

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



DEĞİŞKEN KESİTLİ MİKRO KOLONLARIN BURKULMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

Vusal NAZAROV

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKİM 2020

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DEĞİŞKEN KESİTLİ MİKRO KOLONLARIN BURKULMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

Vusal NAZAROV

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKİM 2020

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN KESİTLİ MİKRO KOLONLARIN BURKULMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

Vusal NAZAROV
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 27/10/2020 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Doç. Dr. Mehmet AVCAR

Three handwritten signatures in blue ink are present on the right side of the page. The top signature is the most prominent and appears to be 'B. Akgöz'. Below it is a signature that looks like 'Ö. Civalak'. The bottom signature is less legible but appears to be 'M. Avcar'.

ÖZET

DEĞİŞKEN KESİTLİ MİKRO KOLONLARIN BURKULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Vusal NAZAROV

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ

Ekim 2020; 41 sayfa

Son yıllarda teknolojide yaşanan hızlı gelişmeler mikro ve nano boyutlu yapılar üzerindeki ilginin artmasına neden olmuştur. Gelişmiş birçok ülke nanoteknolojiyi öncelikli araştırma alanı olarak belirlemiştir. Sonuç olarak, mikron ve daha küçük boyutlardaki yapıların mekanik davranışları bilim dünyasının fazlaca ilgisini çeken bir araştırma alanı haline gelmiştir. Hem deneyler hem de atomik yaklaşımlar ile bu yapıların mekanik davranışları tespit edilmeye çalışılmıştır. Fakat bu çalışmalar maliyetli olmaları ve daha fazla zamana ihtiyaç duymaları nedeniyle sınırlı sayıda. Bu nedenle bu konu ile ilgilenen araştırmacılar sürekli ortam mekaniği yaklaşımlarına yönelmişlerdir.

Sunulan tez çalışmasında, elastik zemine oturan değişken kesitli mikro kolonların boyuta bağlı burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Modellemede değiştirilmiş gerilme çifti ve Bernoulli-Euler kiriş teorileri kullanılmıştır. Mikro kolonun nikelde yapıldığı ve homojen malzeme özelliklerine sahip olduğu varsayılmıştır. Mikro kolonun elastik bir zemin ile etkileşim halinde olması durumu Winkler elastik zemin modeli kullanılarak dikkate alınmıştır. Rayleigh-Ritz çözüm yöntemi kullanılarak bir ucu ankastre mesnetli diğer ucu serbest olan (konsol) değişken kesitli mikro kolonlar için kritik burkulma yükü hesabı yapılmıştır. Kritik burkulma yükü üzerindeki boyut ölçek parametresi, koniklik oranı ve elastik zemin etkileri incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Bernoulli-Euler kiriş teorisi, Boyut etkisi, Burkulma, Değiştirilmiş gerilme çifti teorisi, Elastik zemin, Kolon, Rayleigh-Ritz.

JÜRİ: Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Doç. Dr. Mehmet AVCAR

ABSTRACT

INVESTIGATION OF BUCKLING BEHAVIOR OF MICRO COLUMNS WITH VARIABLE SECTION

Vusal NAZAROV

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

October 2020; 41 pages

Recently, rapid advances in technology have led to an increased interest in micro and nano-sized structures. Many developed countries have identified nanotechnology as their most important research area. Consequently, the mechanical behavior of micron and smaller structures has become an area of research that has attracted much attention of the scientific world. The mechanical behavior of these structures has been tried to be determined by both experiments and the atomistic approaches. However, these studies are limited because they are expensive and require more time. For this reason, researchers interested in this topic have turned to continuum mechanics approaches.

In this thesis, the size-dependent buckling analysis of micro columns with variable cross-section on elastic foundation is performed. Modified couple stress and Bernoulli-Euler beam theories are used in modeling. It is assumed that the micro column is made of nickel and has homogeneous material properties. The interaction of this micro column with an elastic foundation is considered using Winkler elastic foundation model. Critical buckling load calculation is made by using Rayleigh-Ritz solution method for micro columns with variable cross-section in which one end is clamped and the other end is free (cantilever). The effects of length scale parameter, taper ratio, and elastic foundation on critical buckling load are investigated.

KEYWORDS: Bernoulli-Euler beam theory, Buckling, Column, Elastic foundation, Modified couple stress theory, Rayleigh-Ritz, Size effect.

COMITTEE: Asst. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Assoc. Prof. Dr. Mehmet AVCAR

ÖNSÖZ

Son yıllarda nanoteknolojide yaşanan gelişmelere paralel olarak nanoteknolojinin uygulama alanının giderek artmasıyla birlikte üstün fiziksel, kimyasal, optik ve mekanik özelliklere sahip mikro ve nano ölçekli yapıların modellenmesi ve analizleri, bilim çevresinin yoğun ilgisini çeken bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu boyutlardaki yapılara örnek olarak nanotel, nanotüp, nanoplak, mikro çubuk, mikro kiriş, mikrotüpçük, mikro ve nano-elektromekanik devre elemanları ile Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) verilebilir. Bu yapılardan en iyi şekilde verim alabilmek için mekanik davranışlarının (eğilme, burkulma, titreşim gibi) tam olarak biliniyor olması gerekmektedir.

Sunulan yüksek lisans tezi kapsamında, boyutları mikron ve daha küçük mertebede olan değişken kesitli kolonların değiştirilmiş gerilme çifti teorisine dayalı modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Konik şekle sahip bir ucu ankastre mesnetli diğeri serbest mikro kolonların aksenal basınç yükü etkisi altında ve elastik zemin üzerinde olması durumu dikkate alınarak burkulma davranışı incelenmiştir. Elastik zemin ile yapı arasındaki etkileşimler Winkler elastik zemin modeli ile hesaplamalara katılmıştır. Rayleigh-Ritz yöntemi ile özdeğer problemi çözülerek çeşitli parametrelerin kritik burkulma yükü değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Yüksek lisans öğrenim hayatım boyunca yoğun programına rağmen bana zaman ayıran ve tezimin yazılmasında danışmanlık yapan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ'e, arkadaşlarım Arş. Gör. Hayri Metin NUMANOĞLU'na, Abdul Qadeer MENHAJ'a ve maddi- manevi her zaman destek olan aileme teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Nanoteknoloji Bilimi.....	2
1.1.1. Nanoteknolojiye giriş.....	2
1.1.2. Nanoteknolojinin tarihçesi.....	4
1.1.3. Nanoteknolojinin avantajları.....	5
1.2. Nanoteknolojinin Uygulama Alanları.....	6
1.2.1. Malzeme ve imalat sektörü.....	6
1.2.2. Nanoelektrik ve bilgisayar teknolojileri.....	7
1.2.3. Sağlık sektörü.....	7
1.2.4. Havacılık ve uzay araştırmaları.....	7
1.2.5. Tekstil sektörü.....	7
1.2.6. Ulaştırma sektörü.....	8
1.2.7. Kozmetik malzemeler.....	8
1.2.8. İnşaat ve mimari.....	8
1.2.9. Çevre ve enerji.....	9
1.2.10. Nanokarakterizasyon.....	10
1.2.11. Nanofabrikasyon.....	10
1.2.12. Askeri alan ve savunma sektörü.....	10
1.2.13. Biyoteknoloji.....	11
1.3. Karbon Nanotüpler.....	11
1.4. Nikel Elementinin Özellikleri.....	12
1.5. Değişken Kesitli Kolonlar.....	13
1.6. Winkler Zemin Modeli.....	15

2. KAYNAK TARAMASI	17
3. MATERYAL VE METOT	25
3.1. Formülasyon.....	25
3.2. Değişken Kesitli Mikro Kolonlar İçin Burkulma Problemi	26
3.3. Rayleigh-Ritz Yönteminin Uygulanması	27
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	29
5. SONUÇLAR	35
6. KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Değişken Kesitli Mikro Kolonların Burkulma Davranışının İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

27/10/2020

Vusal NAZAROV



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_x	: Kesit alanı
A_o	: Başlangıç noktasındaki kesit alanı
β	: Koniklik oranı
b	: Değişken kesit genişliği
b_0	: $x = 0$ 'daki kesit genişliği
c_i	: Şekil fonksiyonu sabiti
E	: Young modülü
ε_{ij}	: Şekil değiştirme tansörü
G	: Kayma modülü
h	: Değişken kesitin yüksekliği
h_0	: $x = 0$ 'daki kesit yüksekliği
I_x	: Değişken kesitin atalet momenti
I_0	: Değişken kesitin başlangıç noktasındaki atalet momenti
K_w	: Boyutsuz zemin parametresi
k_w	: Winkler zemin parametresi
Π	: Toplam minimum potansiyel enerji
N	: Polinom sayısı
θ_i	: Dönme vektörü
P	: Eksenel basınç kuvveti
P_{kr}	: Kritik burkulma yükü
σ_{ij}	: Gerilme tansörü
L	: Kolon boyu
δ_{ij}	: Kronecker deltası
λ	: Lamé sabiti

U	: Şekil değiştirme enerjisi
w_x	: Deneme fonksiyonu
V	: Eksenel kuvvetin potansiyeli
ν	: Poisson oranı

Kısaltmalar

AKM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
BKBY	: Boyutsuz Kritik Burkulma Yüğü
ÇDKNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
DGÇ	: Değiştirilmiş Gerilme Çifti
GDKM	: Genelleştirilmiş Diferansiyel Kuadratür Metodu
GDKEM	: Genelleştirilmiş Diferansiyel Kuadratür Eleman Metodu
GPa	: Gigapaskal
KT	: Klasik Teori
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
MKM	: Manyetik Kuvvet Mikroskobu
NEMS	: Nano Elektro Mekanik Sistemler
Ni	: Nikel
TDKNT	: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
TTM	: Taramalı Tünelleme Mikroskobu
TUM	: Taramalı Uç Mikroskobu
VİM	: Varyasyonel İterasyon Metodu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Nanoanahtar (Kalaugher, 2003).....	2
Şekil 1.2. Ksenon atomları ile yazılan IBM yazısı (Anonymous 1)	4
Şekil 1.3. (a) Taramalı tünelleme mikroskobu düzeneği (Anonymous 2) , (b) Verdiği görüntü (Anonymuos 3)	5
Şekil 1.4. Nanoteknoloji ürünü basit bir pompa (McLaughlin,2015).....	6
Şekil 1.5. Kendi kendini temizleme özelliğine sahip nanokaplama uygulanmış ve uygulanmamış cam malzeme yüzeyindeki su hareketi (Anonymuos 4).....	6
Şekil 1.6. Hücre tedavisinde kullanılan nanopartikül modeli (Anonim 1)	7
Şekil 1.7. (a) Lotus yaprağı üzerindeki su damlaları (Anonim 2), (b) Nanoteknoloji ürünü su geçirmeyen kumaş (Anonim 3)	8
Şekil 1.8. UV koruyucu nanokaplama uygulanmış ahşap malzeme (Yılmaz, 2014)	9
Şekil 1.9. Güneş panelleri (Anonim 4)	9
Şekil 1.10. Nanosensörler ile donatılmış askeri ekipman (Anonim 5)	10
Şekil 1.11. Uzay asansörü modeli (Anonymous 4).....	12
Şekil 1.12. Doğada saf nikel elementi (Anonim 1).....	13
Şekil 1.13. Atomik Kuvvet Mikroskobunun uç kısmı (Anonymous 5).....	13
Şekil 1.14. Devlet bayrak meydanındaki Azerbaycan bayrağı (Anonim 2)	14
Şekil 1.15. Silindirik bir silo projesi (Anonim 3)	15
Şekil 1.16. Tekil yük etki eden Winkler zemin modeli	15
Şekil 3.1. Doğrusal değişken kesitli kolon	27
Şekil 3.2. Elastik zemine oturan değişken kesitli kolon modeli	28
Şekil 4.1. Kesit alanı oranının kolon uzunluğu boyunca farklı koniklik oranına bağlı olarak değişimi	31
Şekil 4.2. Atalet momenti oranının kolon uzunluğu boyunca farklı koniklik oranına bağlı olarak değişimi	31
Şekil 4.3. Sabit ve değişken kesitli kolonların BKBY değerlerinin kiriş yüksekliğine bağlı olarak değişimi ($K_w = 0$)	32

Şekil 4.4. Elastik zemin etkisindeki sabit ve değişken kesitli kolonların BKBY değerlerinin kiriş yüksekliğine bağlı olarak değişimi ($K_w = 100$)	33
Şekil 4.5. Çeşitli koniklik oranları için klasik kritik burkulma yükü değerlerinin boyutsuz zemin parametresine bağlı değişimi ($L = 60h_0$)	33
Şekil 4.6. Çeşitli koniklik oranları için boyut etkili kritik burkulma yükü değerlerinin boyutsuz zemin parametresine bağlı değişimi ($l = 1.553\mu m, L = 60h_0$)	34

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Nano düzeydeki örneklerin boyutları (Loos, 2015)).....	3
Çizelge 1.2. Bazı malzemelerin mekanik özellikleri (Numanoğlu, 2017).....	11
Çizelge 1.3. k katsayısının zemin türlerine göre değerleri (Avcar, 2007).....	16
Çizelge 4.1. Homojen kolonların boyutsuz kritik burkulma yükü (BKBY) değerinin (PL^2/EI) terim sayısına göre yakınsaması	29
Çizelge 4.2. Elastik zemin etkisindeki üniform kolonların BKBY değerinin (PL^2/EI) değişimi	29
Çizelge 4.3. Farklı koniklik oranı ve elastik zemin parametresi değerleri için klasik kritik burkulma yükü değerleri (μN) ($h_0 = 2\mu m, L = 50, b_0 = h_0, l = 0$).	30
Çizelge 4.4. Farklı koniklik oranı ve elastik zemin parametresi değerleri için boyut etkili kritik burkulma yükü değerleri (μN) ($h_0 = 2\mu m, L = 50h_0, b_0 = h_0, l = 1.553\mu m$)	30

1. GİRİŞ

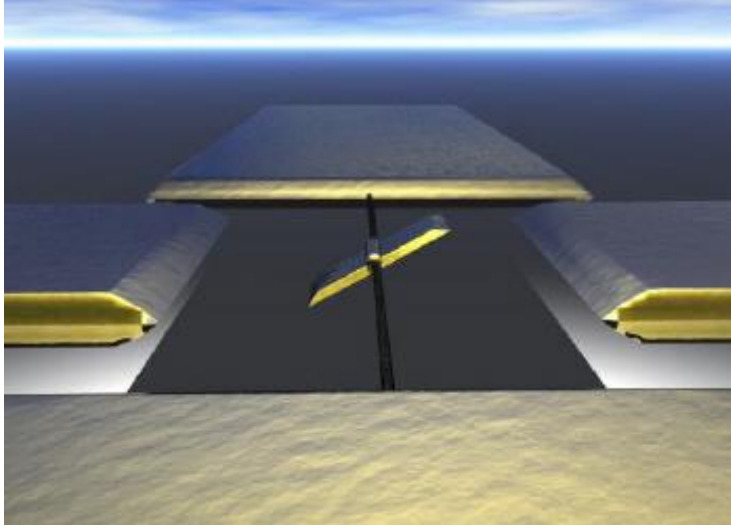
Mikro ve nano ölçekli sistemler, sağlık, savunma, elektronik, otomotiv, uçak-uzay araştırmaları ve tekstil gibi önemli alanlarında yaklaşık son yirmi yıldır yoğun bir biçimde kullanılmakta olup gelecekteki uygulamalarının giderek artacağı tahmin edilmektedir. Teknolojinin daha da gelişmesi ile birçok alanda problemlerle ilgili farklı çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. İşte bu noktada “nanoteknoloji” denilen kavram, araştırmacıların karşısına çıkan anahtar kelimelerden birisidir.

Araştırıldığı zaman Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Çin, Avrupa Birliği ülkeleri nanoteknolojiyi öncelikli çalışma alanları arasına aldılar. Bunun sonucu olarak da çok önemli Ar-Ge çalışmalarını gerçekleştirdiler. Bu bilimin öneminin artmasıyla beraber dünya genelinde birçok toplum nanoteknoloji konusunda öne çıkmak için çalışmalarına hız kazandırdı. Bu açıklananlar doğrutusunda nanoteknoloji bilimi günden güne gelişmektedir ve ilerleyen çağımızın vazgeçilmezi olacağı açıktır.

Son yıllarda nanoteknolojide yaşanan gelişmelere paralel olarak nanoteknolojinin uygulama alanının giderek artmasıyla birlikte üstün fiziksel, kimyasal, optik ve mekanik özelliklere sahip mikro ve nano ölçekli yapıların modellenmesi ve analizleri, bilim çevresinin yoğun ilgisini çeken bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu boyutlardaki yapılara örnek olarak nanotel, nanotüp, nanoplak, mikro çubuk, mikro kiriş, mikrotüpçük, mikro ve nano-elektro mekanik devre elemanları (MEMS ve NEMS) ile Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) verilebilir. Mikro ve nano boyutlu yapılardan en iyi verimi elde edebilmek için tasarım aşamasında bu yapıların mekanik karakteristiklerinin tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Hem deneyler hem de atomik seviyede gerçekleştirilen yaklaşımlar (Moleküler dinamik simülasyonu gibi) ile bu yapıların mekanik davranışları tespit edilmeye çalışılmıştır.

