler (örneğin basit mesnet için):

$$W_{ij} = 0 \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned}
& - \left( \delta_{\sigma, \Delta}^{(2)}(\xi_i - \xi_0) + \sum_{j=0}^J (1 - a_j) \delta_{\sigma, \Delta}^{(2)}(\xi_i - \xi_j) \right) W(\xi_0) \\
& - \sum_{j=0}^J (1 + a_j) \delta_{\sigma, \Delta}^{(2)}(\xi_i - \xi_j) W(\xi_j)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -[J_{22}]^{-1}[J_{21}][J_{11}]^{-1} \left( \delta_{\Delta,\sigma}^{(1)}(\xi_i - \xi_0) + \sum_{j=0}^J (1-a_i) \delta_{\Delta,\sigma}^{(1)}(\xi_i - \xi_j) \right) W(\xi_0) \\
& - \sum_{j=0}^J (1-a_i) \delta_{\Delta,\sigma}^{(1)}(\xi_i - \xi_j) W(\xi_i) \\
& - v \left\{ \left( \delta_{\sigma,\Delta}^{(2)}(\eta_i - \eta_0) + \sum_{j=0}^J (1-a_i) \delta_{\sigma,\Delta}^{(2)}(\eta_i - \eta_j) \right) W(\eta_0) \right. \\
& \left. - \sum_{j=0}^J (1+a_i) \delta_{\sigma,\Delta}^{(2)}(\eta_i - \eta_j) W(\eta_i) \right\} \\
& - v [J_{22}]^{-1} [J_{21}][J_{11}]^{-1} \left( \delta_{\Delta,\sigma}^{(1)}(\eta_i - \eta_0) + \sum_{j=0}^J (1-a_i) \delta_{\Delta,\sigma}^{(1)}(\eta_i - \eta_j) \right) W(\eta_0) \\
& - v \sum_{j=0}^J (1-a_i) \delta_{\Delta,\sigma}^{(1)}(\eta_i - \eta_j) W(\eta_i) = 0 \tag{3.70}
\end{aligned}$$

eşitliğiyle ifade edilir.

Sonuç olarak aşağıdaki öz değer denklemin çözümü nano ölçekli sektör ya da boşluklu sektör plağın titreşim frekanslarını verecektir.

$$\{K_{ij} - \omega^2 [1 - (e_0 a)^2] M_{ij}\} \{W_{ij}\} = 0 \tag{3.71}$$

### 3.2.3. Eğilme denklemi

Titreşim problemine benzer olarak plak eğilme denklemi dönüşüm, operatör ve diğer işlemlerin uygulanması ile elde edilir. Sonuç olarak elde edilen denklem aşağıdaki lineer denklem takımındadır:

$$\begin{aligned}
& D \left[ \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial y^4} \right] - \\
& \left[ 1 - (e_0 a)^2 \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \tag{3.72}
\end{aligned}$$

Denklem (3.72) kısa olarak,

$$D \nabla^4 w - [1 - (e_0 a)^2 \nabla^2] q = 0 \tag{3.73}$$

şeklinde yazılır.

Dönüşüm ve ayrıklaştırma operatörlerinden sonra denklem eğilme için,

$$\begin{aligned}
& \left( [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(2)} \mathfrak{Z}(\xi, \eta) \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(1)} \Xi(\xi, \eta) \right] \right) W_{ij}(\xi, \eta) \\
& \times \left( [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(2)} \mathfrak{Z}(\xi, \eta) \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(1)} \Xi(\xi, \eta) \right] \right) W_{ij}(\xi, \eta) \\
& - \left\{ q_{ij} - (e_0 \mathbf{a})^2 \left( [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(2)}(k\Delta\xi) q_{ik} \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(1)}(k\Delta\xi) q_{ik} \right] \right. \right. \\
& \left. \left. + [J_{22}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(2)}(k\Delta\eta) q_{kj} \right] - [J_{22}]^{-1} [J_{21}] [J_{11}]^{-1} \left[ \sum_{k=-M}^M \delta_{\Delta, \sigma}^{(1)}(k\Delta\eta) q_{kj} \right] \right) = 0 \quad (3.74)
\end{aligned}$$

olarak elde edilir.

#### 4. BULGULAR

Bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmaların en önemlisi boşluklu sektör ve sektör plağın titreşiminde boyut etkisinin incelenmesidir. Elde edilen sonuçlar farklı sektör açısı, boşluk oranı ve boyut etkisi parametresi etkisini gösterecek şekilde sunulmuştur. Nano ölçekli ölçekli dörtgen plaklar için temel frekans değerleri farklı grid numaraları için Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de sunulmaktadır. Boyut etkileri için lokal olmayan parametrelerin farklı değerleri kabul edilir. Bütün kenarları basit mesnetli kare ve sektör plak deplasman değerleri çeşitli düğüm noktası sayısı ve lokal olmayan parametre değerleri için literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüleceği gibi sunulan ATK sonuçları, Çizelge 4.1’de Reddy vd. (2009) tarafından verilen analitik çözümlerle, Çizelge 4.2’de Wang vd. (2000) tarafından verilen analitik çözümlerle detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca sonuçların doğruluğu  $N=15$  için elde edilmesiyle sağlanmıştır. Elde edilen bu veriler ışığında ATK yönteminde düğüm noktası sayısının artmasına bağlı olarak deplasman değerlerinde bir azalma meydana geldiği ve değerlerin literatürdeki mevcut değerlere giderek yaklaştığı söylenebilir. Diğer taraftan, lokal olmayan parametre değerindeki artışın deplasman değerlerinde de yükselişe sebep olduğu çizelgelerden rahatlıkla gözlemlenebilir.

Çizelge 4.1. Basit mesnetli kare plak için maksimum deplasman değerleri

Boyut etkisi	ATK yöntemi				Aghababaei, ve Reddy 2009
	11*11	13*13	15*15	17*17	
$e_0a=0$	4.0119	4.0094	4.0091	4.0091	4.0083
$e_0a=1.0$	4.7406	4.7378	4.7365	4.7365	4.7322
$e_0a=1.73205$	6.1812	6.18049	6.1844	6.1844	6.1800

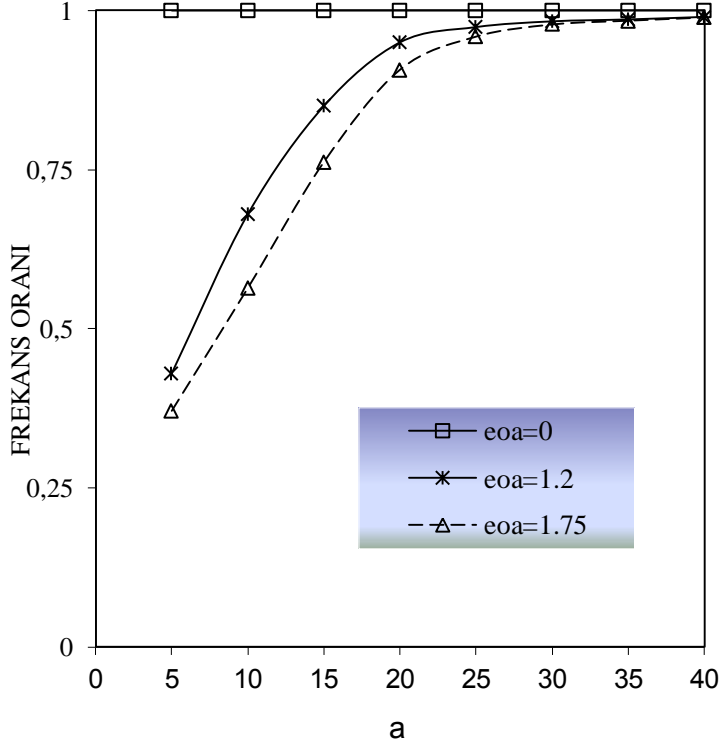
\* ( $a/h=100$ ; klasik plak teorisi)

Çizelge 4.2. Basit mesnetli sektör plak için deplasman ( $0.75a$ ) değeri ( $\alpha=60$ ;  $h/a=0.001$ ;  $a=2$  nm)

Boyut etkisi	ATK yöntemi				Wang vd. 2000
	11*11	13*13	15*15	17*17	
$e_0a=0$	0.9240	0.9238	0.9238	0.9238	0.9247
$e_0a=0.8$	1.0359	1.0356	1.0355	1.0355	-
$e_0a=1.5$	1.0998	1.0990	1.0986	1.0986	-

\* ( $a/h=100$ ; Kayma deformasyon teorisine dayalı analiz)

