

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**MİKRO KİRİŞLERİN BURKULMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ BOYUT
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Anıl YILDIRIM

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**MİKRO KİRİŞLERİN BURKULMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ BOYUT
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Anıl YILDIRIM

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKRO KİRİŞLERİN BURKULMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ BOYUT
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Anıl YILDIRIM
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 12/07/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Bekir AKGÖZ (Danışman)

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Dr. Öğr. Üyesi Kadir MERCAN

ÖZET

MİKRO KİRİŞLERİN BURKULMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ BOYUT ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Anıl YILDIRIM

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bekir AKGÖZ

Haziran 2024; 42 sayfa

Günümüz teknolojisi hızla gelişmeye devam etmektedir. Yapılan çalışmalar ile birlikte araştırmacılar mikro boyutun da makro boyutlar kadar önemli olduğunu anlamışlardır. Bu boyutlardaki çalışmalar ile birlikte mikro-nano yapıların daha dayanıklı ve hafif olabileceği, bu yapıların ve nanomalzemelerin de daha üstün mekanik özelliklere sahip olabileceği görülmüştür. Bu yüzden nanoteknoloji kendine günümüz dünyasında önemli bir araştırma alanı oluşturmuştur. Nano-mekanik alanında yapılan atomik modelleme ve deneysel çalışmaların maliyetinin yüksek olması ve uzun zaman gerektirmeleri bunların sınırlı sayıda olmasına neden olmuştur. Bu yüzden yapılan çalışmalarda sürekli ortamlar mekaniği gibi yaklaşımlar tercih edilmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında, mikro boyuttaki homojen kirişlerin burkulma davranışı analiz edilmiştir. Analizi yaparken malzeme olarak nikel seçilmiştir. Model oluşturulurken Euler-Bernoulli kiriş modeli kullanılmış olup yeni yöntemlerden biri olan yeniden formüle edilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorisi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada mikro kirişin burkulma hesabı yapılırken Rayleigh-Ritz yöntemi, bir ucu ankastre diğer ucu serbest ve bir ucu hareketli diğer ucu sabit mesnetli olacak şekilde iki farklı sınır koşuluna uygulanmıştır. Farklı malzeme boyut parametreleri kullanılarak analiz yapılmıştır ve bulunan kritik burkulma yüklerinin farklı teoriler ile karşılaştırılması yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Boyut etkisi, Burkulma davranışı, Euler-Bernoulli kirişi Rayleigh-Ritz metodu, Yeniden formüle edilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorisi.

JÜRİ: Doç. Dr. Bekir AKGÖZ

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Dr. Öğr. Üyesi Kadir MERCAN

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE SIZE EFFECT ON BUCKLING BEHAVIOR OF MICROBEAMS

Anıl YILDIRIM

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

June 2024; 42 pages

Nowadays, technology is developing and evolving very fast. With current studies researchers all around the world see that micro dimension is important as macro dimension. Studies in these sizes found that micro-nano structures and materials can be more durable and at the same time can be very light. These structures and also nano materials can have supreme mechanical properties comparing to their macro sized equivalents. This is why nanotechnology is crucial research topic. In this research field studies are expensive and needs a lot of time to get great results out of them. This is why researchers prefer continuum mechanics.

In this thesis study the buckling behavior of micro beams is presented. The material used is nickel. Euler-Bernoulli beam model and Reformulated strain gradient elasticity theory is used for modeling the microbeams. Also for analyzing the buckling behavior Rayleigh -Ritz method is used. For different boundary conditions clamped-free end and simple supported beams are picked. Buckling behavior and size effects are analyzed for different material length-scale parameters and different non classical theories. Different conditions like length and beam thickness increasing and their effects on critical buckling load and non-dimensional buckling loads are studied. Size effects with this new model specially on smaller beams are visible.