Deneysel çalışmaların ve atomik düzeyde oluşturulan modellerle yapılan yaklaşımların maliyetli olmaları, karmaşık ve uzun işlemlerden dolayı daha fazla zamana gereksinim duymaları gibi nedenlerden dolayı kullanımları sınırlı olmaktadır. Ayrıca, çoğu durum için de bu mümkün (fizibil) olmamaktadır. Bu nedenlerden dolayı sürekli ortam mekaniğine dayalı modellerin kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır. Önceleri geleneksel elastisite teorileri ile oluşturulan modeller kullanılmış fakat boyut etkisi dikkate alınmadığından elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların birbirinden farklı oldukları tespit edilmiştir. Boyut etkisini dikkate alan teoriler içinde en fazla kullanılan ise lokal (yerel) olmayan elastisite teorisi olup literatürde özellikle nano boyutlu yapıların modellenmesinde bu teorinin kullanıldığı pek çok çalışma bulunmaktadır.

Farklı biyomoleküllerin tespiti veya araştırılması için nano anahtarlar biyomedikal, gıda ve çevre endüstrisi alanlarında büyük ilgi görmüştür. Nanometre ölçeğinde aktif moleküllerin kontrolü için Jyvaskyla Üniversitesi ve Tampere Üniversitesi'ndeki araştırmacılar, iletken bir yüzeye bağlı altın nanopartikülün konumunu izlerken elektrik alanları kullanılarak akımı tersine çevirerek bir nano anahtar şeması geliştirdiler. Nano anahtarlar karbon nanotüp tabanlı elektronik devrelerde kullanılır. Şekil 1.1'de nano anahtar modeli gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Nano anahtar (Kalaugher, 2003)

Nispeten daha yeni teorilerden olan değiştirilmiş gerilme çifti teorisi ile bu tip yapılar üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıda olup kesiti uzunluk boyunca sürekli değişen nikelde üretilmiş elastik zemine oturan mikro kolonların boyut etkili burkulma analizi ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır.

Sonulan tez çalışmasında değiştirilmiş gerilme çifti teorisi kullanılarak çubuk modelleri incelenmiştir. Rayleigh-Ritz yöntemi ile farklı parametreler için özgün sonuçlar elde edilmiştir. Rayleigh-Ritz yöntemi ile bir ucu ankastre mesnetli diğer ucu serbest mikro kolonunun çeşitli parametreler için kritik burkulma yükü değerleri bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar tablo ve şekiller ile sunulmuştur. Bu sayede konuyla ilgilenen araştırmacılar karşılaştırma yapmak için bu tez çalışmasında elde edilen verileri kullanabileceklerdir.

1.1. Nanoteknoloji Bilimi

1.1.1. Nanoteknolojiye giriş

Günümüz teknolojisi ile üretilen ürünlerin günden güne daha gelişmiş olmasının, daha az yer kaplamasının ve daha hafif duruma gelmesinin altında nanoteknoloji biliminin uygulamaları yatmaktadır. Nano, Yunanca “nannos” kelimesinden gelir ve "cüce" anlamını taşır. Ölçü birimlerinden olan nanometre, metrenin 10^{-9} katıdır. Atomik ve moleküler seviyedeki birimleri ifade etmek ve bu boyutlarda maddenin kontrolünü yapmak için kullanılan nanoteknoloji kısaca "Atomik boyuttaki sistemlerin mühendisliği" olarak tanımlanır ve nanoteknoloji, nanometre mertebesindeki ölçülerde uğraş alanı bulur.

Nanobilimin uğraş alanındaki ölçüleri yansıtabilmek amacıyla bazı örneklerin boyutları Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Nanodüzeydeki örneklerin boyutları (Loos, 2015)

Örnek	Boyut
İnsan saç teli çapı	10^5 nm
Bakteri	10^2 nm
Ribozom organeli çapı	25 nm
DNA molekülü çapı	10 nm
Su molekülü	0.1 nm
Virüs	10^3 nm
Karıncı başı genişliği	10^6 nm

Nanoteknoloji kavramı üzerinde ilk görüşü Dr. Eric Drexler ortaya atmıştır. Drexler, biyolojik sistemlerden yola çıkarak moleküler makinelerin yapılabileceğini söylemiştir (Drexler 1986).

Nanoteknolojinin temel felsefesi malzemenin ultra moleküler özelliklerinin fenni bilimlerle yorumlanarak bu özelliklerin ihtiyaca uygun ve daha üstün ürüne dönüşümüyle sonuçlanmasıdır. Nanoteknolojik çalışmaların temelinde atomların özelliklerine göre istenilen dizilimde düzenlenebiliyor olmalarının yanı sıra malzemenin mikro yapısına inildiğinde o malzemenin çok daha farklı özelliklerinin ortaya çıkması durumu yatar. Böylelikle daha dayanıklı, daha hafif, daha az yer kaplayan, daha farklı termal ve elektrik iletkenlik özelliklerine sahip malzemeler elde edilebilir.

Bu noktada bir husus çok iyi bilinmelidir. Malzemenin makro yapısında geçerli olan geleneksel fizik kuralları artık nano yapıda geçerli olmamaktadır. Nano yapı üzerinde artık kuantum fiziği kuralları işlemeye başlar. Çünkü atomun yapısı, büyüklüğü ve geometrisi, dışarıdan sisteme bağlanan yabancı bir atomun varlığı, malzemenin çok farklı ve olağanüstü davranışlar göstermesine sebep olur ve ancak kuantum fiziği kuralları ile açıklanabilir. Mevcut nanoyapıya yabancı bir atomun eklenmesi elektronik ve manyetik özellikleri değiştirmektedir.

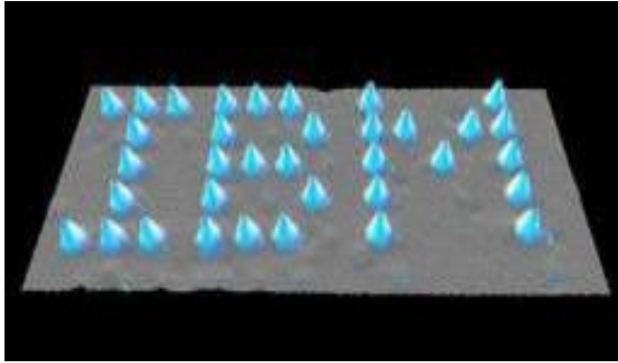
Nanobilimin fizik, kimya, mühendislik, sağlık, endüstri, havacılık, elektronik gibi birçok disiplinin gelişiminde etkisi büyüktür. Bu nedenle birçok gelişmiş ülke tarafından bu bilim en kritik araştırma alanı olarak desteklenmektedir. Araştırıldığı zaman Almanya, Japonya, Çin, Amerika Birleşik Devletleri gibi global ekonomik güçler, Avrupa Birliği gibi topluluklar inanılmaz yatırımlar yapmaktadırlar. Güney Kore merkezli Samsung Firması, çalışmalarını tamamen MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) teknolojisi üzerine gerçekleştirmektedir. Ulusal Nanoteknoloji Merkezi, National Nanotechnology Initiative, Institute of Nanotechnology örnekleri ile daha birçok organizasyon nanoteknoloji alanında çalışmalarını yürütmektedir. Lazerlerden mikrosensörlere, manyetik çiplerden biyomedikale, güneş pillerinden savunma sanayisine bu bilim için yapılan yatırımlar 1990'lı yılların ortalarında yaklaşık 500 milyon dolar gibi bir miktarla ifade edilirken günümüzde bu değer 10 katından fazladır. Kısacası, nanoteknoloji biliminin teknolojinin hızla ilerlediği çağımızın vazgeçilmezi olacağı tartışmasızdır.

1.1.2. Nanoteknolojinin tarihçesi

1959 yılında Nobel Fizik Ödülü sahibi Richard Feynman, Amerikan Fizik Derneği'nin toplantısında ünlü bir konferans vermiştir. Bu konferansta Feynman, nesne özelliklerinin atomik düzeyde kontrol edilebilmesinin mümkün olduğunu ve bunun başarılabilmesi durumunda icat edilebilecek yeni buluşlardan söz etmiştir. Fakat Feynman, nanoteknoloji kavramını ortaya atmadı. Bu görüşünü bir başka konuşmasında “Her şeyi küçük bir ölçekte yönlendirme ve denetleme” olarak dile getirdi. Feynman, nano buluşların minyatürize edilmiş aygıtlarla yönetilebileceğini vurguladı.

1974 senesinde Tokyo Science Üniversitesi'nden Norio Taniguchi tarafından yazılan bir makalede nanoteknolojiye tanım getirilmiştir. Buna göre nanoteknoloji, “maddelerin bir atom ya da molekül tarafından ayrılması, birleştirilmesi ve bozulması yöntemi” olarak tanımlanmıştır.

80'li yıllardaki diğer çalışmalardan bahsedilecek olursa 1986'da Eric Drexler tarafından kurulan Foresight Enstitüsü, ilk nanoteknoloji organizasyonudur. Eric Drexler, 1988 yılında ilk nanoteknoloji dersini verdi. Aynı yıl ilk defa tek elektron transistor icat edilmiştir. IBM bilim adamı olan Don Eigler, 1989 yılında ksenon atomlarını kullanarak nikel bir yüzeye IBM harflerini yazmıştır. Şekil 1.2'de bu yazı gösterilmiştir.

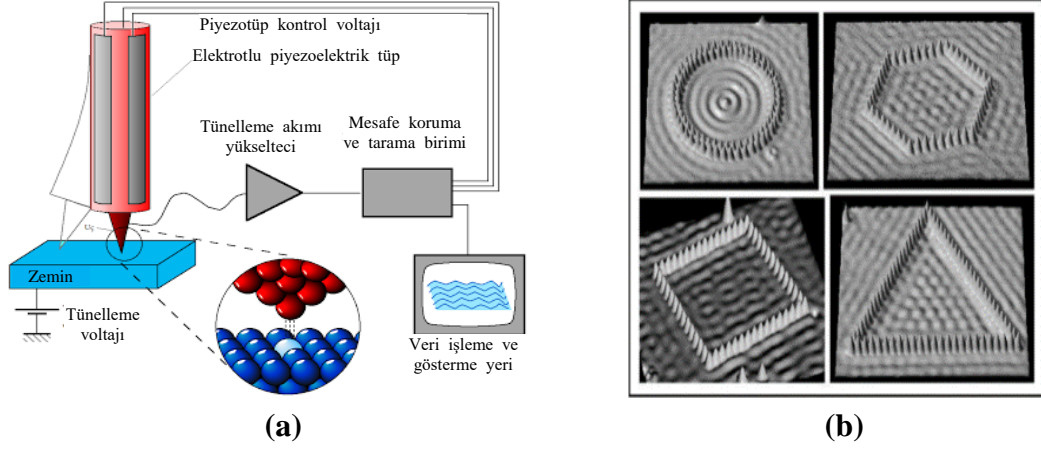


Şekil 1.2. Ksenon atomları ile yazılan IBM yazısı (Anonymuos 1)

Bunun dışında farklı yerlerde bu tür çalışmalar yapılmıştır. Almaden Araştırma Merkezinde 35 tane karbonmonoksit molekülünü yan yana dizilerek bakır bir tabaka üzerine yazı yazılmıştır. Bu yazının yüksekliği $1/250000$ mm , genişliği ise $1/333000$ mm kadardır. Bir saç telini referans alırsak , saç telinin kapladığı alana yaklaşık 250 milyon tane bu tabakadan sığmaktadır.

1980'li yıllarda E. Drexler, molekülleri olasılık yöntemleri yerine deterministik yöntemlerle işlemeyi detaylı bir şekilde incelemiştir. 1981 yılında ilk nanoteknoloji makalesini yayınlamıştır. 1981 yılında G. Binnig ve H. Rohrer, Taramalı Tünelleme Mikroskobunu (TTM) ürettiler. Bu mikroskop ile atomların yerlerinin istenildiği gibi değiştirilmesi ve atomsal tepkimelerin izlenmesi mümkün olmuştur. Bu buluşları, onlara 1986'da Nobel Ödülü'nü kazandırmıştır. Şekil 1.3'te taramalı tünelleme mikroskobu düzeneği modellenmiştir. Yine bu zaman dilimi içerisinde bu mikroskobun türevlerinden Atomik Kuvvet Mikroskobu geliştirildi. Öte yandan teknolojinin

gelişmesiyle birlikte bilgisayarlar gelişmiş ve nano boyutlarda ölçümler yapılabilir hale gelmiştir.



Şekil 1.3. (a) Taramalı tünelleme mikroskobu düzenneği (Anonymuos 2) , **(b)** Verdiği görüntü (Anonymuos 3)

1.1.3. Nanoteknolojinin avantajları

Yapıların makro boyutunda geçerli olan klasik fizik kuramları, mikro yapıda geçersiz hale gelir, mikro yapı için artık kuantum fiziği devreye girer. Böylelikle fiziğin ilişkili olduğu optik, elektromanyetizma ve birçok alanda yeni uygulamalar ortaya çıkarılmaktadır. Bu söylenenlerden dolayı nanoteknoloji genel amaçlı teknoloji olarak tanıtılır. Bu genel amaçlı teknolojinin şu an gerçekleştirdiklerinin dışında gelecekte de gerçekleştirebileceği şeyler göz önüne alınırsa nanoteknolojinin ilerleyen çağın vazgeçilmezi olacağı düşünülmektedir.

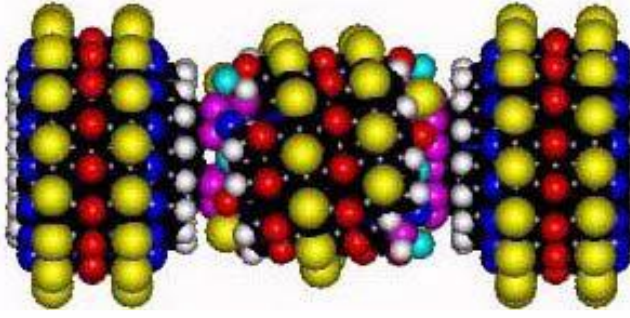
Malzemelerin atomik yapısında gerçekleştirilen değişimler o malzemenin yepyeni özellikler kazanmasını sağlamaktadır. Yeni özelliklerine göre farklı ürünlere dönüşebilen malzemelerin daha dayanıklı, daha hafif, daha az yer kaplayan, daha farklı iletkenlik özelliklerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum nano-düzeyde çalışmanın önemli bir avantajıdır.

Endüstrinin tüm dallarını ilgilendiren ve belki de bunların hepsini yönetecek çok büyük bir kavram, "nanofabrikalar" ortaya atılmıştır. Nanofabrikaların düşük maliyette ve yüksek hızda çalışacağı öngörülmektedir.

Nanoteknoloji sayesinde bilişim, tıp, tarım, biyoteknoloji, enerji ve birçok alanda yeni ürünler elde edilmektedir ve bu çalışmaların devamı geleceği öngörülmektedir. Bu durumda üretimin süreci ve yöntemi artık değişecektir. Nanoteknolojiyi kullanan ülkelerde toplumların gelişmişlik düzeyinin artacağı ve yaşam kalitelerinin doğal olarak yükseleceği düşünülmektedir.

Nanoteknolojik ürünlerin tasarımı da apayrı bir konudur. Malzeme özellikleri ve makinelerin çalışma prensipleri, çoğu zaman 100 nm 'den büyük boyutlar göz önüne alınarak ortaya çıkarılmış geleneksel modelleme ve teorilere dayanmaktadır. Kritik

uzunluklar 100 nm'nin altına indiğinde ise bu modeller ve teoriler ortaya çıkan özellikleri açıklayamamaktadır. Bu varsayımlar altında süper küçük boyutta cihazların tasarımı yapılabilmektedir. Örneğin artık gelişmiş bilgisayarlar bakteri büyüklüğündeki boyutlara inebilmektedir. Spesifik olarak nano-mekanik konusuna değinecek olursak eğilme elemanlarının birçok problemi, nano-düzeyde ele alınabilmektedir ve tasarım problemi çözülebilmektedir. Şekil 1.4'te nanoteknoloji ürünü olan basit bir pompa modeli verilmiştir.



Şekil 1.4. Nanoteknoloji ürünü basit bir pompa (McLaughlin, 2015)

1.2. Nanoteknolojinin uygulama alanları

Günümüzde nanoteknolojinin birçok alanda uygulama alanları mevcuttur. Gün geçtikçe insan hayatındaki rolü ve önemi artmaktadır. Bu sayede yeni ürünlerle bazı problemlerin daha basit ve kesin çözülmesi öngörülmektedir.