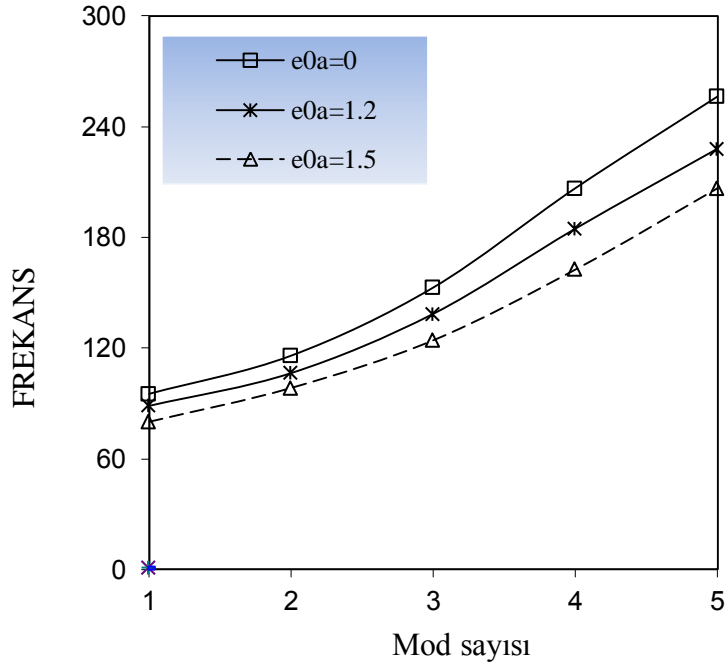
Sonraki çalışmalar; bazı parametrik sonuçlara ulaşılması, nano boyutlu dairesel şekilli sektör plağın titreşim davranışı üzerindeki boyut parametresinin ve boyut etkisinin gösterilmesi amacıyla yapılmıştır. Frekans oranları (lokal yöntemle elde edilenden lokal olmayan yöntemle elde edilene doğru) lokal olmayan farklı parametre değerleri ve SSSS mesnetli dairesel şekilli sektör plağın farklı uzunluktaki çap değerleri için Şekil 4.1'de verilmiştir. Lokal olmayan parametre etkilerinin yarıçap uzunluğu küçüldükçe daha belirgin olduğu tespiti yapılmıştır. Ayrıca frekans oranındaki azalışın lokal olmayan parametre değerlerindeki artışa bağlı olduğu görülmektedir.



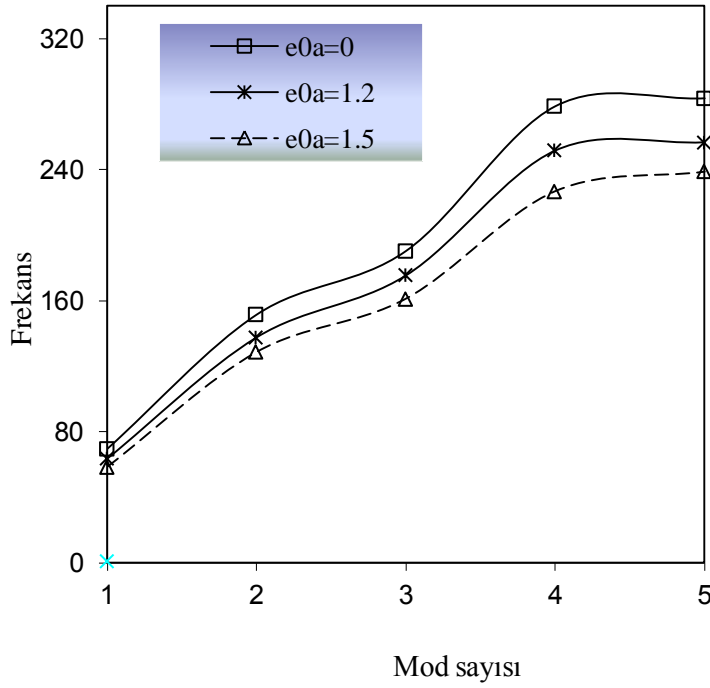
Şekil 4.1. SSSS mesnetli mikro ölçekli boşluklu sektör plağın ( $\varphi=45$ ) frekans oranı ( $b/a=0.4$ )

CCCC dairesel sektör plağın lokal olmayan farklı parametre değerleri için frekans değerleri değişimi, mod sayısına bağlı olarak Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.3'te ise SSSS dairesel plak için mod sayısına bağlı frekans değerlerinin lokal olmayan farklı parametre değerlerine göre değişimi verilmiştir. Burada, boyut parametresindeki artış frekansı düşürmektedir. Bununla beraber boyut parametresi etkisi yüksek mod değerlerinde önem kazanmaktadır.

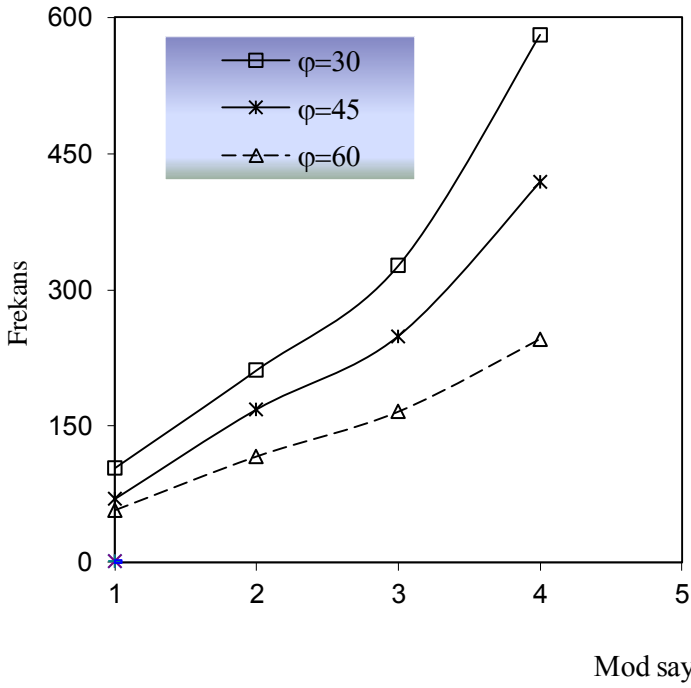




Şekil 4.2. CCCC boşluklu sektör plağın mod sayısına bağlı olarak frekans değeri ( $\varphi=90$ ;  $b/a=0.5$ )

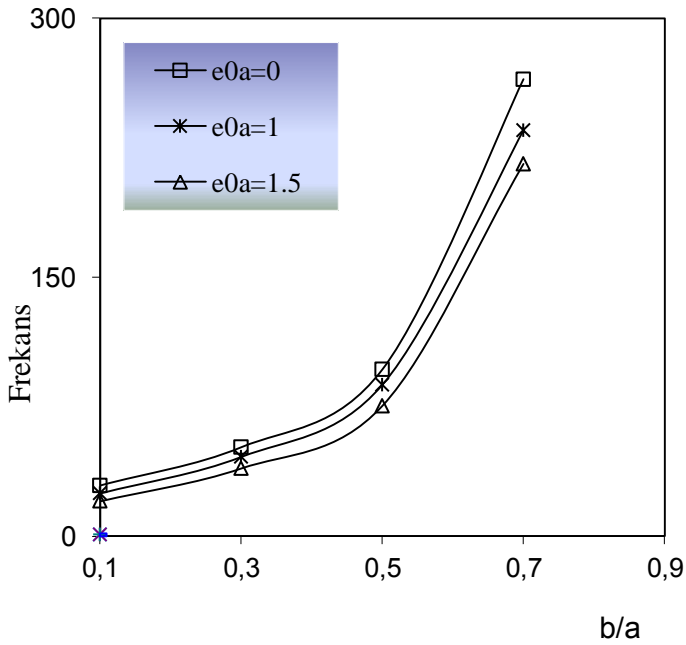


Şekil 4.3. SSSS boşluklu sektör plağın mod sayısına bağlı frekans değerinin boyut etkisi ile değişimi ( $\varphi=45$ ;  $b/a=0.5$ )

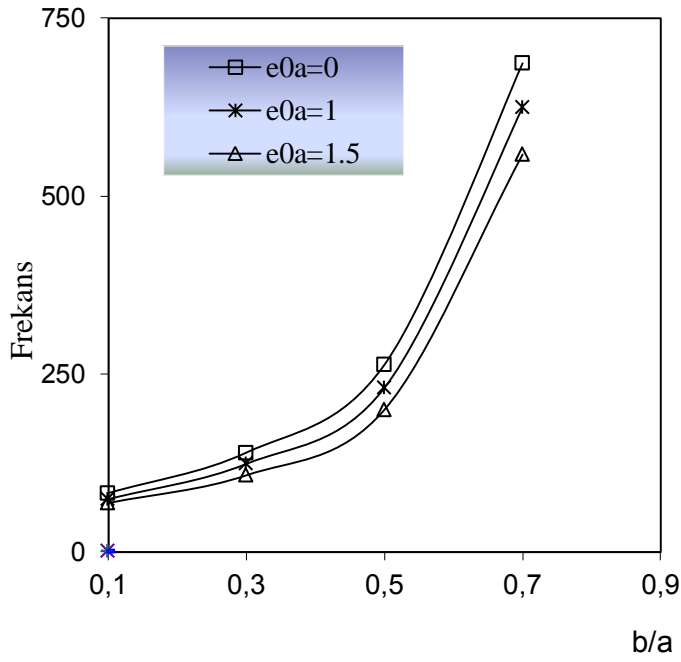


Şekil 4.4. SSSS boşluklu sektör plağın sektör açısına bağlı frekans değerleri (eoa=1; b/a=0.4)