KEYWORDS: Buckling behavior, Euler-Bernoulli model, Rayleigh- Ritz method, Reformulated strain gradient elasticity theory, Size effect

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Asst. Prof. Dr. Kadir MERCAN

ÖNSÖZ

Nanoteknoloji yakın geleceğin en önemli araştırma alanlarından biridir. Bunun nedeni değişen dünyada ihtiyaçlarımızın giderek artmasıdır. Bu alan, bu ihtiyaçların yenilikçi bir şekilde ve farklı bakış açılarıyla karşılanmasına yardımcı olmaktadır.

İnşaat alanında nanoteknoloji; sürdürülebilir binalar, yeşil binalar, daha güçlü ve daha hafif yapılar, daha estetik görünüm gibi birçok alana katkı sağlamaktadır. Nanoteknoloji alanında artan araştırmalarla birlikte, bu yapılardaki malzemelerin mekanik davranışlarının normal boyuttaki benzerlerinden 1-100 nanometreye kadar farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Klasik yöntemlerle elde edilen sonuçlar mikro boyuttaki yapılar için hatalı çıkmıştır. Bu nedenle boyut etkilerini de dikkate alan yeni teoriler geliştirilmiştir.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca ne olursa olsun bana hep yardımcı olan ve bana değerli zamanını ayıran, bana danışmanlık yapan çok değerli Doç. Dr.Bekir AKGÖZ'e, benim her daim yanımda olan, maddi ve manevi destek olan aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Nanoteknoloji Kavramı ve Nanomalzemeler	1
1.1.1.Karbon Nanotüpler	2
1.1.2.Borofen	3
1.1.3.Nikel elementi ve nikel malzemeler	5
1.2. Nanoteknolojinin Başlıca Uygulama Alanları	7
1.2.1. Sağlık	7
1.2.3.Enerji.....	8
1.2.4.Elektronik Sistemler ve Bilgisayarlar	9
1.2.5. İnşaat Mühendisliği	10
2. KAYNAK TARAMASI	12
3. MATERYAL VE METOT	19
3.1. Değiştirilmiş Gerilme Çifti Teorisi (DGÇT).....	19
3.2. Değiştirilmiş Şekil Değiştirme Değişimi Teorisi (DŞDDT)	19
3.3. Yeniden Formüle Edilmiş Şekil Değiştirme Değişimi Teorisi (YFEŞDDT).....	20
3.3.1.Klasik olmayan teoriye göre Burkulma analizi	22
3.3.2. Rayleigh-Ritz Metodunun uygulanması	24
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	26
5. SONUÇLAR	37
6. KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum MİKRO KİRİŞLERİN BURKULMA DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ BOYUT ETKİSİNİN İNCELENMESİ adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

12/07/2024

Öğrencinin Adı Soyadı

Anıl YILDIRIM

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Kirişin kesit alanı
b	: Kiriş genişliği
c_i	: Şekil fonksiyonu sabiti
E	: Young modülü
ε_{ij}	: Şekil değiştirme tansörü
$\varepsilon_{mm,i}$	Dilatasyon (genleşme) değişimi vektörü
ε'	: Deviatorik şekil değiştirmeler
e_{ijk}	: Permütasyon sembolü
ϕ_i	: Sınır koşullarını sağlayan kabul edilebilir fonksiyon
h	: Kiriş yüksekliği
L	: Kiriş uzunluğu
l	: Boyut ölçek parametresi
l_s	: Gerilme değişimi etkisi malzeme boyut parametresi
l_m	: Gerilme çifti malzeme boyut parametresi
G	: Kayma modülü
I	: Kiriş enkesit alanının atalet momenti
Π	: Toplam minimum potansiyel enerji
N	: Polinom sayısı
$\eta_{ijk}^{(1)}$	: Deviatorik uzama değişimi tansörü
η_{xxx}^S	: Deplasman gradyan tansörü
m_{ij}	: Gerilme çifti tansörü
m_{ij}^S	: Yüksek mertebeli gerilme tansörü