1.2.1. Malzeme ve imalat sektörü

Atomik boyutta düzenlenen malzemelerin ortaya çıkan yepyeni özellikleri sayesinde daha sağlam, daha hafif, daha güçlü iletkenlik özellikli ürünler, endüstride devrim oluşturacak düzeydedir. Bu malzemelerin sayesinde nanotüplerin imalat yöntemi ve tekniği de gelişmektedir. Metal, seramik, polimer gibi malzemelerin üretim standartları değişmektedir. Üretim esnasında daha az enerji kullanımı, daha düşük maliyet, daha az atık oluşumu gibi parametrelerinin olacağı düşünülmektedir. Şekil 1.5'te su ile kendi kendini temizleyen cam yüzey gösterilmiştir.



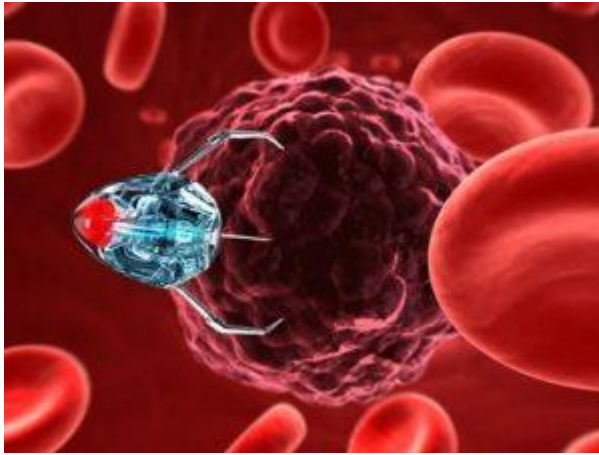
Şekil 1.5. Kendi kendini temizleme özelliğine sahip nanokaplama uygulanmış ve uygulanmamış cam malzeme yüzeyindeki su hareketi (Anonymuos 4)

1.2.2. Nanoelektrik ve bilgisayar teknolojileri

Nanoteknoloji etkisindeki bilişim ürünlerinin işlem gücü ve kapasiteleri artmaktadır. Geliştirilmekte olan Kuantum bilgisayarları bir süre sonra günümüzde kullanılan Core işlemcileri ile kıyaslanmayacak kadar yüksek bir seviyeye gelmektedir. Sensörler, gösterge cihazları ve sinyal işleyiciler alanında ciddi gelişmeler görülmektedir. Örnek verecek olursak, artık bilgisayarlar birçok sosyal ve ekonomik olaylar gibi parametreleri optimize ederek en uygun sonuçları ortaya çıkarabilecektir. Bu doğru öngörüler sayesinde ekonomik krizler ve çalkantılar önceden tahmin edilerek çözüm yöntemleri geliştirilebileceği düşünülmektedir.

1.2.3. Sağlık sektörü

Yaşayan mikro organizmalar ile etkileşime geçilebilecek boyutlarda araç üretimi ile tedavi yöntemleri geliştirilmektedir. Bu tür araçlar insan vücudunun her yerine yayılarak hangi kısımlarda sorun varsa oraya gidecektir. Hastalığın olduğu yerlere ilaç veren makinaların insan vücudu içinde hareket etmesine olanak tanıyacak teşhis araçları nanoteknolojinin bu sektöre olan etkilerini göstermektedir. Bu nanopartükellerin bir modeli Şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1.6. Hücre tedavisinde kullanılan nanopartikül modeli (Anonim 1)

1.2.4. Havacılık ve uzay araştırmaları

Oldukça maliyetli olan bu teknolojiye araçların ve malzemelerin ağırlığının azaltılabilecek olması ile maliyet düşürülecektir. Karbon nanotüplerin çeliğe göre oldukça yüksek olan çekme mukavemeti sayesinde yer yüzünden atmosfere kadar yükselebilecek yapıların inşa edilmesi düşünülmektedir. Böylelikle uzay araştırmalarının da maliyetinin düşürülebilmesi öngörülmektedir.

1.2.5. Tekstil sektörü

Nanoteknolojinin tekstil alanında da birçok uygulaması vardır. Bunlara örnek olarak geliştirilmekte olan üzerinde leke tutmayan kumaşlar , hafif ve sporcuların diğer ihtiyaçlarına cevap verebilecek spor ekipmanları örnek gösterilebilir. Lotus yaprağı

üzerindeki su damlacıklarından yola çıkılarak su geçirmez kumaşlar üretilmiştir (Şekil 1.7). Su molekülleri giysilerin üzerinden kayarak hareket etmektedir.



(a)



(b)

Şekil 1.7. (a) Lotus yaprağı üzerindeki su damlaları (Anonim 2), **(b)** Nanoteknoloji ürünü su geçirmeyen kumaş (Anonim 3)

1.2.6. Ulaştırma sektörü

Nanoteknoloji ürünü olan ince filmler sayesinde araçların boyalarına gelebilecek hasarlara karşı dayanıklılığı artırılmaktadır. Cam yüzeylere yapılan kaplamalar sürücüye daha iyi bir görüş açısı sunmaktadır. Kaporta panellerinin yapımında kompozit malzemelerin içerisine konulan nanokompozitler çarpışma esnasında ilave bir dayanım sağlamaktadır. Yakıt içerisine konan nanokatalizörler sayesinde araçların dışarıya yaydığı emisyonların azaltılabileceği düşünülmektedir. Bu sayede hem araçların performansının artacağı , hem de hava kirliliğinin azalacağı öngörülmektedir.

1.2.7. Kozmetik malzemeler

Nanoteknolojinin ve nanomalzemelerin uygulamalarında birçok bakım ürünleri bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak şampuanlar, saç bakım ürünleri , güneş kremleri , vücut losyonları ve makyaj ürünleri gösterilebilir. Dünyada önde gelen kozmetik üreticilerin neredeyse hepsi ürünlerinde nanomalzemeler bulunmaktadır. Günümüze baktığımız zaman kozmetik sektöründe nanoteknolojinin 2 ana kullanım alanı mevcuttur. Bunlar güneş kremleri ve yaşlanmayı geciktiren ürünlerdir. Yalnız nanoteknolojinin, bu sektör için oldukça yararlı olduğu söylenemez. Nanoteknolojinin zararlarının bu sektörde ayrıca ele alındığı da belirtmeliyiz.

1.2.8. İnşaat ve mimari

Nanoteknoloji ile imal edilen zemin – beton kaplaması olan mineral kökenli zeminler, aşınmalara ve kirlenmelere karşı direnç göstermektedir. Bu kaplama çimento veya beton gibi gözenekli malzemeler için sızdırmazlık sağlamaktadır. Kaplama uygulandıktan sonra sızdırmaz ve ultraviyole ışınları geçirmez yüzey elde edilebilir (Şekil 1.8). Nanoteknolojinin inşaat sektörü üzerindeki etkileri oldukça büyüktür ki bu anlatılanlarla sınırlandırılmaz. Tuğla , kiremit, seramik , fayans , doğal taşlar , kaplama malzemeleri boya malzemeleri ilk göze çarpanlardır. Nanoteknolojik ürünler sayesinde

malzemelerin dayanımlarını arttırmak, mevcut özellikleri iyileştirmek ve yeni ürünlerin geliştirilmesini sağlamak gibi birçok fırsatlar vardır. Nano-işlenmiş betonun normal betona kıyasla mukavemeti ve plastik özellikleri daha yüksektir. Nanokompozit çelik ise daha hafif ve dayanıklıdır. Bu teknoloji ile üretilen boya ve yalıtım malzemeleri kendi kendini temizler, su ve kiri üzerlerinde tutmazlar. İçerisindeki özel katkı maddeleri sayesinde antibakteriel özellikleri bulunur ve yanmaya karşı dirençleri artar. Isı, ses ve ışık yalıtımında da farklı uygulamaları mevcuttur.



Şekil 1.8. UV koruyucu nanokaplama uygulanmış ahşap malzeme (Yılmaz, 2014)

1.2.9. Çevre ve enerji

Nanoteknolojinin önemli çalışma alanlarından birisi olan hidrojen enerjisi, enerjinin verimli kullanılabilmesi, üretilip depolanabilmesi açısından önem taşır. Öte yandan çevre sorunlarının bulunması ve onarılması, farklı yerlerden gelen atıkların azaltılması ve önlenmesi de nanoteknolojinin çalışma alanına girer. Alternatif enerji kaynakları ile araçların verimliliklerinin de artabileceği, bunun için yakıt hücrelerinin, termoelektrik jeneratörlerin ve diğer kaynakların kullanılabilmesi bilinmektedir. Güneş panelleri ile temiz ve sürdürülebilir enerji elde edilmektedir (Şekil 1.9). Nanoteknoloji sayesinde daha verimli bir şekilde elektrik enerjisi alınmakla birlikte üretilen enerji yüksek kapasiteye sahip pillere depolanmaktadır.



Şekil 1.9. Güneş panelleri (Anonim 4)

1.2.10. Nanokarakterizasyon

Taramalı Uç Mikroskopları (TUM) üzerlerinde bulunan bir iğne yardımıyla altındaki yüzey ile arasındaki etkileşimleri çok küçük seviyede ölçerek malzemelerin görüntülenmesi sağlayan yeni tekniklere verilen isimdir. Atomik Kuvvet Mikroskobu , Taramalı Tünelleme Mikroskobu (TTM), Manyetik Kuvvet Mikroskobu (MKM) gibi aygıtların değişik özelliklerini ölçebilen yöntemler vardır. Bunlar vakumda, yüksek basınç altında, sıvı yüzey altında, havada, farklı ısı değerlerinde çalışabilir. Ayrıca bu yöntemler atomik seviyede görüntü verebilirler.

1.2.11. Nanofabrikasyon

Geleneksel olarak kullanılan optik litografi yöntemleri nano boyutlarda olan cihazları imal etme konusunda yetersiz kalacağı düşünülmektedir. Bu durumda nanoyapıların üretimi için yeni fabrikalar gerekmektedir. Buna göre bir süre sonra nanoyapılar içeren nanoelektronik temelli tümleşik entegre devrelerin yapımında elektron demet nanolitografi sistemleri kullanılması öngörülmektedir. Bu teknolojiler günümüzde nanoyapıların üretiminde en yaygın kullanılan sistemlerdir. Daha düşük mertebelerde elektron demetlerinin odaklanması teorik olarak mümkündür. Nanorobotların sağlık sektöründeki uygulamalarının da önemli olacağı bilinmektedir. Örneğin kendini yenileyen nanorobotların bir hastalığın aşısı olarak davranabilmeleri hedeflenmektedir. Hastalığı oluşturan mikroorganizmaları tanıyıp yok etmek ile görevli bu nanorobotlar ile daha önce tedavisi olmayan hastalıklara çözüm bulunabileceği düşünülmektedir.

1.2.12. Askeri alan ve savunma sektörü

Nanoelektronik kullanım alanlarında haberleşme araçlarını üretmek ve insan gücünü en aza indirmek için robotik sistemlerinin yapılması başta gelmektedir (Şekil 1.10). Olası bir nükleer felakette zararlı gazların ve radyoaktif serpintilerin erken tespit edilebilmesi için nano algılayıcılar üretilmesi bu sektörde planlanmaktadır. Bunlar dışında gelişmiş kamuflaj ve akıllı giyecekler üretilmesi bu konuda öne çıkmaktadır. Bu sayede askerler daha güvenli bir şekilde iletişim kurabilir ve görevlerini yapabilirler.



Şekil 1.10. Nanosensörler ile donatılmış askeri ekipman (Anonim 5)

1.2.13. Biyoteknoloji

Biyolojik yapıtaşlarının suni yapıların içine koyulmasıyla daha üstün fiziksel özelliklere sahip olan malzemelerin üretilmesi mümkündür. Bununla birlikte ekinleri zararlı böceklere karşı korunması için moleküler boyutta kimyasal maddelerin geliştirilmesi sağlanmaktadır. DNA testleri için nano ölçekte kontrol yöntemleri geliştirilmektedir. Günümüzde bile bitki ve hayvan genlerinin değiştirilmesiyle ortaya çıkarılan birçok farklı ürün vardır.

1.3. Karbon Nanotüpler

Karbon nanotüpler, nanoteknolojinin yapıtaşı olarak tanımlanabilir. Nanoteknoloji kullanılarak imal edilen pek çok üründe karbon nanotüp adı verilen karbon elementinin allotropu olan yani aynı elementin uzayda farklı geometri gösteren türleri olan silindir şeklindeki tüpler kullanılır. Tüpler, karbon atomlarının birbiriyle altıgen oluşturacağı şekilde ve bu altıgenlerin birbirine bağlanmasından oluşan grafen adlı örtünün tek duvar veya çok duvar oluşturmasıyla meydana gelir. Isı ve elektrik iletkenliği, sağlamlık, düşük yoğunluk, az yer kaplama ve bir takım mekanik özelliklerinin diğer malzemelere göre çok daha yüksek olması, karbon nanotüplere önemli bir avantaj kazandırmaktadır.

Çizelge 1.2. Bazı Malzemelerin Mekanik Özellikleri (Numanoğlu, 2017)

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Gerilme Dayanımı (GPa)	Yoğunluk (gr/cm ³)
TDKNT	1054	150	1.4
ÇDKNT	1200	150	2.6
Elmas	600	130	3.5
Çelik	208	1	7.3
Titanyum	116	0.434	4.5
Ahşap	16	0.008	0.4
Epoksi	3.5	0,005	1.25

Çizelge 1.2’de görüldüğü gibi karbon nanotüpler çelikten daha hafif olmasıyla birlikte dayanımları çok daha fazladır.

Karbon nanotüplerin üzerinde çalışmalar hızlandıkça insanlık tarihini farklı bir boyuta taşıyacak büyük projelerle ilgili ciddi çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bunlardan biri de uzay asansörü projesidir (Şekil 1.5). Günümüzde uzaya taşımacılık yapan devletlerin yanı sıra birçok özel şirket de bu alana yatırım yapmaktadır. Roketlerle taşıma işlemini gerçekleştirmek çok maliyetli olduğundan yeni çözümler aranmaktadır. Avrupa, Amerika ve Japonya uzay asansörü projesiyle ilgili çalışmalar yapmaktadır. Eğer testlerde bir sorun çıkmazsa Japonya 2040 yılından itibaren ilk uzay asansörünün inşaatına başlamayı hedeflemektedir.



Şekil 1.11. Uzay asansörü modeli (Anonymuos 5)

1.4. Nikel Elementinin Özellikleri

Bu çalışmada sonuçları elde etmek için saf element olan Nikel çubukların burkulması incelenmiştir. Nikel, kimyasal gösterimi “Ni” olan renk olarak ise gümüşe benzeyen metal türüdür. Mendeleyev tablosuna bakıldığında atom numarası 28’dir ve yer olarak 10. Grup ve 4. Periyotta bulunmaktadır. Atom ağırlığı ise 58.6 gr/mol’dür.

Nikel elementinin mekanik özelliklerini incelendiğinde zaman sert bir metal olduğu görülmektedir. Sert yapısına rağmen gevrek özelliğe sahiptir. Yani yüzey merkezli kübik yapısında olduğu için şekil değiştirmeye uygun haldedir. Sünek yapıda olduğu için alaşım elementi olarak dahil olduğu alaşımın darbe dayanımı arttırmaktadır. Normal şartlarda katı halde olduğu gözlemlenebilir. Nikelin erime sıcaklığı 1455°C’dir. Nikelin yoğunluğu 8.9 gr/cm³’dür ve demirden daha fazla yoğunluğa sahip olduğu görülmektedir. Nikelin Elastisite modülü 207 GPa ‘dır. Bu çalışmada kullanılan nikel çubuklar için boyut ölçek parametresi Lei vd. (2016)’a ait $l = 1.553 \mu m$ ve $l = 0$ olarak alınmıştır.

Yeryüzünde çok az çıkarılmasına rağmen nikelin kullanım alanları çok geniştir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte önemli bir element olmuştur. Günümüzde, en çok paslanmaz çelik imalatında ana alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.6’da doğada bulunan saf nikel elementi gösterilmiştir. Nikel, krom ile çeliğin paslanmazlık özelliğini kazanmasını sağlamaktadır. Oksijene karşı dayanıklı olduğu için saf nikel alaşım elementi olarak kullanıldığı zaman korozyona karşı da dayanım sağlamaktadır. Nikelin paslanmaz çelikten sonra en fazla kullanıldığı alanlardan biri kaplama uygulamalarıdır.

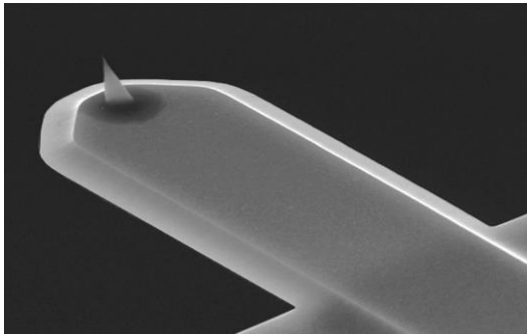


Şekil 1.12. Doğada saf nikel elementi (Anonim 6)

Jetlerin kullandığı motorlarda ve gaz türbinlerindeki çok yüksek olan ısılarda oksitlenme olması ve diğer reaksiyonlara karşı dayanıklı olma özelliklerinin ihtiyaç olduğu uygulamalarda "süper alaşım" adı verilen alaşım grupları kullanılır. % 56 oranında nikel ile % 19.5 oranında krom, molibden titanyum, alüminyum, demir, karbon ve bor içeren bir alaşım süper alaşımlara örnek gösterilebilir. Nikelin manyetik olma özelliği olduğu için demir, bakır ve alüminyum alaşımlarında da bu özelliğinden yararlanır. Saf durumda ya da safa yakın özellikteki nikel, güçlü alkali eriyiklerine karşı çok daha dayanıklı olduğu için, kimya endüstrisindeki çeşitli araçların yapımında ve para basımında da kullanılmaktadır. Araba parçalarındaki kullanılan krom kaplamaların alt kısımları nikel ile kaplanır.