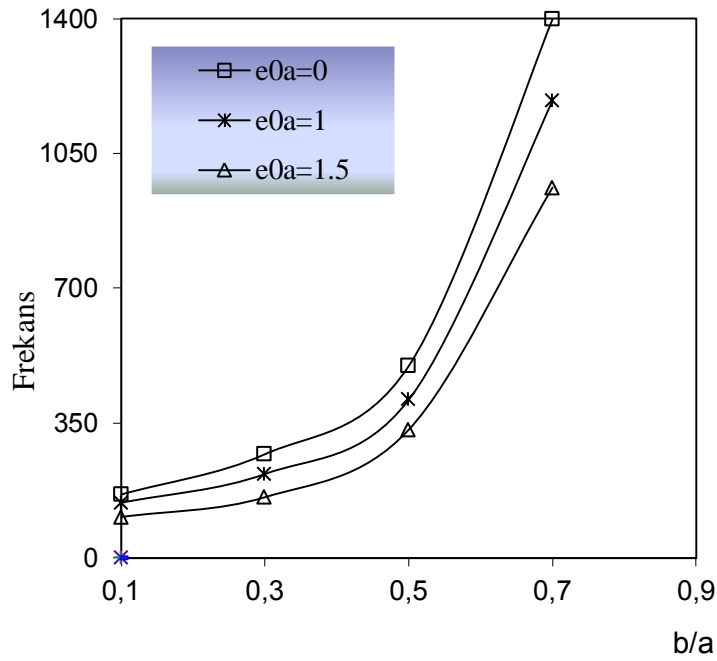
Lokal olmayan parametrelerin farklı mod sayılarındaki frekans değerleri üzerinde etkisini görmek amacıyla birincil, ikincil ve üçüncül mod sayıları için frekans tepkisi b/a oranı ile Şekiller (4.5-4.7) 'de verilmiştir.



Şekil 4.5. SCSC boşluklu sektör plağın birinci mod değerinin boşluk oranına bağlı değeri (φ=150)

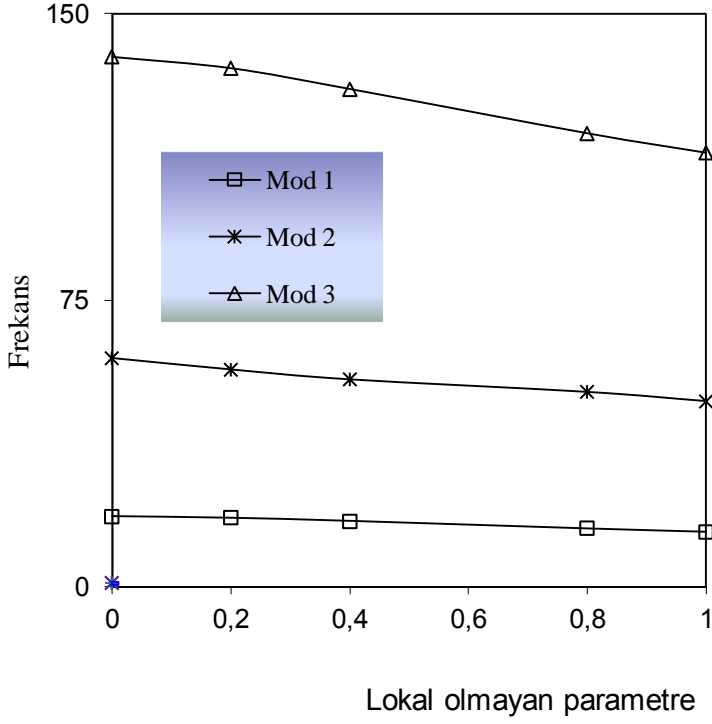


Şekil 4.6. SCSC boşluklu sektör plağın ikinci mod değerinin boşluk oranına bağlı değeri ( $\varphi=150$ )



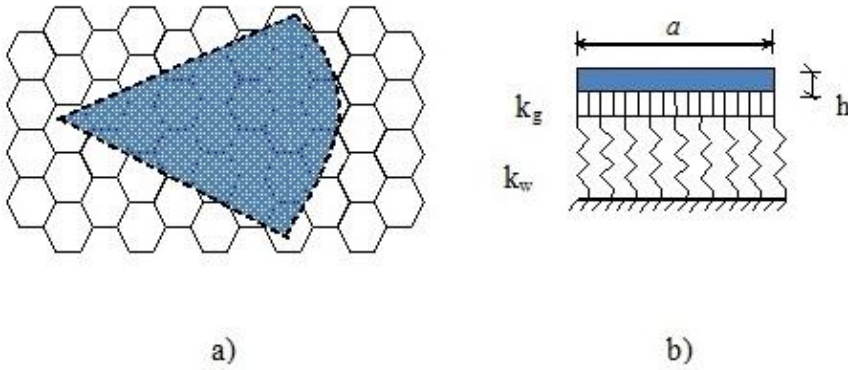
Şekil 4.7. SCSC boşluklu sektör plağın üçüncü mod değerinin boşluk oranına bağlı değeri ( $\varphi=150$ )

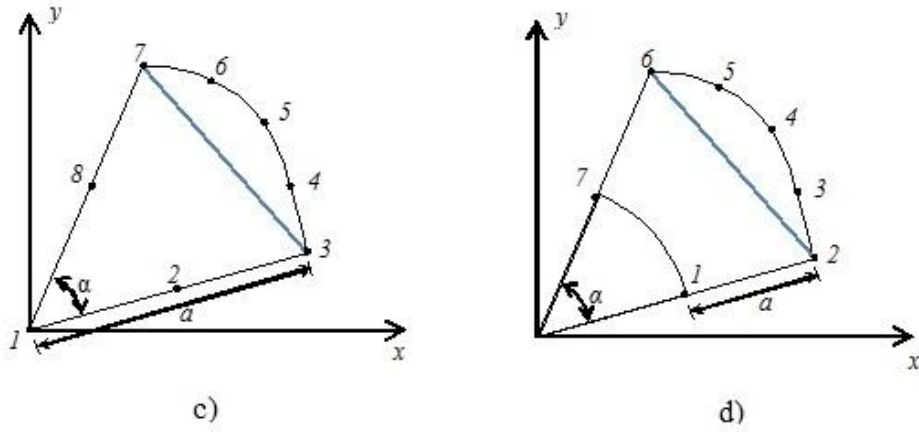
SSSS boşluklu dairesel sektör plağın ( $\varphi=150$ ) lokal olmayan parametreye bağlı frekans değeri farklı mod sayıları için Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. SSSS boşluklu sektör plağın ( $\varphi=150$ ) lokal olmayan parametreye bağlı frekans değeri

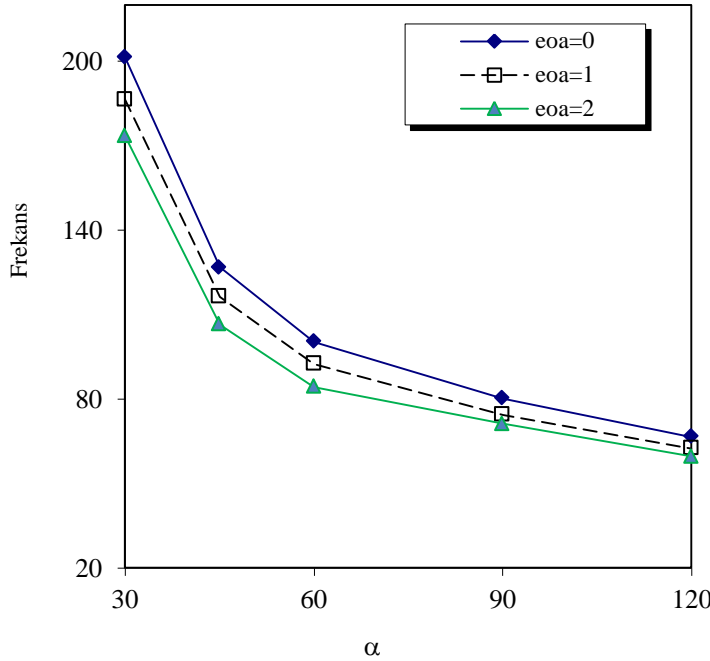
Elastik zemin etkisini incelemek üzere (Şekil 4.9) yapılan analizlerde titreşim üzerine boyut etkisinin farklı zemin parametreleri ve plak geometrisine bağlı değişimi incelenmiş ve aşağıda sunulmuştur.