1.5. Değişken Kesitli Kolonlar

Mühendislik yapılarında zaman ilk olarak onlardan ekonomik, estetik, ergonomik olmasıyla birlikte emniyetli olması da beklenir. Bu nedenle değişken kesitli kolonlar, kirişler, çatı sistemleri ve diğer yapı malzemelerinin kullanım alanının arttığı görülmektedir. İnşaat sektörünün yanı sıra değişken kesitli malzemeler uzay, sağlık, mekanik ve havacılık alanlarında da kullanılmaktadır. Buna örnek olarak Atomik Kuvvet mikroskobunun uç kısmını ele alabiliriz. AKM nanometre düzeyinde ölçüm yapabilme yeteneğine sahiptir. Şekil 1.7’de AKM’nun uç kısmı gösterilmiştir. Onun uç kısmında yer alan probu değişken kesitli bir konsol kiriş olarak modelleyebiliriz. Bu sayede hem maliyette hem de ağırlıkta azalma olur. Diğer bir taraftan ise mukavemeti ve verimliliği artar.



Şekil 1.13. Atomik Kuvvet Mikroskobunun uç kısmı (Anonymuos 6)

Değişken kesitli kolonların kullanım amaçları arasında estetikliği sağlamanın yanında yapının ağırlığının azalması suretiyle ölü yüklerin önemli derecede azaltması yer almaktadır. Günümüzde genel olarak uzun ve narin yapıların yükseldikçe kesitinin değiştiği söylenebilir. Gökdelenlerde ve bayrak direklerinde u durum rahatlıkla gözlemlenebilir. Yapının üst kısımlarının daralmasından dolayı kesit alanı azaldığından üst kısımlardaki rüzgar yüklerinden daha az etkilenecektir.



Şekil 1.14. Devlet bayrak meydanındaki Azerbaycan bayrağı (Anonim 7)

2010 yılında Bakü’de inşaa edilen bayrak direği ve dünyanın en yüksek bayrak direği unvanına sahiptir. Yüksekliği 162 metre, alt kısmının çapı 3.2 metre ve üst kısmının çapı 1.09 metredir (Şekil 1.8).

Tarımsal ürünleri toplanmasından sonra onların depolanması ve kullanılacağı zamana kadar muhafaza edilmesi önemli bir parametredir. Tahıl ürünleri yılın farklı zamanlarında hasat edilir fakat bu ürünlere bütün yıl boyunca ihtiyaç vardır. Tarım sektörü birçok koşula bağlı olduğu için her yıl aynı miktarda ürün elde edilememektedir. Bu sebepten bir yıl fazla hasat edilen ürünün depolanarak diğer yıllara da saklanması önem arz etmektedir. Ürünlerin saklanması kadar onların kolay bir şekilde yüklemesi ve boşaltılması da göz önünde bulundurulmalıdır.

Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin depolanması için silolar geniş olarak kullanılmaktadır. Silolara etki eden kuvvetler genel olarak kendi ağırlığı , düşey yükler ve diğer farklı sürtünme kuvvetleridir. Bu yapıların işlevsel olması için mühendislik ilkelerine göre projelendirilmesi lazımdır. Bunun için ihtiyaçlar detaylı bir şekilde belirlenerek optimum tasarım göz önüne alınmalıdır. Siloları çok farklı şekilleri ve tasarımları mevcuttur. Günümüzde genel olarak kare, dikdörtgen, silindirik ve sekizgen silolar kullanılmaktadır. Bunlar ayrı ayrı veya grup halinden hücreli şekilde yapılabilirler.



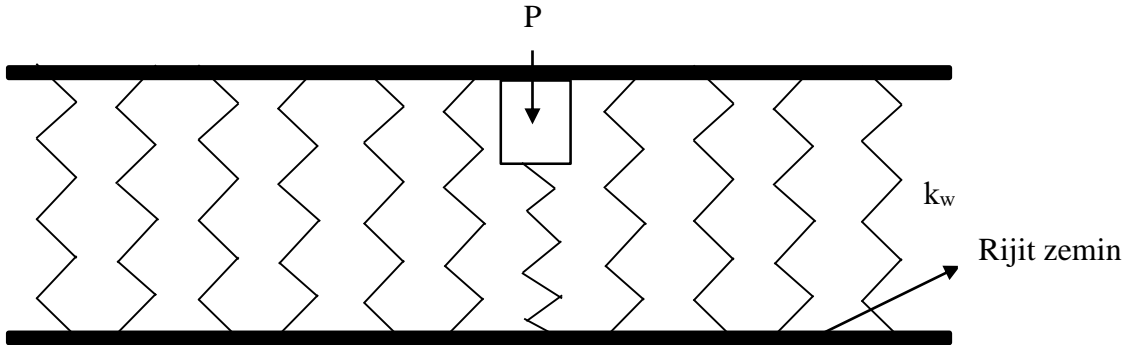
Şekil 1.15. Silindirik bir silo projesi (Anonim 8)

Şekil 1.9’da görüldüğü üzere silonun üst kısmı silindirik alt kısmı ise gittikçe daralan konik şeklidir. Bu sayede boşaltım esnasında kesintisiz bir yük akışı sağlanmıştır. Dikdörtgen ve silindirik kesitli silolar arasında bazı farklar vardır . Kare ve dikdörtgen kesitli silolar alan kaybı olmaksızın inşa edilebilir ve taşıyıcı elemanların hesaplanması ve boyutlandırması daha basittir. Silindirik siloların ise inşaat maliyetleri daha düşüktür. Kare ve dikdörtgen kesitli olanlarda cidar yükleri etki ederken, silindiriklerde ise çekme kuvvetlerinden dolayı ola zorlanmalar ve eğilme momentleri düşük olduğu için ihmal edilebilir bir düzeydedir.

1.6. Winkler Zemin Modeli

Modern yapılarda temel, yapı ve zemin etkileşimi dikkate alınması gereken en önemli parametrelerden biridir. Elastik zemin modelleri çok uzun yıllar önce bulunmuştur. Çünkü zeminin yapısını modellemek teorik olarak çok zordur. Bu yüzden bilim adamları onu geliştirerek bazı modeller ortaya çıkarmıştır. Bunların içinde en çok bilinenleri Filonenko-Borodich (1940), Hetenyi (1946), Pasternak (1954), ve Vlasov-Leont’ev (1966)’dır. Bu modellerin hepsi iki parametrelili zemin modelleridir.

Zemin modeller arasında ilk bulunan ve en fazla tercih edileni tek parametrelili Winkler zemin modelidir. 1867 yılında Winkler tarafından literatüre katılmıştır (Winkler, 1867). İlk başlarda bu model demiryollarında yer değiştirmeleri ve gerilmeleri analiz etmek için kullanılsa da daha sonraki yıllarda yapı- zemin etkileşimlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Diğer modellere daha basit olduğundan elastik zemine oturan kirişlerde genel olarak bu yöntem kullanılmıştır. Şekil 1.10’da Winkler zemin modeli sunulmuştur.



Şekil 1.16. Tekil yük etki eden Winkler zemin modeli

Winkler zemin modeline göre zemin bağımsız olarak birbirine yakın sonsuz sayıda yaydan oluşmaktadır. Bir noktadaki çökme diğer noktaları etkilemez. Zemin süreksiz bir ortam olarak ele alınır (Hetenyi, 1946). Burada, k_w elastik yay katsayısını, w zeminin düşey yer değişmesini, P etki eden basınç kuvvetini ifade etmektedir.

$$p(x, y) = k_w w(x, y) \quad (1.1)$$

Çizelge 1.3. k_w katsayısının zemin türlerine göre değerleri (Avcar, 2007)

Zemin Türü		KN/m ²
Kum (Kuru ve Nemli)	Gevşek	8.000 ~ 25.000
	Orta	25.000 ~ 125.000
	Yoğun	125.000 ~ 375.000
Kum (Doygun)	Gevşek	10.000 ~ 15.000
	Orta	35.000 ~ 40.000
	Yoğun	130.000 ~ 150.000
Kil	Gevşek	12.000 ~ 25.000
	Orta	25.000 ~ 50.000
	Yoğun	>50.000

2. KAYNAK TARAMASI

Klasik elastisite teorileri ile oluşturulan modellerde sadece makro seviyedeki şekil değiştirmeler dikkate alındığından dolayı mikro ve daha küçük boyutlu yapıların mekanik davranışlarının incelenmesinde boyut etkisi dikkate alınmamaktadır. Boyut etkisini hesaba katabilmek için ilave malzeme boyut parametresi içeren çeşitli yüksek mertebeden elastisite teorilerine dayalı modeller kullanılmaya başlanmıştır.

Kolonlara basınç yükü geldiği zaman belirli bir miktara kadar kolonun taşıma kapasitesinde ve geometrisinde bir değişiklik olmadan boyunun kısaldığı gözlemlenebilir. Yük daha da artırılırsa belirli bir kritik değere ulaşır ve kolonda şekil değiştirmeye neden olur. Böylece kolonda burkulma meydana gelir. Bu konuyla ilgili günümüzde ve çok eski yıllarda birçok çalışma yapılmış ve kitaplar basılmıştır. Leonhard Euler 1744 yılında elastik stabilite üzerine çalışmalar yapmıştır (Euler, 1744).

Bu tip yapılar üzerinde yapılan pek çok deneysel ve teorik çalışma sonucunda klasik teoriler ile yorumlanamayan bir boyut etkisinin varlığı tespit edilmiştir. Bundan dolayı mikro ve nano boyutlu yapıların modellenmesinde malzemeye ait çeşitli sayıda ilave boyut parametrelerine sahip yüksek mertebeden elastisite teorilerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur.

Bu teorilerden en yaygın olarak bilinenleri lokal olmayan elastisite (Eringen 1983), gerilme çifti (Mindlin ve Tiersten 1962; Koiter 1964; Toupin 1964), yüzey enerjili basit şekil değiştirme değişimi (Vardoulakis ve Sulem 1995), şekil değiştirme değişimi elastisite (Fleck ve Hutchinson 1993, 2001), değiştirilmiş gerilme çifti (Yang vd. 2002), değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi (Lam vd. 2003) ve lokal olmayan şekil değiştirme değişimi (Lim vd. 2015) elastisite teorileri şeklinde sıralanabilir.

Winkler'in geliştirdiği, zeminin elastik özelliğini ve yüke maruz kalan kısımların boyutları olmakla farklı parametrelere bağlı yatak katsayısının değeri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Zimmermann (1942) demiryolu traversleri üzerinden hesaplamalar yapmış ve k yatak katsayısı değerini farklı zemin türleri için hesaplamıştır. Bu çalışmada zemin boyunca uzanan traverslerin üzerine demiryolu rayları geldiği kabul edilmiştir.

Engin (1992) kiriş ve ince dairesel plakların zemine etki eden tekil yük altındaki davranışını ele almıştır. Tabakanın sadece basınç gerilmesi aktardığı ve belirli bir çökme değerinde plastikleştiği kabul edilmiştir. Bu çalışmanın sonunda yapının zeminden ayrıldığı yerde, tekil yükün şiddeti ve plağın yarıçapındaki değişim incelenmiştir.

Enine yüklere maruz kalan fonksiyonel derecelendirilmiş bir kiriş üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Sankar 2001). Young modülünün kalınlık boyunca üstel olarak değiştiği varsayılmış ve Poisson oranı sabit tutulmuştur. Elastik rijidite katsayılarının üstel değişimi, elastisite denklemleri için kesin bir çözüme izin verir. Gerilmelerin ve yer değiştirmelerin, fonksiyonel derecelendirilme yönünde Young modülünün belirli bir varyasyonu için tek bir boyutsuz parametreye bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Kiriş teorisinin, kademeli değişen enine yüklemeli uzun ve ince kirişler için geçerli olduğu bulunmuştur.

Lestari ve Hanagud (2001) çalışmalarında, farklı tipte sınır koşullarına sahip burkulmuş kirişler için kesin çözümleri elde edilmiştir. Burkulmuş kirişlerin titreşimlerinin diferansiyel denklemi, aksenal gerilmeyle ilgili kısıtlamalarla doğrusal olmadığı belirtilmiştir. Karşılık gelen doğrusal problemin sınır koşullarını kolaylıkla karşılayan modları ve Jacobi eliptik fonksiyonları kullanılarak doğrusal olmayan problem için doğal frekanslar elde edilmiştir. Burkulmuş kirişlerin dinamik analizi için çeşitli dönme kısıtlamalarına sahip analitik çözümler incelenmiştir.

Yang vd. (2002) çalışmalarında mikro ölçeğindeki malzemelerin deformasyon davranışının boyuta bağlı olduğu deneysel olarak göstermişlerdir. Silindirik bir çubuğun ve sonsuz genişlikte düz bir levhanın burkulması değiştirilmiş gerilme çifti teorisi ile analiz edilmiştir. Gerilme çifti teorisini geliştirmişlerdir. Avantaj olarak bir tane boyut ölçek parametresi içerir. Bu sebepten de kullanışlıdır.

Lee vd. (2002) değişken kesitli kolonların kayma deformasyonunu, daha sonra ise Lee vd. (2003) burkulma yükü altında elastik yay ile tutulan doğrusal daralan kolonları incelemiştir.

Lee vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada kayma deformasyonlu konik kolonların elastik davranışları analiz edilmiştir. Burkulma etkisi sınır koşullarını yöneten boyutsuzlaştırılmış diferansiyel denklemler ile kayma deformasyonunun etkisini dahil ederek Bernoulli-Euler kiriş teorisine göre türetilmiştir. Bu denklemler elastik burkulma yükünü elde etmek için sayısal olarak çözülmüştür. Diferansiyel denklemleri entegre etmek için Runge-Kutta yöntemi kullanılmıştır ve elastik burkulma yükünün bilinmeyen başlangıç değerini elde etmek için Regula-Falsi yöntemi kullanılmıştır. Benzer şekilde, kayma deformasyonunun burkulma sonrası davranış ve burkulma yükü üzerindeki etkilerine ilişkin parametrik ifadeler, örneğin kayma katsayısı, narinlik oranı ve kesit oranı hesaplamıştır. Doğrusal kolonlar için burkulma yükü denklemleri elde edilmiştir.

Wang vd. (2005) tarafından bir ve iki boyutlu taşıyıcı elemanların burkulma yüklerinin incelenmişlerdir. Onların burkulma problemi ile ilgili kesin sonuçları gösterilmiştir. Klasik Euler kolonları çeşitli yükler altında farklı mesnet türlerine ve etkilere bakılarak incelenmiştir.

Elastik zemine oturan prizmatik olmayan kolonların burkulma analizi ile ilgili sonuçları Rahai ve Kazemi (2006) tarafından elde edilmiştir. Bu çalışmada, konik kolon elemanlarının burkulma analizi için yeni bir yöntem formüle edilmiştir. Burkulma yüklerinin hesaplanması, değiştirilmiş titreşim modülü şekli ve enerji yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir kolon içindeki rijitliğin değişmesi, sivrilme indeksinin eklenmesiyle karakterize edilir. Sonuç olarak, bu yöntemden yararlanılarak ve durağan toplam potansiyel enerji prensibini uygulayarak, konik kolonların burkulma yükleri elde edilmiştir. Konik sütunlar üzerindeki çeşitli sayısal örnekler, önerilen analitik yöntemin doğruluğunu ve verimliliğini göstermiştir.

Park ve Gao (2006) Bernoulli-Euler kirişinin eğilmesi için yeni bir modeli değiştirilmiş gerilme çifti teorisi kullanarak geliştirmişlerdir. Yeni model, karakteristik bir malzeme uzunluğu ölçek parametresi içerir. Bu modelin doğrudan bir uygulaması olarak, konsol kiriş problemi çözülmüştür. Yeni geliştirilen model tarafından tahmin edilen konsol kirişin eğilme rijitliğinin, klasik kiriş modelinin öngördüğünden daha

büyük olduğu bulunmuştur. İki model tarafından tahmin edilen sapmalar arasındaki fark, kiriş kalınlığı küçük olduğunda çok önemlidir, ancak kiriş kalınlığının artmasıyla azalmaktadır. Bir karşılaştırma, tahmin edilen boyut etkisinin deneysel olarak gözlemlenenle oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir.