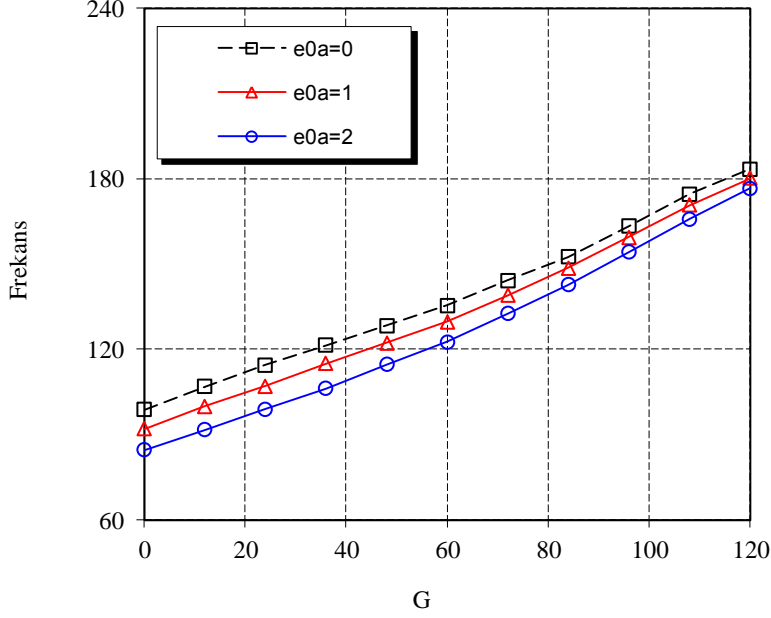
Şekil 4.9. Elastik zemin üzerinde tek katmanlı grafen tabaka  
(a) grafen tabaka b) kesit alanı c) sektör grafen d) boşluklu sektör grafen)

Şekil 4.10'da sektör açısı ve lokal olmayan parametre ( $eo_a$ ) değerlerinin elastik zemin üzerindeki bütün kenarları basit mesnetli boşluklu sektör grafen tabakanın temel frekansı üzerindeki etkileri görülmektedir. Burada, sektör açısının artmasına bağlı olarak frekans değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, lokal olmayan parametredeki artışın frekans değerlerinde azalmaya neden olduğu söylenebilir.



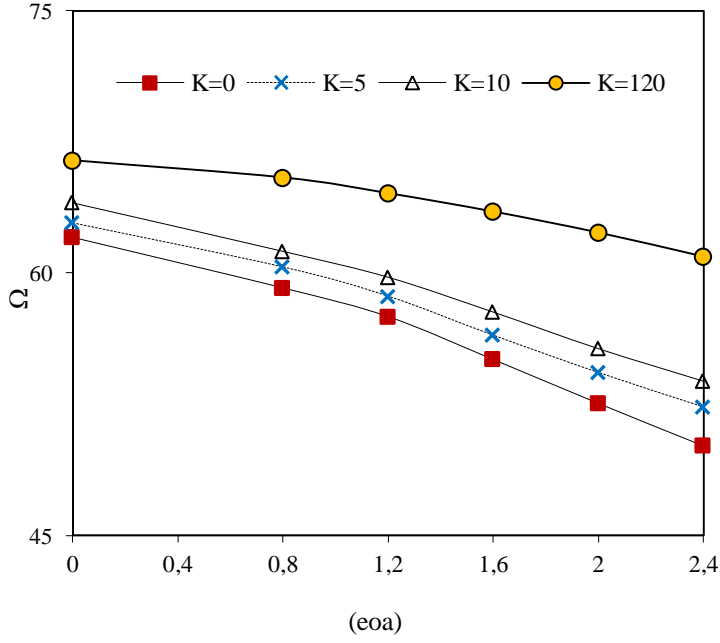
Şekil 4.10. Dört kenarından basit mesnetli boşluklu sektör grafen tabaka temel frekans değerinin sektör açısı ve boyut etkisine bağlı değerleri ( $b/r=0.2$ ;  $K=15$ ;  $G=10$ )

Şekil 4.11’de bütün kenarları basit mesnetli boşluklu sektör grafen tabakaya ait temel frekansı değerinin Pasternak zemin ve lokal olmayan parametrelere bağlı değişimi çizdirilmiştir. Burada, Pasternak zemin parametresinin artmasına bağlı olarak frekans değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Ayrıca, daha önceden belirtildiği üzere lokal olmayan parametredeki artış frekans değerlerinde azalmaya sebep olmaktadır.

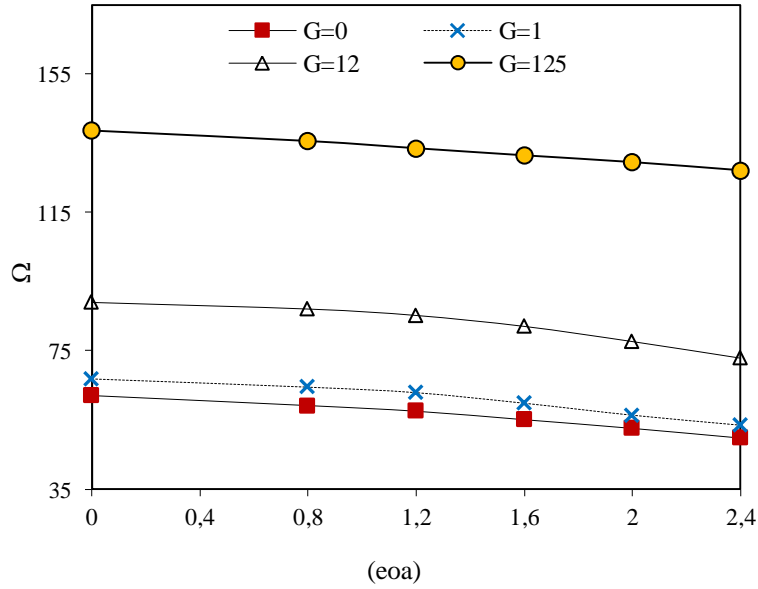


Şekil 4.11. Dört kenarından basit mesnetli boşluklu sektör grafen tabakanının temel frekans değerinin Pasternak zemin etkisi ve lokal olmayan parametreye bağlı değişimi ( $\alpha=30$ ;  $b/r=0.5$ ;  $K=10$ )

Şekiller 4.12 ve 4.13’te SCSC mesnetli boşluklu sektör nano boyutlu plağa ait frekans değerinin sırasıyla Winkler ve Pasternak zemin ile lokal olmayan parametrelere bağlı değişimi sunulmuştur. Burada, zemin parametrelerinin frekans değerlerini arttırıcı etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, Pasternak zemin parametresinin Winkler zemin parametresine göre frekans değerleri üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu vurgulanabilir.



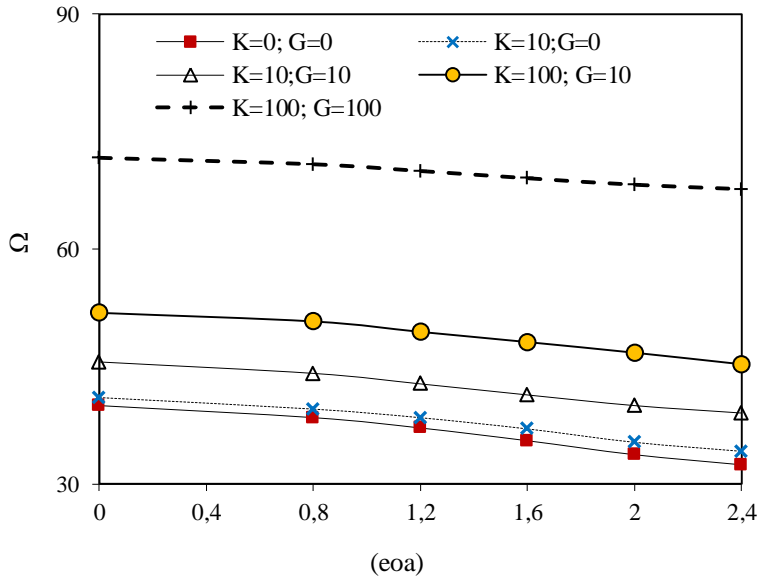
Şekil 4.12. Boşluklu sektör nano plak frekans değerinin Winkler zemin parametresi ve boyut etkisine bağlı değişimi (SCSC mesnet;  $\alpha=60$ ;  $b/r=0.4$ )



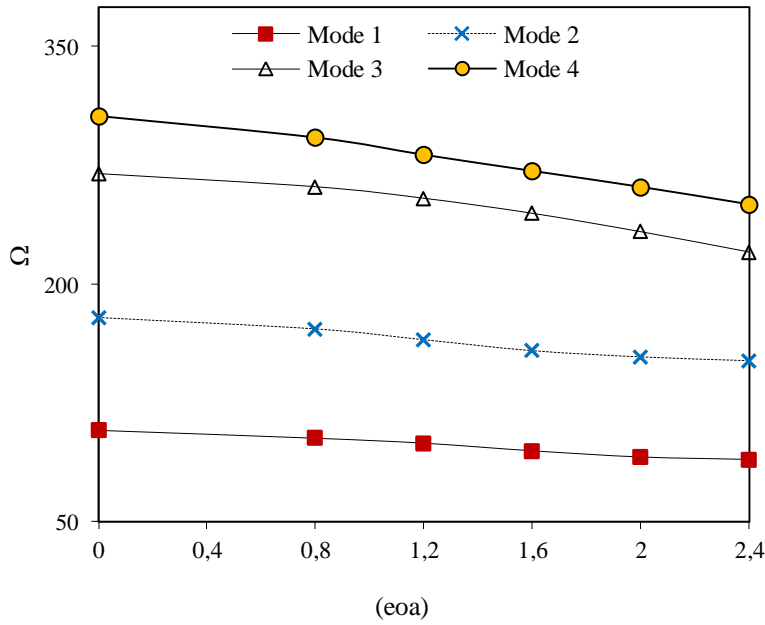
Şekil 4.13. Boşluklu sektör nano plak frekans değerinin Pasternak zemin parametresi ve boyut etkisine bağlı değişimi ( $\alpha=60$ ;  $b/r=0.4$ ; SCSC)

Bütün kenarları basit mesnetli sektör grafen tabakaya ait frekans değerinin elastik zemin ve lokal olmayan parametrelere bağlı değişimi Şekil 4.14'te verilmiştir.

Burada, Winkler ve Pasternak zemin parametrelerinin artmasıyla birlikte frekans değerlerinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 4.14. SSSS mesnetli sektör grafen plak için frekans değerinin zemin katsayı değerleri ve boyut etkisine bağlı değişimi ( $\alpha=60$ )

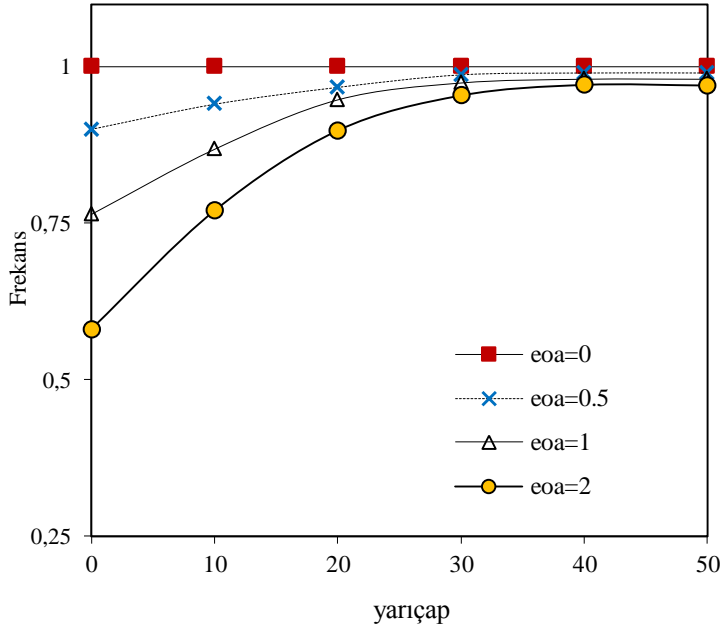


Şekil 4.15. CSCS mesnetli boşluklu sektör grafen plak için frekans değerinin mod sayısı ve boyut etkisine bağlı değişimi ( $\alpha=60$ ;  $b/r=0.5$ )



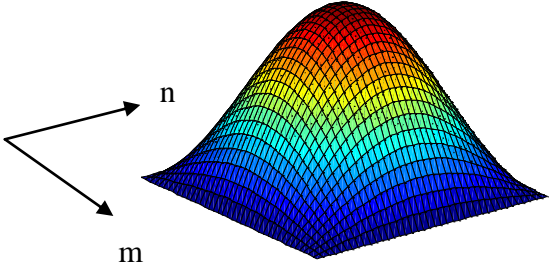
Şekil 4.15'te mod sayısı ve lokal olmayan parametre değerlerinin CSCS mesnetli boşluklu sektör grafen tabakanın frekans değeri üzerindeki etkileri görülmektedir. Burada, mod sayısının artmasına bağlı olarak frekans değerlerinin hızlı bir biçimde yükseldiği gözlemlenmiştir.

Bütün kenarları ankastre mesnetli boşluklu sektör grafen tabakaya ait frekans oranının çap değerine bağlı değişimi çeşitli lokal olmayan parametre değerleri için Şekil 4.16'da çizdirilmiştir.

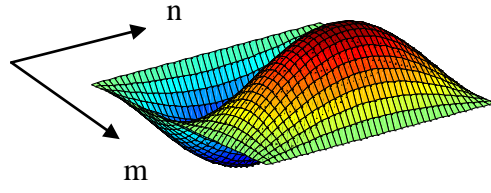


Şekil 4.16. CCCC mesnetli boşluklu sektör grafen plak için frekans değerinin çapa bağlı değişimi ( $b=5nm$ ;  $\alpha=30$ )

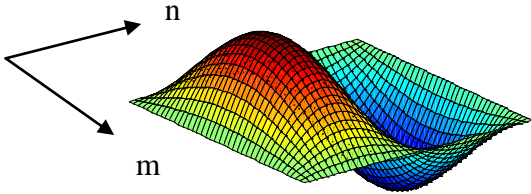
Daha önceden belirtildiği gibi  $e_{0a}$  değerinin sıfır olması durumunda lokal olmayan elastisite teorisine dayalı oluşturulan model klasik (makro) elastisite teorisine bağlı modele indirgenmektedir. Dolayısıyla, Şekil 4.16'da açıkça görüldüğü üzere lokal olmayan parametrenin sıfır olduğu durumda frekans oranı daima bir olmaktadır. Bununla birlikte, lokal olmayan parametre değerinin artmasına bağlı olarak frekans oranı azalmaktadır. Dahası, çap değerinin artmasıyla birlikte frekans oranı da giderek bire yaklaşmaktadır.



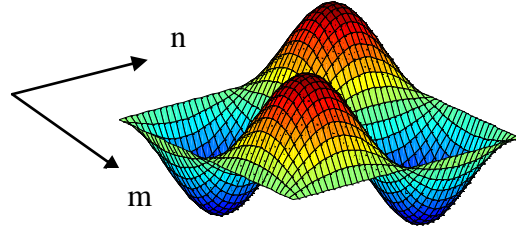
$\omega_{11}$  (m=1, n=1)



$\omega_{21}$  (m=2, n=1)



$\omega_{12}$  (m=1, n=2)



$\omega_{22}$  (m=2, n=2)

Şekil 4.17. Bütün kenarları basit mesnetli dikdörtgen biçimindeki plakların mod şekilleri ( $\epsilon_0 a = 1.25$ )

Şekil 4.17 de ise farklı mod sayıları için mod şekilleri verilmiştir. Boyut etkisi düşük titreşimlerde mod şekillerini değiştirmemekte, ancak özdeğerler ve özvektörler değişmektedir. Bu detaylı araştırılması gereken bir alan gibi durmaktadır.

## 5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında nano boyutlarda Lokal Olmayan Elastisite Teorisi kullanılarak nano boyuttaki sektör ve boşluklu sektör plakların modelleri oluşturulmuş ve bu modellerin belirlenen sınır koşulları altında Ayrık Tekil Konvolüsyon Metodu yardımıyla eğilme ve titreşim analizi yapılmıştır. Bu analizler nanoboyut mertebesindeki sistemlerin mekanik özelliklerini anlayabilmek açısından önem taşımaktadır.

Tez içeriğinde, mevcut formülasyonun işlevselliği ve doğruluğu araştırılmıştır. Lokal olmayan elastisite teorisine dayalı mikro veya nano ölçekli boşluklu sektör plakların titreşim frekansı için literatürde sonuç bulunamamıştır. Nano dikdörtgen plaklar için de temel frekans sonuçları farklı satır numaraları için ilgili tabloda sunulmuştur. Mikro / nano ölçekli boşluklu sektör plakların serbest titreşim analizi lokal olmayan elastisite teorisi aracılığıyla yapılmıştır. Hareket yöneten denklem Eringen tarafından sunulan lokal olmayan elastisite teorisi ile birlikte Kirchhoff plak teorisine dayanmaktadır. Geometrik koordinat dönüşümü tekniği kullanılır. Böylece, eğrisel dörtgen alanı bir kare alanı üzerine eşleştirilir. Daha sonra ATK yöntemi ile diferansiyel denklemle ayrıştırılır ve sınır koşulları uygulanır. Lokal olmayan parametrelerin frekans üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Buna göre lokal olmayan elastisite teorisinin yüksek modlar ve küçük yarıçaplı boşluklu sektör plaklar için daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, nano boyutlu plakaların titreşim analizinin yapılabilmesi için klasik elastisite teorisinin yeterli olmadığını söylemek mümkündür. Malzeme boyutları küçüldükçe atomlar arası mesafe önem kazandığından boyut etkisi, nano ölçekli boşluklu sektör plakaların modellenmesi için ele alınmalı ve buna göre lokal olmayan elastisite teorisi kullanılmalıdır. Lokal olmayan elastisite teorisi ile elde edilen frekanslar klasik sonuçlardan daha küçüktür. Bunun tam aksine, eğilme durumu için lokal olmayan elastisite teorisine dayalı deplasman değerleri klasik elastisite sonuçlarından daha büyük olmaktadır. Lokal olmayan parametrenin etkisinin yanında sektör açısı, çap değeri, mod sayısı ve zemin parametrelerinin de nano boyutlu plaka ve grafen tabakanın frekans değerleri üzerindeki etkileri detaylı bir biçimde incelenmiştir. Çap değerinin artmasıyla birlikte frekans oranının artarak bire yaklaşmakta olduğu, sektör açısının artmasına bağlı olarak da frekans değerlerinin azaldığı vurgulanabilir.