Lee ve Km (2006) , bu çalışmada burkulmuş kolonların geometrik doğrusal olmayan analizlerini ele almışlardır. Çalışmada hem koniklik, hem de kayma deformasyonunun etkileri yer alır. Genişlik, derinlik ve kare koniklik gibi üç kıstas dikkate alınmıştır. Bu tür kolonların elastik burkulma yüklerini elde etmek için diferansiyel denklemler sayısal olarak çözülmüştür. Her iki ucu mesnetli durum dikkate alınmıştır. Kayma deformasyonunun burkulma kolonun elastik burkulma yükü üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Kong vd (2008) Bernoulli -Euler mikro kirişlerinin boyut etkili doğal frekansı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Bernoulli-Euler kirişlerinin dinamik problemleri, değiştirilmiş edilmiş gerilme çifti teorisi temelinde analitik olarak çözülmüştür. Denge, başlangıç koşulları ve sınır koşullarının denklemleri, değiştirilmiş gerilme çifti teorisinin ve Hamilton ilkesinin temel denklemlerinin bir kombinasyonu ile elde edilmiştir. İki sınır değeri problemi (biri basit mesnetli kiriş ve diğeri konsol kiriş için) çözülmüş ve iki tür sınır koşulu için kirişin doğal frekansları üzerindeki boyut etkisi değerlendirilmiştir. Yeni model tarafından tahmin edilen kirişlerin doğal frekanslarının boyuta bağlı olduğu bulunmuştur.

Coşkun ve Atay (2009) farklı sınır koşullarına bağlı olarak sabit veya değişken kesitli kolonların kritik burkulma yükü değerlerini varyasyonel iterasyon metodunu (VİM) kullanarak belirlemişlerdir. Bu makalede, sabit ve değişken kesitli Euler kolonları için kritik burkulma yüklerinin belirlenmesi problemine varyasyonel iterasyon metodu uygulanmıştır. VİM, doğrusal olmayan adi ve kısmi diferansiyel denklemlerin ve integral denklemlerin çözümü için güçlü bir yöntemdir. Bu nedenle, kesin bir çözümün elde edilmesinin zor olduğu mühendislik problemlerinin analizi için uygun bir yaklaşımdır. Bu çalışma, VİM'in çeşitli burkulma durumlarına uygulanmasını sunmakta ve farklı destek koşullarına ve farklı enine kesitlere sahip kolonlar için sonuçlar üretilmektedir. Bu çalışma varyasyonel iterasyon yönteminin elastik stabilite problemlerinin analizinde çok etkili bir teknik olduğunu göstermektedir.

Darbandi vd. (2010) yayılı olarak etki eden eksenel kuvvet altındaki kesiti değişen kolonların burkulmasını analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, değişken kesitli kolonların eksenel kuvvete maruz kaldığı durum ele alınmıştır. Sunulan çözüm, Wentzel-Kramers-Brillouin'in tekil pertürbasyon yöntemine dayanmaktadır ve kolon, Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak modellenmiştir. Burkulma yüklerinin hesaplanması için kapalı form çözümleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mevcut yaklaşımı doğrulamak için literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların kıyaslanan değerler ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

Huang ve Li (2011) 'de farklı durumlarda kritik burkulma yükü altındaki Bernoulli-Euler kolonunu incelemişlerdir. Bu çalışmada, Euler-Bernoulli kolonlarının burkulmasını eksenel homojen olmama ve/veya değişken kesit ile çözmek için yeni bir analitik yaklaşım geliştirilmiştir. Farklı sınır koşullarındaki kolonlar için, değişen eğilme rijitliğine sahip kolonların burkulması Fredholm integral denkleminde indirgenmiştir.

Yöntemin etkinliği, sonuçların mevcut kapalı form çözümleri ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Sabit hacim veya ağırlığa sahip kabul edilebilir şekil profilleri için konik kolonların yük taşıma kapasitesinin artırılmasını göstermek için örnekler verilmiştir ve önerilen yöntem mühendislik uygulamalarında burkulmaya karşı optimum kolon tasarımından yararlanmışır. Bu yöntem, aksel olarak değişken malzeme özelliklerine sahip tek tip olmayan kirişlerin serbest titreşimini hesaplamak için daha da genişletilebilir.

Akgöz ve Civalek (2013a) yaptıkları çalışmada, homojen olmayan mikro kirişlerin titreşim analizini Bernoulli-Euler kiriş teorisi ve değiştirilmiş gerilme çifti teorisi ile birlikte incelemişlerdir. Mikro kirişlerin sınır koşulları bir ucunda sabit, diğer ucunda serbest olarak kabul edilmiştir. Mikro kirişlerin malzeme özelliklerinin ve kesitinin uzunlamasına yön boyunca sürekli olarak değiştiği göz önünde bulundurulmuştur. Serbest enine titreşim problemine yaklaşık bir çözüm elde etmek için Rayleigh – Ritz çözüm yöntemi kullanılmışır. Malzeme özelliklerinin ve koniklik oranlarının aksel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş konik mikro kolonların doğal frekansları üzerindeki etkilerini göstermek için ayrıntılı bir çalışma yapılmıştır. Mevcut analizin geçerliliğini ve doğruluğunu göstermek için, mevcut sonuçların bir kısmı literatürdeki önceki sonuçlarla karşılaştırılmış ve aralarında mükemmel bir uyum olduğu gözlemlenmiştir.

Akgöz ve Civalek (2013b) çalışmalarında doğrusal olarak sivrilen mikro kolonların burkulma problemi, değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorisi temelinde incelemişlerdir. Bernoulli-Euler teorisi değişken kesitli mikro kolonu modellemek için kullanılmışır. Farklı koniklik oranları için mikro kolonların kritik burkulma yüklerini elde etmek için Rayleigh-Ritz çözüm yöntemi kullanılmışır. Dikdörtgen ve dairesel kesitli durumlar için karşılaştırmalı sonuçlar incelenmiştir. Değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorisi ile elde edilen sonuçları değiştirilmiş gerilme çifti teorisi ve klasik teoriler ile bulunan sonuçların arasındaki farkları göstermek için grafik ve tablolar kullanılmışır.

Pradhan ve Chakraverty (2013) çalışmalarında farklı sınır koşullarına maruz kalan fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim analizini yapmışlardır. Analiz, klasik ve birinci dereceden kayma deformasyon kiriş teorilerine dayanmaktadır. Kirişin enine kesitlerinin yer değiştirme bileşenlerini gösteren deneme fonksiyonları basit cebirsel polinom formlarında ifade edilmiştir. Yönetici denklemler Rayleigh – Ritz yöntemi ile elde edilmiştir. Bileşen hacim fraksiyonlarının, narinlik oranlarının ve kiriş teorilerinin doğal frekanslar üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Sonuçları doğrulamak için, mevcut literatürden elde edilen sonuçlarla karşılaştırma çalışmaları da yapılmıştır.

Şimşek ve Reddy (2013) bu çalışmalarında değiştirilmiş gerilme çifti teorisine göre elastik Pasternak zemine oturan fonksiyonel derecelendirilmiş bir mikro kirişin burkulması için özel durumları kapsayan çeşitli kiriş teorilerini içeren birleşik bir yüksek dereceli kiriş teorisi önermişlerdir. Klasik olmayan kiriş modeli, malzeme uzunluğu ölçeği parametresi sifira ayarlandığında klasik kiriş modeline indirgenir. Fonksiyonel derecelendirilmiş mikro kirişin malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde değiştiği varsayılır ve Mori – Tanaka homojenizasyon tekniği ve klasik karışım kuralı ile tahmin edilir. Yönetici denklemler ve ilgili sınır koşulları, minimum toplam potansiyel enerji prensibi kullanılarak türetilmiştir. Navier tipi çözüm, basit mesnetli sınır koşulları için

geliştirilmiştir. Farklı etkileri araştırmak için sayısal sonuçlar sunulmuştur. Mevcut formülasyonu doğrulamak için karşılaştırma çalışması da yapılmıştır.

Elastik kısıtlamalara sahip aksel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş uniform kolonların burkulma analizi için yerel diferansiyel kuadratür yöntemi geliştirilmiştir (Yılmaz vd 2013). Diferansiyel karesel ayrıklaştırmanın katsayıları, sırasıyla fiziksel alanın başlangıç ve bitiş sınırlarına yakın referans gridler için ileri ve geri tip şemalardaki komşu noktalar ve fiziksel alan içindeki referans gridler için merkezi tip şemalar kullanılarak elde edilmiştir. Sınır koşulları doğrudan ağırlık katsayısı matrislerine uygulanmıştır. Aksel yönde farklı enine kesit ve elastiklik modülü varyasyonlarına sahip bir kolon durumu dikkate alınmıştır. Boyutsuz kritik burkulma yüklerinin sonuçları, literatürde bulunan analitik ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılır. Bazı yeni sonuçlar da verilmiştir.

İsteğe bağlı sınır koşulları ve boyut etkisi dikkate alınarak çok küçük boyutta olan kirişlerin burkulma ve titreşim analizleri yapılmıştır (Yaylı, 2014). Şekil değiştirme gradyanı teorisine dayalı olarak, sabit genişliğe ve doğrusal değişen derinliğe sahip mikro kirişlerin doğal frekanslarının hesaplanması için sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. Hareket denkleminin zayıf formülü formülasyonu, ilk olarak klasik sonlu elemanlar yönteminde olduğu gibi çeşitli sınır koşullarına göre elde edilmiştir. Elastik şekil değiştirme fonksiyonları, sonlu bir eleman içindeki sapmanın enterpolasyonunu bulmak için kullanılır. Sertlik ve kütle matrisleri daha sonra mikro kirişin öz değeri problemini çözmek için hesaplanır. Mikro kolonun karakteristik denklemi kullanılarak doğal frekanslar için bir çözüm elde edilir. Sonuçlar literatürde daha önce bulunanlarla karşılaştırılmıştır. Klasik elastisite teorisi ile karşılaştırma yapılmış ve sonuçların uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir.

Farklı sınır şartları altındaki TDKNT'lerin burkulma yükü analizi yapılmıştır (Yaylı, 2015). Bu çalışmada kritik burkulma yükleri için dönme sınır koşulları açısından yerel olmayan sınır koşulları kullanılarak türetilmiştir. Dönel yay parametrelerinin üzerindeki etkilerini incelemek için detaylı bir parametrik araştırma yapılmıştır.

Aksel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş mikro kirişlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, bu mikro kirişlerin aksel boyunca değişen mekanik özelliklerinden dolayı zorlu bir çalışmadır. Shafiei vd. (2016a) bu çalışmada, döner konik bir fonksiyonel derecelendirilmiş Euler-Bernoulli mikro kirişinin enine titreşimi dönmeye bağlı aksel kuvvetler dikkate alınarak, değiştirilmiş gerilme çifti teorisine dayalı olarak incelenmiştir. Yönetici denklemler ve sınır koşulları, Hamilton ilkesine göre türetilmiş ve bu denklemler, genelleştirilmiş diferansiyel kuadratür eleman metodu (GDKEM) yardımıyla çözülmüştür. Boyutsuz parametrenin, kirişin uzunluğunun ve genişliğinin, enine kesit değişim oranının ve boyutsuz açısal hızın tek tip olmayan mikro kirişin titreşim davranışı üzerindeki etkileri farklı sınır koşulları için incelenmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş mikro kirişin titreşim davranışı da saf metal ve saf seramik ile karşılaştırılmıştır.

Lei vd. (2016) nikel mikro kolonların titreşimini incelemişlerdir. Bu çalışmada nikel ile ilgili birçok parametre gösterilmiştir. Farklı kiriş teorilerini kullanarak problemin çözümü yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan ve alınan değerlerden bazıları bu tezde referans olarak kullanılmıştır.

Ghadiri ve Shafiei (2016) bu çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş Timoshenko mikro kirişinin termal titreşimi, termal ortam üzerindeki dört tip sıcaklık dağılımındaki sıcaklık değişimi göz önünde bulundurularak değiştirilmiş gerilme çifti teorisine dayalı olarak analiz etmişlerdir. Fonksiyonel derecelendirilmiş mikro kirişin malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olması ve kuvvet kanunu formuna göre kalınlık boyunca sürekli olarak değiştiği belirtilmiştir. Sıcaklıktan doğan kuvvetler eksenel kuvvet olarak gösterilmiştir. Yönetici denklemler ve sınır koşulları Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiştir. Diferansiyel kuadratür yöntemi, farklı sınır koşulları için yönetici denklemleri çözmek için kullanılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarla burada elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sıcaklık değişimlerinin, farklı sınır koşullarının, boyutsuz açısal hızın, boyut ölçek parametresinin ve kiriş kalınlığının temel, ikinci ve üçüncü boyutsuz frekanslar üzerindeki etkilerini ifade etmiştir. Sonuçlar, sıcaklık değişimlerinin kritik değerlerini ve mikromotor ve mikro türbin gibi mikro makinelerin tasarımına uygulanabilecek diğer temel parametrelerin belirlenmesinde yardımcı olmuştur.

Düzgün olmayan bir mikro ve nano kirişin doğrusal olmayan yönetici denklemlerini çözmek, araştırmacılar için çok karmaşıktır. İlk kez, değişken kesitli eksenel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş bir mikro kirişin doğrusal olmayan boyuta bağlı titreşimi incelenmiştir (Shafiei vd 2016b). Mikro kiriş, Euler-Bernoulli kiriş teorisine ve değiştirilmiş gerilme çifti teorisine göre modellenmiştir. Denklemleri ve sınır koşullarını türetmek için Hamilton ilkesi kullanılmıştır ve daha sonra yönetici denklemler, genelleştirilmiş diferansiyel kuadratür metodu (GDKM) ile çözülmüştür. Boyut ölçekli parametre ve enine kesit değişim oranlarının fonksiyonel derecelendirilmiş, saf seramik ve saf metal mikro kirişlerin temel ve ikinci mod frekansları üzerindeki etkileri sunulmuştur. Bir yön boyunca mikro kirişin enine kesit değişim hızının etkilerinin doğrusal olmayışına ve ayrıca diğer yön boyunca enine kesit değişim hızına bağlı olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, mikro elektromekanik sistemler (MEMS), mikro anahtarlar vb. gibi birçok mikro yapının belirlenmesinde kullanılabilir.

Shafiei vd. (2016c) dikdörtgen ve değişken kesitli fonksiyonel derecelendirilmiş mikro kirişlerin boyuta bağlı doğrusal olmayan titreşim davranışı değiştirilmiş gerilme çifti ve Euler-Bernoulli teorilerine dayanarak incelemişlerdir. Ünliform ve özellikle değişken kesitli mikro kirişlerin doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerini çözenin zorluğundan dolayı, birkaç araştırmacı mekanik yapıların doğrusal olmayan titreşimlerini incelemiştir. Bu mikro kirişin fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapıldığı varsayılmıştır. Yönetici diferansiyel denklemler Hamilton ilkesi kullanılarak ve Von-Kármán'ın nonlinearitesi dikkate alınarak elde edilmiştir. Üç sınır koşulu aracılığıyla mikro kirişin sayısal sonuçlarını elde etmek için genelleştirilmiş diferansiyel kuadratür metodu (GDKM) kullanılmıştır. Doğrusal olmayan genlik, malzeme uzunluğu ölçeği, kalınlık oranı ve gözeneklilik hacim fraksiyonu gibi bazı parametrelerdeki değişikliklerin temel normalleştirilmiş frekans üzerindeki etkisi araştırılmış ve sonuçların geçerliliği çeşitli sayısal örneklerle incelenmiştir.

Akbaş (2017)'de, gözeneklilik etkisi ile fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin burkulma sonrası analizini yapmıştır. Kirişin malzeme özellikleri kalınlık yönünde güç yasası dağılımlarına göre değişmektedir. Burkulma sonrası problemlerin geometrik olarak doğrusal olmayan problemler olduğu bilinmektedir. Doğrusal olmayan kirişin kinematik modeli, iki boyutlu sürekliliğin toplam Lagrangian sonlu eleman modeli

Newton-Raphson yöntemi ile birlikte kullanılmıştır. Çalışmada malzeme dağılımı, gözeneklilik parametreleri, basma yüklerinin etkileri fonksiyonel derecelendirilmiş kırıların burkulma sonrası davranışı incelenmiş ve gözeneklilik etkileri ile tartışılmıştır. Ayrıca, farklı fonksiyonel derecelendirilmiş kırıler üzerindeki porozite modelleri burkulma sonrası durumda incelenmiştir.

Akgöz ve Civalek (2017) tarafından fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış homojen olmayan mikro kırılerin titreşim etkisi üzerindeki termal ve kayma deformasyon etkileri incelenmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş mikro kırılerin sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin yükseklik boyunca yumuşak ve kademeli olarak değiştiği varsayılmaktadır. Diferansiyel denklemler ve ilgili sınır koşulları, hiperbolik kayma deformasyon kırışi ve değiştirilmiş gerilme çifti teorileri temelinde Hamilton ilkesi uygulanarak türetilmiş ve analitik olarak çözülmüştür. Narinlik oranı, malzeme uzunluğu ölçek parametresi, gradyan indeksi, kayma düzeltme faktörleri ve sıcaklık artışının fonksiyonel derecelendirilmiş mikro kırılerin doğal frekansları üzerindeki etkilerini belirtmek için ayrıntılı bir parametrik çalışma yapılmıştır.