Ayrıca, bu yapıların elastik bir zemin üzerinde olmaları durumu Winkler ve Pasternak zemin modelleri kullanılarak incelenmiştir. Her iki zemin modeline göre yapılan analizlerde göz önüne alınan nano boyutlu plakanın rijitliğinin arttığı ve buna bağlı olarak frekans değerlerinin de elastik zemin etkisinin olmadığı durumdakine kıyasla yükseldiği gözlemlenmiştir. Bunlara ilaveten, iki parametrelili zemin modeli olan kayma etkilerinin de dikkate alındığı Pasternak zemin modelinde frekans değerleri Wnkler zemin modeline göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Boyutun artmasıyla elde edilen sonuçlar klasik elastisite ile yorumlanabilmektedir.

## 6. SONUÇ

Mikro ve nano ölçekli sistemler mühendisliğin her alanında kendilerine kullanım alanı bulmuşlardır. Biyomedikal, mikro bilgisayarlar, ilaç sektörü, mikro cerrahi, tekstil mühendisliği, makine, inşaat, uçak uzay mühendisliği bu alanların başında gelmektedir. Makro olarak var olan her mekanik sistem (çubuk, halat, sicim, ip, kablo, kiriş, kolon, levha, zar, plak, kabuk) artık mikro hatta nano ölçeklerde tasarlanmakta ve çok farklı amaçlar için kullanılabilir. Mikro ya da nano ölçekli sistemlerin analizi atomik modelleme ya da benzetim teknikleri de yapılabilir. Deneysel çalışma çok pahalı ve zordur. Her farklı durum için deneysel çalışmayla sonuca ulaşmak henüz mümkün gözükmemektedir. Bu nedenle; sürekli mekanik modeller nano ve mikro ölçekli sistemlerin analizinde yaygın olarak kullanılmakta ve önümüzdeki yıllarda da kullanılmaya devam edeceği öngörülmektedir. Yüksek mertebeden elastisite yasaları ile boyut etkisinin kinematik bağıntılara ve dolayısıyla bünye denklemlerine dâhil edilebilmesi, bu çalışmaları daha cazip hale getirmekte ve çalışmaların üzerinde çalışan ekiplerin sayısı gün geçtikçe artmaktadır.

Sunulmuş olan bu tez çalışması nano boyutlarda olan sektör, ya da boşluklu sektör elemanların plak şeklinde ve lokal olmayan elastisite teorisi ile analizini hedeflemiştir. Statik ve serbest titreşim analizleri nonlokal elastisite ve Kirchoff plak teorileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nano sistemler çoğunlukla bir başka daha yumuşak ya da kolloid ortamlarda bulunmaktadır. Bu etkileşim iki parametrelili zemin modeli kullanılarak denklemlere dâhil edilmiştir.

Çalışma dikdörtgen ve daire dışında farklı geometride plakların elastik zemin etkisinde lokal olmayan elastisite teorisi ile burkulma analizlerinin yapılabileceğini, lineer olmayan dinamik ve statik analizlerinin gerçekleştirilebileceğini ortaya çıkartmıştır. Kullanılan yöntem sayısal çözüm için elverişlidir. Bu konular gelecekte çalışılabilecek alanlardan bazılarıdır. Buradan yola çıkarak nano ölçekli sistemlerin analizi ve tasarımı farklı etkileşimler ve modelleme teknikleri ile önümüzdeki 10 yılda da dünyada yoğun olarak çalışılacak bir alan olmaya devam edeceği tahmin edilmektedir.

## 7. KAYNAKLAR

- AGHABABAEI, R. and REDDY, J.N. 2009. Nonlocal third-order shear deformation plate theory with application to bending and vibration of plates. *J. Sound Vib.*, 326: 277-289
- AKGÖZ, B. 2010. Yüksek mertebeden elastisite teorileriyle mikro ve nano yapıların lineer ve lineer olmayan analizleri. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, 72 sayfa.
- AKGÖZ, B. 2011. Yüksek mertebeden elastisite teorilerinin plaklara uygulanması. Doktora Semineri, Akdeniz Üniversitesi, 34 sayfa.
- AKSENCER, T. and AYDOĞDU, M. 2011. Levy type solution method for vibration and buckling of nanoplates using nonlocal elasticity theory. *Phys. E*, 43: 954-959
- ALIBEIGLOO, A. 2011. Free vibration analysis of nano-plate using three-dimensional theory of elasticity. *Acta Mech.*, 222: 149-159
- ALTMANN, J. and GUBRUD, M. 2004. Anticipating military nanotechnology. *IEEE Technol.Soc.Mag.*, 33.
- ANDERSON, C.H. 2009. Purification, derivatisation and evaluations of nanosized carbon structures: nanotubes, fullerenes and particles. Uppsala University.
- ANDREEVA, D.V. and SHCHUKIN, D.G. 2008. Smart self repairing protective coatings. *Mater. Today.*, 11 (11).
- ANSARI, R., SAHMANI, S. and ARASH, B. 2010. Nonlocal plate model for free vibrations of single-layered graphene sheets. *Phys. Lett. A*, 375: 53-62
- ANSARI, R., RAJABIEHFARD, B. and ARASH, B. 2010. Nonlocal finite element model for vibrations of embedded multi-layered graphene sheets. *Comput. Mater. Sci.*, 49: 831-838
- ANSARI, R., ARASH, B. and ROUHI, H. 2011. Vibration characteristics of embedded multi-layered graphene sheets with different boundary conditions via nonlocal elasticity. *Composite Struct.*, 93: 2419-2429
- ANSARI, R. and ROUHI, H. 2012. Explicit analytical expressions for the critical buckling stresses in a monolayer graphene sheet based on nonlocal elasticity. *Solid State Commun.*, 152: 56-59
- ARNALL, A.H. 2003. Future technologies today's choices. Greenpeace Environmental Trust Report, London.

- ASSADI, A. and FARSHI, B. 2011. Stability analysis of graphene based laminated composite sheets under non-uniform inplane loading by nonlocal elasticity. *Appl. Math. Model.*, 35: 4541-4549
- AYHAN, A. 2002. Dünden Bugüne Türkiye’de Bilim-Teknoloji ve Geleceğin Teknolojileri, Beta Basım Yayım Dağıtım, İstanbul.
- BABAEI, H. and SHAHIDI, A.R. 2011. Small-scale effects on the buckling of quadrilateral nanoplates based on nonlocal elasticity theory using the Galerkin method. *Arch. Appl. Mech.*, 81: 1051-1062
- BAYKARA, T., GÜNAY, V. and MUSLUOĞLU, E. 2010. Nanoteknoloji ve nanomalzeme süreçleri. Tübitak MAM, 217 sayfa.
- CENGER, Y. 2006. Nanoteknoloji ve karbon nanoyapılar, Bitirme Tezi, Ankara Üniversitesi, 80 ss.
- CİVALEK, Ö. 1998. Plak ve kabukların sonlu elemanlar metoduyla analizi. Yüksek Lisans Semineri, Fırat Üniversitesi
- CİVALEK, Ö. 2006-a. Free vibration analysis of composite conical shells using the discrete singular convolution algorithm. *Steel Compos. Struct.*, 6(4): 353-366.
- CİVALEK, Ö. 2006-b. An efficient method for free vibration analysis of rotating truncated conical shells. *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, 83: 1-12.
- CİVALEK, Ö. 2007-a. Three-dimensional vibration, buckling and bending analyses of thick rectangular plates based on discrete singular convolution method. *Int. J. Mech. Sci.*, 49: 752–765.
- CİVALEK, Ö. 2007-b. Nonlinear analysis of thin rectangular plates on winkler-pasternak elastic foundations by DSC-HDQ methods. *Appl. Math. Model.*, 31: 606-624.
- CİVALEK, Ö. 2007-c. Free vibration and buckling analyses of composite plates with straight-sided quadrilateral domain based on DSC approach. *Finite Elem. Anal. Des.*, 43: 1013-1022.
- CİVALEK, Ö. 2007. Linear vibration analysis of isotropic conical shells by discrete singular convolution (DSC), *Struct. Eng. Mech.*, 25: 127-130.
- CİVALEK, Ö. 2009. A four-node discrete singular convolution for geometric transformation and its application to numerical solution of vibration problem of arbitrary straight-sided quadrilateral plates, *Appl. Math. Model.*, 33: 300-314.
- CİVALEK, Ö. 2010. Use of Eight-Node Curvilinear Domains in Discrete Singular Convolution Method for Free Vibration Analysis of Annular Sector Plates with Simply Supported Radial Edges, *J. Vib. Control*, 16: 303-320.

- CİVALEK, Ö., DEMİR, Ç., AKGÖZ, B. 2010. Free vibration and bending analyses of cantilever microtubules based on nonlocal continuum model. *Math. Comput. Appl.*, 15: 289-298.
- CİVALEK, Ö., DEMİR, Ç. 2011. Buckling and bending analyses of cantilever carbon nanotubes using Euler- Bernoulli beam theory based on non-local continuum model. *Asian J. Civ. Eng.*, 12(5): 651-661.
- CİVALEK, Ö., DEMİR, Ç. 2011. Bending analysis of microtubules using nonlocal Euler-Bernoulli beam theory. *Appl. Math. Model.*, 35: 2053-2067.
- CRANDALL, S.H. 1968. Mühendislik Analizi, Sayısal Hesap Metotlarına Genel Bakış. Çevirenler: Utku, Ş. ve Özden, E.Y., Berksoy Matbaası.
- ÇINAR, M.O. ve Diğerleri. 2005 Molekül algılama amaçlı atomik kuvvet mikroskobu tasarımı ve üretilmesi. Ulusal Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, İstanbul.
- ÇIRACI, S. 2005. Nanoteknolojide yeni ufuklar, *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- ÇIRACI, S. 2006. Nanoteknolojide yeni ufuklar, *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- DEMİR, C., CİVALEK, Ö. and AKGÖZ, B. 2010. Free vibration analysis of carbon nanotubes based on shear deformable beam theory by discrete singular convolution technique, *Math. Comput. Appl.*, 15: 57-65.
- DEMİR, Ç. 2011. Nano ve mikro yapıların lokal olmayan elastisite teorisi ile eğilme ve titreşim hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, 143 sayfa.
- ELİBOL, K. 2009. Karbon nanotüplerin yapısı ve kusurları. <http://www.kuark.org/2012/08/karbon-nanotuplerin-yapisi-ve-kusurlari/>
- ERINGEN, A.C. 1983. On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves. *J. Appl. Phys.*, 54: 4703-4710.
- ERKOÇ, Ş. 2001. Karbon nano yapılar, *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- ERKOÇ, Ş. 2009. Nanobilim ve nanoteknoloji, O.D.T.Ü. *Bilim ve Toplum Kitapları Dizisi*, 107 ss.
- FARAJPUR, A., DANESH, M. and MOHAMMADI, M. 2011. Buckling analysis of variable thickness nanoplates using nonlocal continuum mechanics. *Phys. E*, 44: 719-727
- FARAJPOUR, A., SHAHIDI, A.R., MOHAMMADI, M. and MAHZOON, M. 2011. Axisymmetric buckling of the circular graphene sheets with the nonlocal continuum plate model. *Phys. E*, 43: 1820-1825

- FREITAS, R.A. 2005. Nanotechnology, nanomedicine and nanosurgery. *Int. J. Surgery*.
- XIE, G.Q., HAN, X., LIU, G.R. and LONG, S.Y. 2006. Effect of small size-scale on the radial buckling pressure of a simply supported multi-walled carbon nanotube. *Smart Mat. and Struct.*,15:1143-1149.
- GURSES, M. 2012. Linear and nonlinear free vibration and buckling analyses of curvilinear quadrilateral shaped nanoplates by the nonlocal continuum theory. Ph.D. Thesis Seminar, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Akdeniz University.
- HAN, J.B. and LIEW, K.M. 1997. An eight-node curvilinear differential quadrature formulation for Reissner/Mindlin plates. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*,141:265-280.
- HASHEMI, S.H. and SAMAEI, A.T. 2011. Buckling analysis of micro/nanoscale plates via nonlocal elasticity theory. *Phys. E*, 43: 1400-1404
- HOU, Y., WIE, G.W. and XIANG, Y. 2005. DSC-Ritz method for the free vibration analysis of mindlin plates. *Int.J. Numer. Methods Eng.*, 62: 262–288.
- HUNT, G. and MEHTA, M. 2006. Nanotechnology: Risk, Ethics and Law, London.
- JOMEHZADEH, E. and SAIDI, A.R. 2011. Decoupling the nonlocal elasticity equations for three dimensional vibration analysis of nano-plates. *Compos. Struct.*, 93: 1015-1020
- KAISER, David. Notes toward a nanotech timeline, OSTI Working Paper, 03 şubat 2008.<http://www.osti.gov/innovation/research/diffusion/nanotechdiscussionDK.pdf>.
- KAYIR, Z.Y. and BAŞÇIL, E.G. 2010. Nanoteknoloji nedir. 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Ankara.
- LIEW, K.M., HUNG, K.C. and LIM, M.K. 1995. Vibration characteristic of simply supported thick skew plates in three-dimensional setting. *J. Appl. Mech. ASME*, 62: 880-886.
- LIEW, K. M. and HAN, J.B. 1995. Bending analysis of simply supported shear deformable skew plates. *J. Eng. Mech. ASCE*, 123(3): 214-221.
- LIM, C.W. and LIEW, K.M. 1995. Vibration of pretwisted cantilever trapezoidal symmetric laminates. *Acta Mech.*,111(3-4): 193-208.
- LIEW, K.M. and WANG, Q. 2007. Wang, Analysis of wave propagation in carbon nanotubes via elastic shell theories. *Int. J.Eng. Sci.*, 45: 227-241.



- LIEW, K.M. and WANG, Q. 2007. Application of nonlocal continuum mechanics to static analysis of micro- and nano-structures. *Phys. Lett. A*, 363: 236-242.
- LIEW, K.M., HU, Y.G. and HE, X.Q. 2008. Flexural wave propagation in single-walled carbon nanotubes. *J. Comput. and Theor. Nanoscience*, 5: 581-586.
- LIM, C.W., LIEW, K.M. and KITIPORNCHAI, S. 1996. Vibration of arbitrarily laminated plates of general trapezoidal planform. *J. Acoustical Soc. America*, 100(6): 3674-3685.
- MALEKZADEH, P., SETOODEH, A.R. and BENI A.A. 2011. Small scale effect on the free vibration of orthotropic arbitrary straight-sided quadrilateral nanoplates. *Compos. Struct.*, 93: 1631-1639
- MALEKZADEH, P., SETOODEH, A.R. and BENI A.A. 2011. Small scale effect on the thermal buckling of orthotropic arbitrary straight-sided quadrilateral nanoplates embedded in an elastic medium. *Compos. Struct.*, 93: 2083-2089
- MALIK, M. and BERT, C.W. 1996. Implementing multiple boundary conditions in the DQ solution of higher-order PDE's: Application to free vibration of plates. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 39: 1237-1258.
- MIYAZAKI, Kumiko ve ISLAM, Nazrul. 2007. Nanotechnology systems of innovation - an analysis of industry and academia research activities. *Technovation*, 27: 661-675.
- NARENDAR, S. 2011. Buckling analysis of micro-/nano-scale plates based on two-variable refined plate theory incorporating nonlocal scale effects. *Compos. Struct.*, 93: 3093-3103
- ÖZER, Y. 2008. Nanobilim ve nanoteknoloji: ülke güvenliği/etkinliği açısından doğru modelin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Kara Harp Okulu, 197 sayfa.
- ÖZİN, G.A. 2009. Nanofabrication by self assembly. *Mater. Today*, 12 (5).
- PRADHAN, S.C. and PHADIKAR, J.K. 2009. Nonlocal elasticity theory for vibration of nanoplates. *J. Sound Vib.*, 325: 206-223.
- PRADHAN, S.C. and MURMU, T. 2009. Small scale effect on the buckling of single-layered graphene sheets under biaxial compression via nonlocal continuum mechanics. *Comput. Mater. Sci.*, 47: 268-274
- PRADHAN, S.C. and MURMU, T. 2009. Vibration analysis of nanoplates under uniaxial prestressed conditions via nonlocal elasticity. *J. Appl. Phys.*, 106: 104301
- PRADHAN, S.C. and MURMU, T. 2009. Buckling of biaxially compressed orthotropic plates at small scales. *Mech. Res. Commun.*, 36: 933-938