Dönme etkisi altındaki nanoyapılar, nano makinelerde, nano motorlarda ve nano türbinlerde kullanılmak üzere yüksek umut vadeden bir geleceğe sahiptir. Bu sistemler henüz geliştirilme aşamasındadır (Ghadiri vd. 2017). Bu çalışmada, bir nanoplağın dönmeye bağlı titreşim analizi araştırılmıştır. Yönetici denklem ve sınır koşulları yerel olmayan esnekliğe dayalı Hamilton ilkesi kullanılarak türetilmiştir. Yerel olmayan parametrenin etkileri, en boy oranı, göbek yarıçapı, açılal ilk üç frekanstaki hız ve farklı sınır koşulları ele alınmıştır. Sonuçlar , dönen nanoplağın titreşim davranışının konsol sınır koşulunun diğer sınır koşullarından farklı olduğunu göstermiştir.

Uniform olmayan karbon nanotüp , fiber ve polimer nanokompozit kırılerin serbest titreşim değerleri hesaplanmıştır (Seidi ve Kamarian, 2017). Bu çalışmada, karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş uniform olmayan çok ölçekli nanokompozit kırılerin serbest titreşimleri incelenmiştir. Mori-Tanaka tekniği üç fazlı karbon nanotüp / fiber / polimer kompozit kırılerin etkili mekanik özelliklerini bulmak için kullanılır. Yapının doğal frekanslarını elde etmek için, yönetici denklem genelleştirilmiş diferansiyel kuadratür yaklaşımı ile çözümlür. Uygulanan yöntemlerin doğruluğu ve etkinliği incelenmiş ve önceki yayınlanmış çalışmalarda bildirilen bazı deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Aydoğdu ve Taşkın (2017) tarafından basit mesnetli fonksiyonel derecelendirilmiş kırıin serbest titreşimi araştırılmıştır. Yönetici denklemler Hamilton ilkesi uygulanarak bulunmuştur. Frekansların elde edilmesi için Navier tipi çözüm yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde farklı yüksek mertebeden kayma deformasyon teorileri ve klasik kırı teorileri kullanılmıştır. Farklı malzeme özellikleri ve farklı narinlik oranları için serbest titreşim frekansları ve bazı mod şekilleri gösterilmiştir.

Azami vd (2018) tarafından yapılan fonksiyonel derecelendirilmiş Timoshenko nano kırılerinin düzlem içi doğrusal olmayan bir termal yükleme altındaki titreşim analizi incelenmiştir. Formülasyon, Eringen'in yerel olmayan esneklik teorisine dayanmaktadır. Denklemlerin türetilmesi için Hamilton prensibi kullanılmıştır. Yönetici denklemler diferansiyel kuadratür yöntem ile çözülmüştür. Nano kırı, dönme ve termal etkilerden dolayı eksenel yük altındadır olduğu kabul edilir. Termal dağılımın doğrusal

olmadığı kabul edilmiştir. Malzeme özellikleri sıcaklığa bağlıdır ve güç yasası formuna göre kalınlık boyunca sürekli olarak değiştiği belirtilmiştir.

Değişken kesitli kolonlara aksenal olarak etki eden basınç yükünün Ritz metodu ile çözümü yapılmıştır (Akgöz , 2019). Bu çalışmada kesiti doğrusal olarak değişen kolon ele alınarak farklı sınır koşulları altında incelemeler yapılmıştır. Narin ve üniform kolonları modellemek için klasik kiriş teorisi kullanılmıştır. Doğrusal olarak değişen kolunun farklı mesnet koşullarındaki davranışına bakılmıştır. Bu makalede iki ucu mafsallı ve iki ucu ankastre mesnetli kolonlarla ilgili değerler hesaplanmıştır. Değişken kesitli kolonların burkulma yükleri altındaki sınır koşulları ve koniklik oranının etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafik haline getirilerek literatürdeki daha önce bulunanlarla kıyaslanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Formülasyon

Doğrusal, elastik ve izotropik malzemeler için değiştirilmiş gerilme çifti elastisite teorisi kullanılarak şekil değiştirme enerjisi, U aşağıdaki gibi yazılabilir (Yang vd. 2002; Park ve Gao 2006):

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \int_A (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + m_{ij}^s x_{ij}^s) dA dx \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.2)$$

$$x_{ij}^s = \frac{1}{2} (\theta_{i,j} + \theta_{j,i}) \quad (3.3)$$

$$\theta_i = \frac{1}{2} e_{ijk} u_{k,j} \quad (3.4)$$

Burada u yerdeğiştirme vektörü, θ dönme vektörü, ε şekil değiştirme tansörü, x_{ij}^s simetrik dönme eğilme tensörü olarak ifade edilmiştir. Ayrıca e_{ijk} permütasyon sembolüdür.

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{mm} \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (3.5)$$

$$m_{ij}^s = 2Gl^2 x_{ij}^s \quad (3.6)$$

Burada δ_{ij} Kronecker deltası, l malzemenin boyut ölçek parametresidir. λ ve G aşağıdaki gibi tanımlanan Lamé sabitleridir.

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.7)$$

Burada E ve ν , Young modülü ve Poisson oranıdır.

$$u_1(x, z) = -z \frac{dw(x)}{dx}, \quad u_3(x, z) = w(x) \quad (3.8)$$

Denklem (3.8) 'i', Denklem (3.2)'de yerine yazılırsa, sıfırdan farklı gerilme bileşenini elde edilir.

$$\varepsilon_{11} = -z \frac{d^2w(x)}{dx^2} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)', Denklem (3.3)-(3.4)' te yerine konursa

$$x_{12}^s = x_{21}^s = \frac{1}{2} \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.10)$$

ifadesi bulunur. Burada, Denklem (3.9)-(3.10) , Denklem (3.5)-(3.6)' da yerine yazılabilir (Poisson etkisini yok sayarak):

$$\sigma_{11} = -Ez \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.11)$$

$$m_{12}^s = m_{21}^s = Gl^2 \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.12)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L (EI + GA l^2) \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx \quad (3.13)$$

3.2. Değişken Kesitli Mikro Kolonlar İçin Burkulma Problemi

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi malzeme özellikleri sabit olan fakat çubuk eksenini doğrultusunda devamlı değişen ve Winkler elastik zemine oturan kolonlar için Bernoulli-Euler kiriş teorisine göre şekil değiştirme enerjisi U şöyle ifade edilebilir:

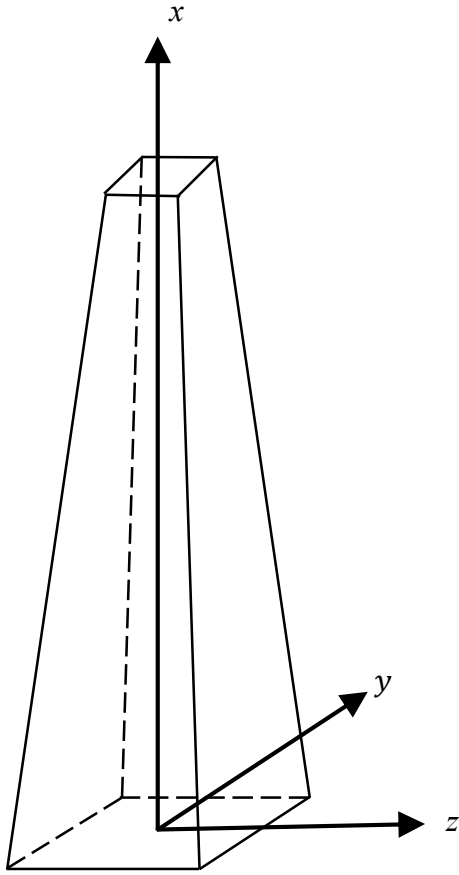
$$U = \frac{1}{2} \int_0^L (EI_{(x)} + GA_{(x)} l^2) \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^L k_W w^2 dx \quad (3.14)$$

Burada, E elastisite modülü, L kolon boyu ve $I(x)$ x 'e bağlı değişen atalet momenti olup I_0 kolonun alt kısmındaki atalet momenti, β 0 ile 1 arasında değişen koniklik oranını ifade etmektedir:

Ayrıca E , $I(x)$, G , $A_{(x)}$, k_W sırasıyla elastisite modülünü, değişken kesitin atalet momentini, kayma modülünü, değişken kesitin alanını ifade etmektedir. Aşağıdaki denklemlerde değişken ifadelerin açılımları gösterilmiştir:

$$I_{(x)} = I_0 \left(1 - \beta \frac{x}{L} \right) \quad (3.15)$$

$$A_{(x)} = A_0 \left(1 - \beta \frac{x}{L} \right) \quad (3.16)$$



Şekil 3.1. Doğrusal değişken kesitli kolon

3.3. Rayleigh-Ritz Yönteminin Uygulanması

Değişken kesitli kolonun toplam minimum potansiyel enerjisi Π

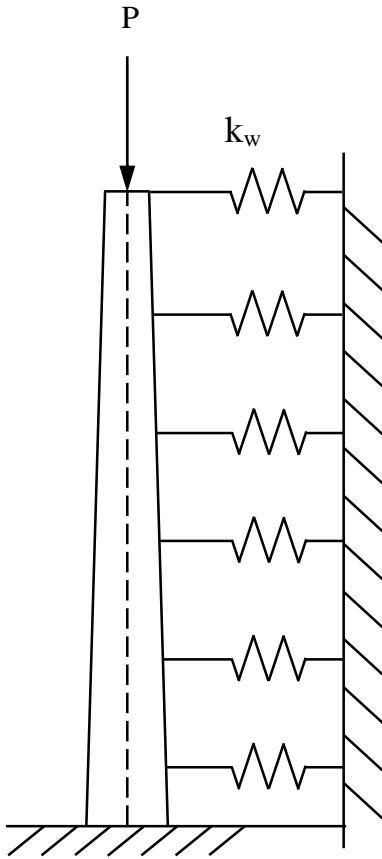
$$\Pi = U + V \quad (3.17)$$

Büçiminde ifade edilebilir. Burada U şekil değiştirme enerjisi ve V ise aksenal basınç kuvvetinin potansiyeli olup aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$V = -\frac{P}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx \quad (3.18)$$

Burada P aksenal basınç kuvvetidir. Değişken kesitli kolonun toplam potansiyel enerjisi bu şekilde gösterebilir:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L (EI_{(x)} + GA_{(x)}l^2) \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^L k_w w^2 dx - \frac{P}{2} \int_0^L \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx \quad (3.19)$$



Şekil 3.2. Elastik zemine oturan değişken kesitli kolon modeli

Rayleigh-Ritz yönteminde, 1877 yılında titreşim problemlerinin çözümü için Rayleigh tarafından önerilen metot (Rayleigh, 1877) baz alınmıştır. 1909 yılında Ritz (Ritz, 1909) bu metodu geliştirmiştir. Bu yöntemle göre deneme fonksiyonu $w(x)$ aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$w(x) = \sum_{i=1}^N c_i \varphi_i(x) \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'deki c_i keyfi katsayılar olup $\varphi_i(x)$ ise geometrik sınır koşullarını sağlaması yeterli hesap edilen fonksiyon ve N bu fonksiyonda olan polinomların sayısıdır. Bu çalışmada, bir ucu ankastre mesnetli diğer ucu konsol durum için geometrik sınır koşullarını incelenmiştir:

$$\varphi_i(x) = x^{i+1} \quad (3.21)$$

Toplam minimum potansiyel enerjisinin durağan noktaları, toplam potansiyel enerjinin keyfi katsayılara göre kısmi türevi alınarak gösterilebilir.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial c_i} = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (3.22)$$

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde değişken kesitli kolonların aksenal basınç yükü etkisindeki burkulma davranışı üzerindeki farklı parametrelerin etkileri incelenmiştir. Bir ucu serbest diğer ucu ankastre mesnetli durumda farklı koniklik oranları için sayısal sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 4.1. Homojen kolonların boyutsuz kritik burkulma yükü (BKBY) değerinin (PL^2/EI) terim sayısına göre yakınsaması

N	β					
	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
2	2.485962	2.416515	2.270156	2.107765	1.913995	1.646162
3	2.467738	2.392985	2.235077	2.062728	1.868640	1.628307
4	2.467404	2.392812	2.235073	2.062094	1.865492	1.622855
5	2.467401	2.392806	2.235067	2.062092	1.865320	1.621521
6	2.467401	2.392806	2.235067	2.062092	1.865309	1.621181
7	2.467401	2.392806	2.235067	2.062092	1.865308	1.621093
8	2.467401	2.392806	2.235067	2.062092	1.865308	1.621069
9	2.467401	2.392806	2.235067	2.062092	1.865308	1.621063
10	2.467401	2.392806	2.235067	2.062092	1.865308	1.621062
11	2.467401	2.392806	2.235067	2.062092	1.865308	1.621061
12	2.467401	2.392806	2.235067	2.062092	1.865308	1.621061
Kesin (Wang vd. 2005)	2.467	2.393	2.235	2.062	1.865	1.621
VİM (Coşkun ve Atay 2009)	2.4674	2.3928	2.2351	2.0612	-	-

İlk olarak bu tezde kullanılan yöntemin doğruluğunu kanıtlamak için literatürdeki bazı sonuçlarla kıyaslama yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen değerler Çizelge 4.1'de Wang vd. (2005)'e ait kesin ile Coşkun ve Atay (2009)'a ait Varyasyonel İterasyon Metodu (VİM) kullanılarak elde edilmiş yaklaşık sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Burada karşılaştırılan sonuçların mükemmel bir uyum içerisinde oldukları rahatlıkla görülmektedir. Bu çalışmada terim sayısının (N) 12 seçilmesinin sebebi koniklik oranının artmasına bağlı olarak daha hassas sonuç elde edebilmek için daha fazla terime ihtiyaç duyulmasıdır. Örneğin, koniklik oranı 0 ile 0.5 arasında olduğunda 5 ve daha fazla terim için aynı sonuçlar elde edilirken koniklik oranı 0.9 için 11'den yüksek terimler için aynı sonuçlara ulaşılmıştır. Bunun yanında bu çalışmada boyut etkisi de dikkate alındığından sonuçların geçerliliğini ve hassasiyetini sağlamak bakımından terim sayısı 12 seçilmiştir.

Çizelge 4.2. Elastik zemin etkisindeki üniform kolonların BKBY değerinin (PL^2/EI) değişimi

	Wang vd. (2005)	Atay ve Coşkun (2009)	Huang ve Luo (2011)	Yılmaz vd. (2013)	Bu çalışma
K_w					
0	2.4674	2.4674	2.467401	2.467401	2.467401
50	8.8614	8.8614	8.861396	8.861396	8.861396
100	11.9964	11.9964	11.996413	11.996413	11.996413

Çizelge 4.2’de elastik zemin etkisindeki üniform kolonların boyutsuz kritik burkulma yükü değerinin değişimi gösterilmiştir. Wang vd. (2005)’e ait kesin ile Atay ve Coşkun (2009)’a, Huang ve Luo (2011)’e ve Yılmaz vd. (2013)’e ait yaklaşık sonuçlarla karşılaştırması yapılmıştır. Çizelge 4.2’deki sonuçlar incelendiğinde bu çalışmada elde edilen değerlerin diğerleri ile aynı oldukları görülmektedir.

Çizelge 4.3. Farklı koniklik oranı ve elastik zemin parametresi değerleri için klasik kritik burkulma yükü değerleri (μN) ($h_0 = 2\mu m$, $L = 50h_0$, $b_0 = h_0$, $l = 0$)

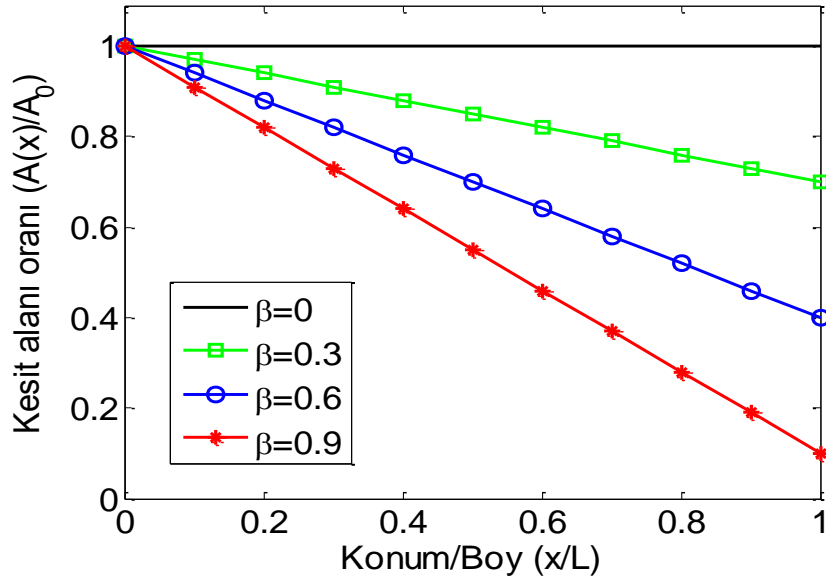
β	K_w				
	0	25	50	75	100
0	68.1003	173.7184	244.5745	293.9066	331.1010
0.2	63.9081	150.1264	209.1796	251.0700	282.9501
0.4	59.3640	126.3872	173.3356	207.3488	233.5402
0.6	54.3039	102.4053	136.9136	162.5074	182.5029
0.8	48.3591	77.9149	99.6063	116.0827	129.1623

Çeşitli koniklik oranı ve elastik zemin parametresi değerleri için klasik kritik burkulma yükü değerleri Çizelge 4.3’te sunulmuştur. β değeri arttıkça klasik kritik burkulma yükünün azaldığı gözlemlenmiştir. Winkler zemini etkisinde klasik kritik burkulma yüklerinin değeri artmaktadır. Ayrıca Winkler zemin parametresi arttıkça koniklik oranının burkulma yükleri üzerindeki etkisinin arttığı ifade edilebilir. Örneğin Winkler zemin parametresi $K_w = 0$ iken koniklik oranının 0’dan 0.2 ye artması durumunda burkulma yükünün azalma oranı 0.062 ve $K_w = 100$ iken yine koniklik oranının 0’dan 0.2 ye artması durumunda burkulma yükünün azalma oranı 0.145 olarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 4.4. Farklı koniklik oranı ve elastik zemin parametresi değerleri için boyut etkili kritik burkulma yükü değerleri (μN) ($h_0 = 2\mu m$, $L = 50h_0$, $b_0 = h_0$, $l = 1.553\mu m$)

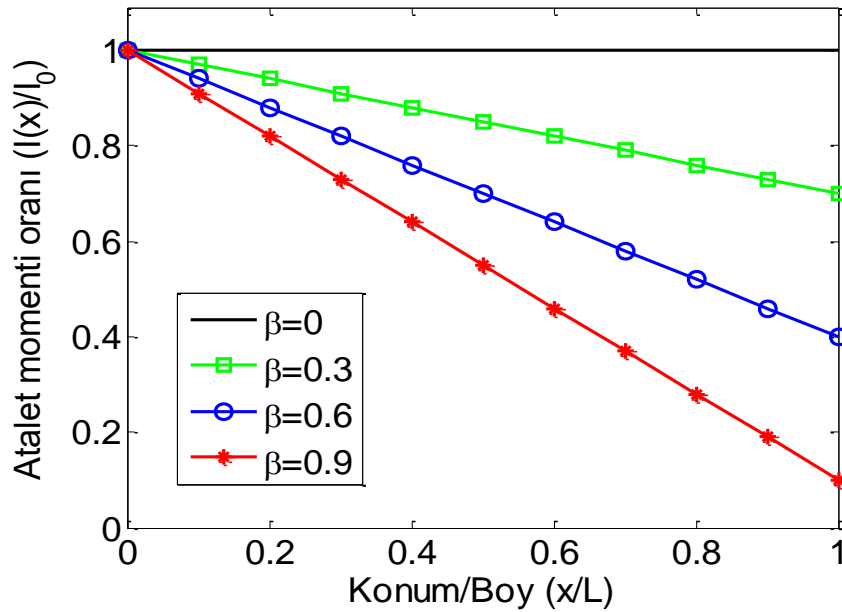
β	K				
	0	25	50	75	100
0	256.1669	3771351	486.6169	585.1932	673.6957
0.2	240.3977	338.6297	427.8434	508.5499	581.4152
0.4	223.3044	299.2325	368.4509	431.3876	488.5520
0.6	204.2701	258.4350	308.0098	353.3272	394.7499
0.8	181.9084	215.0110	245.4115	273.3370	299.0149

Çizelge 4.4’te farklı koniklik oranı ve elastik zemin parametresi değerleri için boyut etkili kritik burkulma yükü Çizelge 4.4’te yazılmıştır. Koniklik oranının artmasıyla birlikte kritik burkulma yükü değerlerinde azalma olmuştur. Çizelge 4.3. ile kıyasladığımız zaman boyut etkili durumdaki kritik burkulma yükü değerlerinin yaklaşık 2 kat arttığı görülmüştür. Bu artışın nedeni zeminin rijitliğinin artması olduğu söylenebilir.



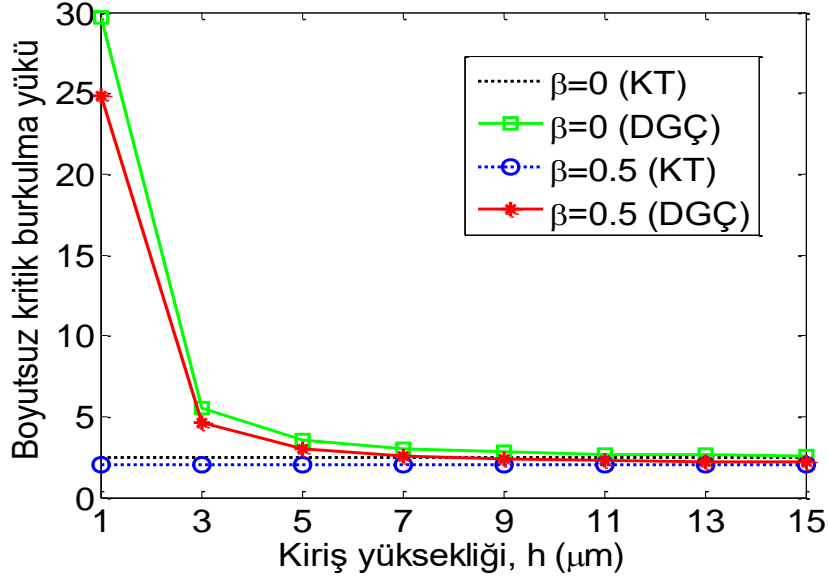
Şekil 4.1. Kesit alanı oranının kolon uzunluğu boyunca farklı koniklik oranına bağlı olarak değişimi

Doğrusal olarak daralan kesitli kolonların çeşitli koniklik oranları için kesit alanı oranının kolonun uzunluk boyunca değişimi Şekil 4.1'de verilmiştir. $X/L = 0$ ankastre mesneti, $X/L = 1$ ise serbest ucu ifade etmektedir. Ankastre mesnette serbest uca doğru gidildiğinde kesit alanı oranı giderek azalmıştır. Ayrıca, Denklem 3.16'da görüldüğü gibi koniklik oranının yükselmesiyle kesit alanı oranı belirgin biçimde azalmıştır. Bu azalmanın nedeni olarak koniklik oranının artması sonucunda kesit alanının küçülmesi gösterilebilir.



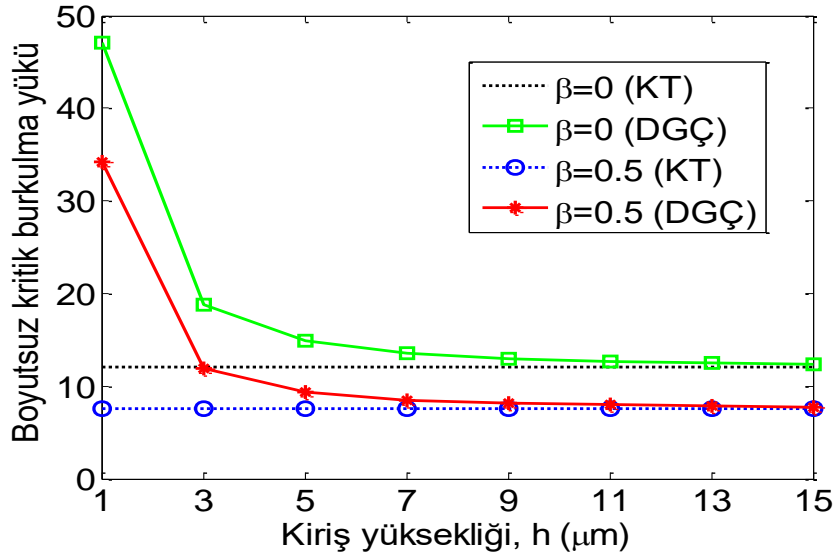
Şekil 4.2. Atalet momenti oranının kolon uzunluğu boyunca farklı koniklik oranına bağlı olarak değişimi

Farklı koniklik oranları için atalet momenti oranın kolon uzunluğu boyunca Şekil 4.2'de verilmiştir. Ankastré mesnette serbest uca doğru gidildikçe atalet momenti oranı giderek azalmıştır. Ayrıca, koniklik oranının yükselmesiyle atalet momenti oranı belirgin biçimde azalmıştır. β değeri arttıkça kolonun uc kısmı sivrilmektedir. $\beta = 1$ değerinde ise Denklem 3.16'da görüldüğü gibi kesit alanı 0 olacaktır. Bu azalmanın nedeni koniklik oranının artması sonucunda kesit alanının küçülmesidir.



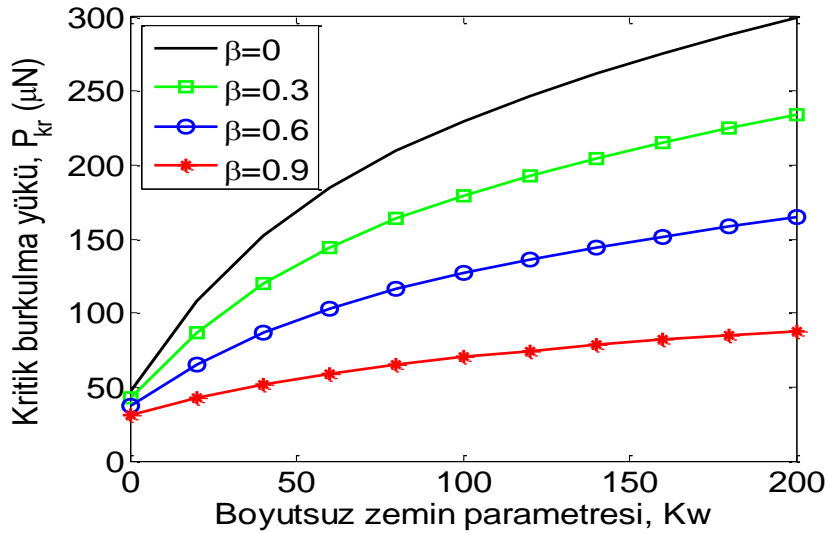
Şekil 4.3. Sabit ve değişken kesitli kolonların BKBY değerlerinin kiriş yüksekliğine bağlı olarak değişimi ($K_w = 0$)

Çeşitli koniklik oranları için boyutsuz kritik burkulma yükünün kiriş yüksekliğine bağlı değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir. Klasik Teori'deki sonuçlara göre kiriş yüksekliğinin artmasına bağlı olarak boyutsuz kritik burkulma yükünde değişim olmamıştır. DGÇ teorisine dayalı olarak elde edilen boyutsuz kritik burkulma yükü değerleri kiriş yüksekliğinin düşük değerleri için (1-5 mm) belirgin bir biçimde azaldığı görülmektedir. Kiriş yüksekliği arttıkça meydana gelen bu azalmanın giderek yavaşladığı ve klasik sonuçlara yakınsadığı görülmektedir. Ayrıca koniklik oranı yükseldiğinde burkulma yüklerinin düşmekte olduğu bu grafikten rahatça anlaşılabilir. Bunun nedeni olarak koniklik oranının artmasının atalet momentinde azalmaya sebep olması gösterilebilir.



Şekil 4.4. Elastik zemin etkisindeki sabit ve değişken kesitli kolonların BKBY değerlerinin kiriş yüksekliğine bağlı olarak değişimi ($Kw = 100$)

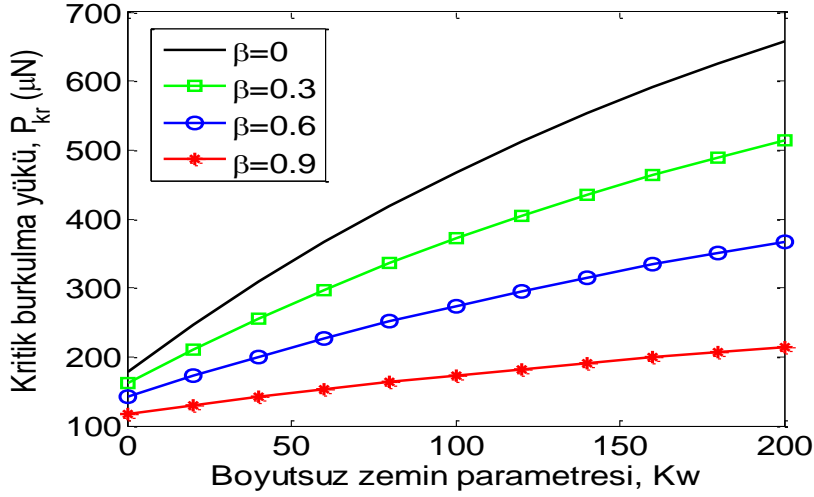
Şekil 4.4'te elastik zemin etkisindeki sabit ve değişken kesitli kolonların boyutsuz kritik burkulma yükü değerlerinin kiriş yüksekliğine bağlı değişimi gösterilmiştir. Her iki durumdaki sonuçlara bakıldığı zaman Şekil 4.3 ile şekilsel olarak benzediği görülmektedir. Sonuçlara bakıldığı zaman ise zemin etkili durumdaki değerlerin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise zemin etkisiyle rijitliğin artmasıdır. Koniklik oranının artmasına bağlı olarak boyutsuz kritik burkulma yükünün azalması daha belirgindir.



Şekil 4.5. Çeşitli koniklik oranları için klasik kritik burkulma yükü değerlerinin boyutsuz zemin parametresine bağlı değişimi ($L = 60h_0$)

Şekil 4.5'te farklı koniklik oranları için klasik kritik burkulma yükü değerlerinin boyutsuz zemin parametresine bağlı değişimi çizdirilmiştir. Boyutsuz zemin parametresi değerinin artmasına bağlı olarak kritik burkulma yükü değerleri de giderek artmıştır. Ayrıca, koniklik oranının yükselmesiyle kritik burkulma yükü değerleri belirgin biçimde

azalmıştır. Bu azalmanın nedeni olarak koniklik oranının artması sonucunda kesit alanının ve atalet momentinin küçülmesinin olduğu söylenebilir. Örneğin, Şekil 3.2'deki en üstteki yay hariç diğerlerinin sistemden çıkarıldığı varsayılınsın. Bir ucu ankastre , diğer ucu konsol olan kolonun burkulması incelenirken serbest olan tarafta yay olması durumunda yay sabiti (k) değerinin giderek artmasıyla orada bir mafsal olduğu durum elde edilmiş olur. Bu şekilde sistemin sınır koşulları bir ucu ankastre , diğer ucu mafsaldir. İki durumu kıyasladığımız zaman klasik sonuçlarda burkulma yükü değerlerinde 8 kat fark olduğu bilinmektedir.



Şekil 4.6. Çeşitli koniklik oranları için boyut etkili kritik burkulma yükü değerlerinin boyutsuz zemin parametresine bağlı değişimi ($l = 1.553\mu\text{m}$, $L = 60h_0$)

Farklı koniklik oranları için boyut etkili kritik burkulma yükü değerlerinin boyutsuz zemin parametresine bağlı değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.5'teki klasik burkulma yükü değerlerine bakıldığında boyut etkili burkulma yükü değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Klasik burkulma yükü değerlerine bakıldığında değerler yaklaşık 2 kat artmıştır. Boyut etkisi dikkate alınmakla denklem 3.13'te de görüldüğü gibi klasik eğilme rijitliğinin (EI) yanına ilave terimlerin (GAl^2) gelmesi boyut etkili eğilme rijitliğinin artmasına sebep olmuştur. Boyutsuz zemin parametresi değerinin artmasına bağlı olarak kritik burkulma yükü değerleri de giderek artmıştır. Ayrıca, koniklik oranının yükselmesiyle kritik burkulma yükü değerleri belirgin biçimde azalmıştır. Bu azalmanın nedeni olarak koniklik oranının artması sonucunda kesit alanının ve atalet momentinin küçülmesi gösterilebilir.

5. SONUÇLAR

Tez çalışmasında değişken kesitli mikro boyutlu elastik zemine oturan kolonların burkulma davranışı incelenmiştir. Bunu yaparken sayısal bir yöntem olan Rayleigh-Ritz metodu kullanılmıştır. Eksenel basınç yükü etki ettiği zaman değişken kesitli kolonun burkulma davranışı ele alınmıştır. Mikro kolonun nikelden yapıldığı dikkate alınmıştır. Yönetici denklemler Bernoulli-Euler kiriş teorisine dayalı olarak elde edilmiştir. Bir ucu serbest, diğer ucu ankastre mesnetli durum için farklı koniklik oranına sahip kolonların burkulma yükleri hesaplanmıştır.