- PRADHAN, S.C. and MURMU, T. 2009. Small scale effect on free in-plane vibration of nanoplates by nonlocal continuum model. *Phys. E*, 41: 1628-1633
- PRADHAN, S.C. and KUMAR, A. 2010. Vibration analysis of orthotropic graphene sheets embedded in Pasternak elastic medium using nonlocal elasticity theory and differential quadrature method. *Comput. Mater. Sci.*, 50: 239-245
- PRADHAN, S.C. and MURMU, T. 2010. Small scale effect on the buckling analysis of single-layered graphene sheet embedded in an elastic medium based on nonlocal plate theory. *Phys. E*, 42: 1293-1301
- PHADIKAR, J.K. and PRADHAN, S.C. 2010. Variational formulation and finite element analysis for nonlocal elastic nanobeams and nanoplates. *Comput. Mater. Sci.*, 49: 492-499
- PRADHAN, S.C. and KUMAR, A. 2011. Vibration analysis of orthotropic graphene sheets using nonlocal elasticity theory and differential quadrature method. *Compos. Struct.*, 93: 774-779
- RAMSDEN, J. 2009. Nanoteknolojinin Esasları. ÖDTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayınları, Ankara, 156ss.
- REDDY, J.N. 2007. Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams. *Int. J. Eng. Sci.*, 45: 288-307.
- REDDY, J.N. and PANG, S.D. 2008. Nonlocal continuum theories of beams for the analysis of carbon nanotubes. *J. Appl. Phys.*, 103: 023511.
- ROCO, M.C. 2005. International perspective on government nanotechnology funding in 2005. *J. Nanoparticle Res.*, 7: 707-712.
- ROMING, A.D. 2004. Nanotechnology: Scientific challenges and societal benefits and risks. *Metall. Mater. Trans A*, 35: 3641.
- SALTAN M., TERZİ, S., SARGIN, Ş., MOROVA, N., SERİN, S. 2013. Yol ağregalarında nanoteknoloji kullanımı. *SDU Int. J. Technol. Sci.*, 5(1):12-21
- SALVETAT, J.-P., BONARD, J.-M., THOMSON, N.H., KULÍK, A.J., FORRÓ, L., BENOIT, W. and ZUPPIROLI, L. 1999. Mechanical properties of carbon nanotubes. *Appl. Phys. A*, 69(3): 255-260.
- SAMAEI, A.T., ABBASION S. and MIRSAYAR M.M. 2011. Buckling analysis of a single-layer graphene sheet embedded in an elastic medium based on nonlocal Midlin plate theory. *Elsevier Mech. Res. Commun.*, 38: 481-485
- SEMENOFF, G.W. 1984. Condensed-Matter Simulation of a Three-Dimensional Anomaly. *Phys. Rev. Lett.*, 53 (26): 2449.

- SHARIFZADEH, M. 2006. Nanotechnology Sector Report. *Cronus Capital Markets*. 1<sup>st</sup> Quarter.
- SUN, Y.Z. and LIEW, K.M. 2008. The buckling of single-walled carbon nanotubes upon bending: The higher order gradient continuum and mesh-free method, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 197: 3001-3013.
- ŞİMŞEK, M. 2010. Vibration analysis of a single-walled carbon nanotube under action of a moving harmonic load based on nonlocal elasticity theory, *Phys. E: Low-dimens. Syst. Nanostruct.*, 43: 182-191.
- TEPE, A. 2007. Nanoteknolojide nano ölçekteki yapıların lokal olmayan elastisite çerçevesinde incelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 114 sayfa.
- TÜSİAD, 2008. Uluslararası Rekabet Stratejileri: Nanoteknoloji ve Türkiye. Rekabet Stratejileri Dizisi No:11, TÜSİAD-T/2008-11/474
- U.S. NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE. 2004. The National Nanotechnology Initiative Strategic Plan.
- WAN, D.C. and WIE, G.W. 2000. Numerical solutions of incompressible Euler and Navier-Stokes equations by efficient discrete singular convolution method. *Acta Mech. Sinica*, 16(3), 223-239.
- WANG, C.M., REDDY, J.N. and LEE, K.H. 2000. Shear deformable beams and plates-Relationship with classical solutions, *Elsevier*, pp.312
- WANG, Y.Z., LI, F.M. and KISHIMOTO K. 2011. Thermal effects on vibration properties of double-layered nanoplates at small scales. *Compos. Part B: Eng.*, 42: 1311-1317
- WANG, K.F. and WANG, B.L. 2011. Vibration of nanoscale plates with surface energy via nonlocal elasticity. *Phys. E*, 44: 448-453
- WANG, Q. and ARASH, B. 2012. A review on the application of nonlocal elastic models in modeling of carbon nanotubes and graphenes. *Comput. Mater. Sci.*, 51: 303-313
- WEI, G.W. 1999. Discrete singular convolution for the solution of the Fokker-Planck equations. *J. Chem. Phys.*, 110: 8930-8942.
- WEI, G.W. 2000-a. Solving quantum eigenvalue problems by discrete singular convolution. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 33: 343-352.
- WEI, G.W. 2000-b. Discrete singular convolution for the Sine-Gordon equation. *Phys. D*, 137: 247-259.

- WEI, G.W. 2000-c. A unified approach for the solution of the fokker-planck equation. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 33: 4935-4953.
- WEI, G.W. 2000-d. Wavelets generated by using discrete singular convolution kernels. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 33: 8577-8596.
- WEI, G.W. 2001-a. Vibration analysis by discrete singular convolution. *J. Sound Vib.*, 244: 535-553.
- WEI, G.W. 2001-b. Discrete singular convolution for beam analysis. *Eng. Struct.*, 23: 1045-1053.
- WEI, G.W., ZHAO, Y.B. and XIANG, Y. 2001. The determination of natural frequencies of rectangular plates with mixed boundary conditions by discrete singular convolution. *Int. J. Mech. Sci.*, 43: 1731-1746.
- WEI, G.W. and YUN, G. 2002. Conjugate filter approach for solving burgers' equation. *J. Comput. Appl. Math.*, 149: 439-456.
- WEI, G.W., ZHAO, Y.B. and XIANG, Y. 2002. Discrete singular convolution and its application to the analysis of plates with internal supports; part 1: theory and algorithm. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 55: 913-946.
- WEI, G.W., ZHAO, Y.B. and XIANG, Y. 2002-a. A novel approach for the analysis of high-frequency vibrations. *J. Sound Vib.*, 257(2): 207-246.
- WILLIAMS, L. and ADAMS, W. 2007. Nanotechnology Demystified. The McGraw-Hill Companies, USA.
- VAN LENTE, M.A. 2006. Building the new world of nanotechnology. *Western Reserve J. Int.*, 38(1):173
- ZHAO, S., WEI, G.W. and XIANG, Y. 2002-b. Discrete singular convolution and its application to the analysis of plates with internal supports; part 2: applications. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 55: 947-971.
- ZHAO, S., WEI, G.W. and XIANG, Y. 2002-c. Discrete singular convolution for the prediction of high frequency vibration of plates. *Int. J. Solids Struct.*, 39: 65-88.
- ZHAO, S., WEI, G.W. and XIANG, Y. 2002-d. Plate vibration under irregular internal supports. *Int. J. Solids Struct.*, 39: 1361-1383.
- ZHAO, S., WEI, G.W. 2002-e. DSC analysis of rectangular plates with Non-Uniform boundary conditions. *J. Sound Vib.*, 255(2): 203-228.
- ZHAO, S., WEI, G.W. and XIANG, Y. 2005. DSC analysis of free-edged beams by an iteratively matched boundary method. *J. Sound Vib.*, 284: 487-493.

ZHANG, Y.Q., LIU, G.R. and XIE, X.Y. 2005. Free transverse vibrations of double-walled carbon nanotubes using a theory of nonlocal elasticity. *Phys. Rev. B*, 71: 195404.

ZHANG, Y.Q., LIU, G.R. and LIU, X. 2007. Thermal effect on transverse vibrations of double-walled carbon nanotubes. *Nanotechnol.*, 18: 445701.

## ÖZGEÇMİŞ



Murat GÜRSES, 1982 yılında BEYŞEHİR' de doğdu. İlkokulu Kayseri Ahmet Paşa İlkokulu' nda tamamladı. Orta öğrenimini Elazığ Anadolu Lisesi'nde, lise öğrenimini Konya Meram Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2001 yılında girdiği Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü' nden 2006 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2006 yılında Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı' nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. "Düzgün geometriye sahip nano plakların Diferansiyel Quadratur ve Ayrık Tekil Konvolüsyon yöntemiyle analizi" konulu yüksek lisans tezini başarıyla sunarak 2008 yılında İnşaat Yüksek Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2009 yılında askerlik görevini bitirmiş olup 2010 yılında Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora öğrenimine başladı. Akademik çalışmalarının yanında özel ve kamu sektöründe de çalışmalar yapan Murat GÜRSES, 2006-2008 yılları arası GHC Mühendislik Ltd.Şti.'nde proje mühendisi, 2009-2014 yılları arasında Aksal Çelik Konstrüksiyon Ltd.Şti.'nde proje, imalat ve kalite kontrol mühendisliği görevlerinde bulunmuştur. 2014 yılının başından itibaren Karayolları 13. Bölge Müdürlüğü'nde Kontrol Mühendisi olarak göreve başlamış ve halen bu görevi sürdürmektedir. Murat GÜRSES evli ve bir çocuk babasıdır.