Modeller oluşturulurken, bu yapıların kesit alanlarının çubuk eksenine boyunca devamlı değiştiği göz önünde bulundurulmuştur. Nikel çubuk için kullanılacak olan malzeme özellikleri Lei ve arkadaşlarının çalışmalarından alınmıştır (Lei vd 2016). Rayleigh-Ritz yaklaşık çözüm yönteminin uygulanabilmesi için şekil değiştirme enerjisi ve dış kuvvetlerin yaptığı iş, boyut etkisi hesaba katılarak değiştirilmiş gerilme çifti teorisine dayalı olarak elde edilmiştir. Bir ucu ankastre mesnetli diğer ucu serbest olan (konsol) durum için geometrik sınır koşullarını sağlayacak biçimde 12 terimden oluşan uygun bir yaklaşık çözüm fonksiyonu kullanılmıştır. Buna bağlı olarak elde edilen sonuçların doğruluğunu ve geçerliliğini göstermek için literatürdeki sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır.

Analiz kısmında, ilave malzeme boyut ölçek parametresinin, kesit değişim oranının ve yaklaşık çözüm fonksiyonundaki terim sayısının mikro kolonların kritik burkulma yükü değeri üzerindeki etkileri detaylı bir biçimde incelenmiştir.

Homojen kolonların BKBY değerleri terim sayısına göre Wang vd. (2005)'e ait kesin ile Coşkun ve Atay (2009)'a ait VİM kullanılarak elde edilmiş yaklaşık sonuçlarla kıyaslanmıştır. Bu çalışmada terim sayısının (N) 12 seçilmesinin sebebi koniklik oranının artmasına bağlı olarak kesin sonuçlara daha yakın değerler elde edebilmek için daha fazla terime ihtiyaç duyulmasıdır. Bunun yanında bu çalışmada boyut etkisi de dikkate alındığından sonuçların geçerliliğini ve hassasiyetini sağlamak bakımından terim sayısı 12 seçilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- DGÇ teorisinde, klasik teorideki eğilme rijitliğine boyut ölçek parametresinden kaynaklanan ifadenin eklenmesi nedeniyle DGÇ ile hesaplanan kritik burkulma yükü değerleri klasik teori ile hesaplanan değerlerden daha yüksektir.
- Elastik zemin etkisi dikkate alındığında elde edilen sonuçların literatürdeki diğer sonuçlarla kıyaslandığında değerlerin aynı olduğu görülmüştür.
- Boyut etkisi dikkate alındığı zaman kritik burkulma yükü değerlerinin yaklaşık 2 kat arttığı görülmüştür. Bu artışın nedeni olarak boyut etkili eğilme rijitliği ifadesinde klasik eğilme rijitliğinin yanında ilave boyut parametresini içeren terimlerin yer alması gösterilebilir.
- DGÇ teorisi ve klasik teori kullanılarak hesaplanan burkulma yükleri arasındaki farklılık kiriş yüksekliği küçükken daha belirgindir. Buradan mikro yapı boyutları azaldıkça boyut etkisinin öneminin arttığı anlaşılabilir.

- Koniklik oranı arttıkça Winkler zemininin kritik burkulma yükü değerleri üzerindeki etkisinin de artmakta olduğu görülmektedir. Winkler zemininin bu etkisi DGÇ teorisinde klasik teoriye göre daha azdır.

Genel olarak sonuçlara bakıldığı zaman koniklik oranında olan artmanın atalet momenti ve kritik burkulma yükünde azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Boyutlar mikro ve daha küçük olduğu için klasik modeller ile boyut etkisi dikkate alınamamıştır. Bu sebepten boyut etkili sonuçların elde edilmesinde Değiştirilmiş Gerilme Çifti Teorisi de kullanılmıştır.

Değiştirilmiş gerilme çifti teorisi nispeten daha yeni olup mevcut çalışmalar da sınırlı sayıdadır. Bu yüksek mertebeden elastisite teorisine dayalı henüz literatürde yer almayan, nikelden yapılmış değişken kesite sahip mikro kolonların kritik burkulma yükü değerleri hesaplanmıştır. Sonraki çalışmalarda kayma deformasyonu etkisi , termal ve manyetik etkiler, değişik zemin türleri ve farklı sınır koşulları dikkate alınabilir. Farklı malzemeler olarak altın, titanyum ve bakıra bakılabilir. Burada elde edilen sonuçlar daha sonra referans olarak kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akbaş, Ş.D. 2017. Post-buckling responses of functionally graded beams with porosities. *Steel and Composite Structures*, 24(5): 579-589.
- Akgöz, B. 2019. Ritz Yöntemi ile Değişken Kesitli Kolonların Burkulma Analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2): 452-458.
- Akgöz, B. and Civalek, Ö. 2013a. Free vibration analysis of axially functionally graded tapered Bernoulli-Euler microbeams based on the modified couple stress theory. *Composite Structures*, 98: 314-322.
- Akgöz, B. and Civalek, Ö. 2013b. Buckling analysis of linearly tapered micro-columns based on strain gradient elasticity. *Structural Engineering and Mechanics*, 48(2): 195-205.
- Akgöz, B. and Civalek, Ö. 2017. Effects of thermal and shear deformation on vibration response of functionally graded thick composite microbeams. *Composites Part B-Engineering*, 129: 77-87.
- Anonim 1 : <https://www.bilgiustam.com/nanoteknolojinin-saglik-alaninda-kullanimi/> [Son erişim tarihi: 20.10.2020].
- Anonim 2 : <https://www.aksam.com.tr/mor-papatya/leke-tutmayan-giysilerin-mucizevi-sirri/haber-1010842> [Son erişim tarihi: 20.10.2020].
- Anonim 3 : <https://www.hurriyet.com.tr/teknoloji/kumaslar-icin-cevreye-zarar-vermeyen-kaplama-yontemi-gelistirildi-4088427> [Son erişim tarihi: 20.10.2020].
- Anonim 4: <http://www.kuark.org/2013/11/nanoteknoloji-ve-gunes-pilleri/> [Son erişim tarihi: 28.10.2020].
- Anonim 5: <https://m5dergi.com/kapak/askeri-nanoteknoloji/> [Son erişim tarihi: 20.10.2020].
- Anonim 6: Nikel. <https://www.kimyadersi.org/nikel.html> [Son erişim tarihi: 10.03.2020].
- Anonim7:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/National_Flag_Square_ecitizen.jpg [Son erişim tarihi: 17.10.2020].
- Anonim 8 : <https://www.evasilo.com/kepek-ve-kuspe-silolari.html> [Son erişim tarihi:21.10.2020].
- Anonymous 1: IBM spelled with 35 Xenon Atoms. <https://www-03.ibm.com/press/us/en/photo/28500.wss> [Son erişim tarihi: 19.01.2019].
- Anonymous 2:https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scanning_Tunneling_Microscope_schematic.svg [Son erişim tarihi: 12.09.2020].
- Anonymous 3 :<https://physics.stackexchange.com/questions/63043/dark-and-bright-areas-around-atoms-in-a-scanning-tunnelling-microscope-image> [Son erişim tarihi: 11.10.2020].
- Anonymous 4: <http://www.pilkingtonselfcleaningglass.co.uk/how-it-works/default.htm>, How self cleaning glass work [Son erişim tarihi: 12.09.2020].

- Anonymous 5: <https://www.engineersrule.com/aiming-high-will-we-ever-see-a-space-elevator/> [Son erişim tarihi: 20.10.2020].
- Anonymous 6: <https://www.nanoandmore.com/AFM-Probe-USC-F0.3-k0.3> [Son erişim tarihi: 02.03.2020].
- Atay, M.T. and Coşkun, S.B. 2009. Elastic stability of Euler columns with a continuous elastic restraint using variational iteration method. *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 58, no. 11-12 : 2528–2534.
- Avcar, M. 2007. Elastik zemin üzerinde bulunan homojen olmayan elastik kirişin stabilite ve titreşimi. Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 140 s.
- Aydoğdu, M. and Taşkın, V. 2017. Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges, *Materials & Design*, 28: 1651-1656.
- Azimi, M., Mirjavadi, S. S., Shafiei, N., Hamouda, A. M. S. and Davari, E. 2018. Vibration of rotating functionally graded Timoshenko nano-beams with nonlinear thermal distribution. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 25: 467-480.
- Coşkun, S.B. and Atay, M.T. 2009. Determination of critical buckling load for elastic columns of constant and variable cross-sections using variational iteration method. *Computers and Mathematics with Applications*, 58 (11-12): 2260-2266.
- Darbandi, S.M., Firouz-Abadi, R.D., Haddadpour, H. 2010. Buckling of variable section columns under axial loading. *Journal of Engineering Mechanics*, 136(4): 472-476.
- Drexler, K. E. (1986). Engines of creation, New York: AnchorPress/Doubleday. USA
- Engin, H. 1992. Elastoplastik zemine oturan kiriş ve plaklar, İTÜ İnşaat Fak., *İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı II. Sempozyum*, İstanbul, Haziran, s. 15-18.
- Eringen, A.C. 1983. On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves. *J. Appl. Phys*, 54 (9): 4703–4710.
- Euler, L. 1744. Methodus Inveniendi Lineas Curvas Maximi Minimive Probreietate Gaudentes. Lausanne and Geneva, Marcum Michealem Bousquet, 245 s.
- Filonenko-Borodich, M. M. 1940. Some approximate theories of the elastik foundation. *Uchenyie Zapiski Moscovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Mehanika*, 46, 3-18.
- Fleck, N.A., Hutchinson, J.W. 1993. A phenomenological theory for strain gradient effects in plasticity. *J. Mech. Phys. Solids*, 41: 1825–1857.
- Fleck, N.A., Hutchinson, J.W. 2001. A reformulation of strain gradient plasticity. *J. Mech. Phys. Solids*, 49: 2245–2271.
- Ghadiri, M., Shafiei, N. 2016. Vibration analysis of rotating functionally graded Timoshenko microbeam based on modified couple stress theory under different temperature distributions. *Acta Astronautica*, 121: 221-240.

- Ghadiri, M., Shafiei, N., Alavi, H. 2017. Vibration Analysis of a Rotating Nanoplate Using Nonlocal Elasticity Theory. *Journal of Solid Mechanics*, 9: 319-337.
- Hetenyi, M. 1946. Beams on Elastic Foundation, The University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan. 94.
- Huang, Y. and Li X.F. 2011. Buckling analysis of nonuniform and axially graded columns with varying flexural rigidity. *Journal of Engineering Mechanics*, 137 (1): 73-81.
- Kalaugher, L. 2003. Nanoactuator gets in a spin. <https://physicsworld.com/a/nanoactuator-gets-in-a-spin/> [Son erişim tarihi: 07.03.2020].
- Koiter, W.T. 1964. Couple stresses in the theory of elasticity: I and II. *Proc. K. Ned. Akad. Wet. B-Phys. Sci.*, 67: 17-44.
- Kong, S., Zhou, S. Nie, Z. and Wang, K. 2008. The size-dependent natural frequency of Bernoulli-Euler micro-beams. *International Journal of Engineering Science*, 46: 427-437.
- Lam, D.C.C., Yang, F. Chong, A.C.M. Wang, J. and Tong, P. 2003. Experiments and theory in strain gradient elasticity. *J. Mech. Phys. Solids*, 51: 1477-1508.
- Lee, K.B., Choi, M.K., Lee, T.E. and Kim, I.Y. 2002. Elastica of shear deformable tapered columns, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 6: 135-141.
- Lee, K.B. and Km, K.S. 2006. Elastics and buckling loads of shear deformable tapered columns with hinged ends. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 10: 275-281.
- Lee, K.B., Li, G., Kim, S.K. and Ahn.D.S. 2003. Buckling of linearly tapered columns laterally restrained by multiple elastic spring. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 7: 305-311.
- Lei, J., Yuming, H., Guo,S., Li, Z. and Liu, D. 2016 Size-dependent vibration of nickel cantilever microbeams: Experiment and gradient elasticity. *AIP Advances* 6: 105202.
- Lestari, W. and Hanagud, S. 2001. Nonlinear vibration of buckled beams: some exact solutions. *International Journal of Solids and Structures*, 38: 4741-4757.
- Li, Q.S. 2001. Exact solutions for buckling of non-uniform columns under axial concentrated and distributed loading. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 20(3): 485-500.
- Lim, C. W., Zhang, G. and Reddy, J.N. 2015. A higher-order nonlocal elasticity and strain gradient theory and its applications in wave propagation. *J. Mech. Phys. Solids*, 78: 298-313.
- Loos, M. 2015. Carbon Nanotube Reinforced Composites, Elsevier yayımları, Amerika Bileşik Devletleri, 36 s.
- McLaughlin, J. 2015. Nanotechnology <https://slideplayer.com/slide/5837576/> [Son erişim tarihi: 15.07.2015].
- Mindlin, R.D. 1965. Second gradient of strain and surface tension in linear elasticity. *Int. J. Solids Struct.*, 1: 417-438.

- Mindlin, R.D. and Tiersten, H.F. 1962. Effects of couple-stresses in linear elasticity. *Arch. Ration. Mech. Anal.*, 11: 415–448.
- Numanoğlu, H.M. 2017. Nanoyapıların kiriş ve çubuk modellerinin yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak titreşim analizi. Bitirme Tezi, Akdeniz Üniversitesi(yayınlanmamış), Antalya.
- Pradhan, K.K. and Chakraverty, S. 2013. Free vibration of Euler and Timoshenko functionally graded beams by Rayleigh–Ritz method. *Composites Part B: Engineering*, 51: 175-184.
- Rahai , A.R. and Kazemi, S. 2006. Buckling analysis of non-prismatic columns based on modified vibration modes. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* . 1721-1735.
- Rayleigh, L. 1877. The Theory of Sound, vol 1 , The Macmillan Company
- Ritz, W. 1909. Theorie der transversalschwingungen einer quadratische Platte mit freien Randern, *Annalen der Physik* , 28: 737-786
- Seidi, J. and Kamarian, S. 2017. Free vibration of non- uniform CNT/fiber/polymer nanocomposite beams. *Curved and Layered Structures*, 4: 21-30
- Şimşek, M. and Reddy, J.N. 2013. A unified higher order beam theory for buckling of a functionally graded microbeam embedded in elastic medium using modified couple stress theory. *Composite Structures*, 101: 47-58.
- Park, S.K. and Gao, X. 2006. Euler Beam Model Based on a Modified Couple Stress Theory. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 16(11), 2355-2359.
- Pasternak, P. L. 1954. On a new method of analysis of an elastik foundation by means of two foundation constants. *Gosudarstvennoe IzdatelstvoLiteraturi po Stroitelstvu i Arkhitekture Moskow*, Russia.
- Sankar, B. V. 2001. An elasticity solution for functionally graded beams. *Composites Science and Technology*, 61: 689-686.
- Shafiei, N., Kazemi , M. and Ghadiri, M. 2016a. On size-dependent vibration of rotary axially functionally graded microbeam. *International Journal of Engineering Science* 101: 29-44.
- Shafiei, N., Kazemi, M. and Ghadiri, M. 2016b. Nonlinear vibration of axially functionally graded tapered microbeams. *International Journal of Engineering Science*, 102: 12-26.
- Shafiei, N., Kazemi, M. and Ghadiri, M. 2016c. On size-dependent nonlinear vibration of porous and imperfect functionally graded tapered microbeams. *International Journal of Engineering Science*, 106: 42-56.
- Toupin, R.A. 1964. Theory of elasticity with couple stresses. *Arch. Ration. Mech. Anal.*, 17: 85–112.
- Vardoulakis, I., Sulem, J. 1995. Bifurcation analysis in geomechanics. Blackie/Chapman and Hall, London.

- Vlasov, V. Z. and Lepnt'ev, N. N. 1966. Beams plates and shells on elastic foundations. Israel Programme for scientific translations, Tel. Aviv.
- Yang, F., Chong, A.C.M., Lam, D.C.C. and Tong, P. 2002. Couple stress-based strain gradient theory for elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 39(10): 2731-2743.
- Yaylı, M.Ö. 2014. Free vibration behavior of a gradient elastic beam with varying cross section. *Shock and Vibration*, Article ID 801696.
- Yaylı, M.Ö. 2015. Buckling analysis of a rotationally restrained single walled carbon nanotube. *Acta Physica Polonica A*, 127(3): 678-683.
- Yılmaz, S. 2014. Nanomalzemeleri mimaride kullanım olanakları. Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 220 s.
- Yılmaz, Y. and Girgin, Z., Evran, S., 2013. Buckling Analyses of Axially Functionally Graded Nonuniform Columns with Elastic Restraint Using a Localized Differential Quadrature Method. *Mathematical Problems in Engineering Volume*, Article ID 793062, 12 pages.
- Wang, C.M., Wang, C.Y. and Reddy, J.N. 2005. Exact Solutions for Buckling of Structural Members, CRC Press, Florida.
- Winkler, E. 1867. Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit, Prague, Czechoslovakia.
- Zimmerman, K. 1942. Die Berechnung der Söldruckverteilung unter Grundungskörpern, Der Bauingenieur.

ÖZGEÇMİŞ

Vusal NAZAROV

vusal_nazarov@outlook.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2017-devam ediyor	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2013-2017	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim dalı, Antalya