θi	: Dönme vektörü
P :	: Eksenel basınç kuvveti
σ_{ij}	: Gerilme tansörü
δ_{ij}	: Kronecker delta
τ_{ijk}^S	: Simetrik çift gerilme tansörü
λ	: Lamé sabiti
U	: Şekil değiştirme enerjisi
u	: Deplasman vektörü
$W_{Dış}$	: Dış kuvvetlerinin yaptığı iş
Wi	: Deneme fonksiyonu
V	: Eksenel kuvvetin potansiyeli
ν	: Poisson oranı
χ_{ij}	: Eğrilik tansörü
χ_{ij}^S	: Simetrik dönme değişimi tansörü

Kısaltmalar

BKB	: Boyutsuz kritik burkulma
BKBY	: Boyutsuz kritik burkulma yükü
DGÇ	: Değiştirilmiş gerilme çifti
DGÇT	: Değiştirilmiş gerilme çifti teorisi
DŞDDT	: Değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi teorisi
FD	: Fonksiyonel derecelendirilmiş
GÇ	: Gerilme çifti
GÇT	: Gerilme çifti teorisi
GPa	: Gigapaskal
KNT	: Karbon nanotüp

MEMS	: Mikro elektro-mekanik sistemler
Ni	: Nikel
TEM:	: Taramalı elektron mikroskobu
YOET:	: Yerel olmayan elastisite teorisi
YFEŞDD	: Yeniden formüle edilmiş şekil değiştirme değişimi
YFEŞDDT	: Yeniden formüle edilmiş şekil değiştirme değişimi teorisi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. Nanoteknoloji ile güçlendirilmiş su tutmayan kumaş (Anonim 1).....	2
Şekil 1. 2. Farklı karbon nanotüp çeşitleri (Beşergil, 2019).....	3
Şekil 1. 3. Borofen kristal yapılanmaları ve çeşitleri, a) β_{12} borofeni b) X_3 borofeni c) Çizgili borofen (Peng , 2017).....	5
Şekil 1. 4. TEM ile çekilmiş nikel nanoparçacıklar (Khatib-El M. , 2018).....	6
Şekil 1. 5. Nanotaşıyıcılar ile ilaç dağıtım sistemi modeli (Anonim 2).....	7
Şekil 1. 6. Nanoteknoloji ile güçlendirilmiş güneş panelleri (Anonim 3)	8
Şekil 1. 7. Karbon nanotüp ile güçlendirilmiş rüzgâr türbini (Case Western Reserve University, 2011.).....	9
Şekil 1. 8. Nanoteknoloji ile güçlendirilmiş akıllı saat (Anonim 4)	10
Şekil 1. 9. Uzay asansörü modeli (Anonim 5).....	11
Şekil 3.1.a Bir ucu sabit bir ucu hareketli mesnetli kiriş	22
Şekil 3.1.b Bir ucu ankastre diğer ucu serbest kiriş.....	22
Şekil 4.1. Bir ucu sabit diğer ucu hareketli mesnetli mikro kirişin farklı L/h oranlarında farklı teoriler için kritik burkulma yükü değerleri	29
Şekil 4.2. Bir ucu ankastre diğer ucu serbest konsol kirişin farklı L/h oranlarında farklı teoriler ile kritik burkulma yükü değerleri	30
Şekil 4.3. Basit mesnetli kirişin farklı teoriler ve boyut parametreleri için kritik burkulma yükünün L/h oranına bağlı değişimi	31
Şekil 4.4. Konsol mikro kirişin farklı teoriler ve boyut parametreleri için kritik burkulma yükünün L/h oranına bağlı değişimi	32
Şekil 4.5. Konsol kiriş ve basit mesnetli kirişin kritik burkulma yükünün L/h oranına bağlı değişimi	33

Şekil 4.6. Basit mesnetli mikro kirişin boyutsuz kritik burkulma yükünün kiriş yüksekliğine bağlı değişimi	34
Şekil 4.7. Bir ucu ankastre diğer ucu serbest olan kiriş için BKBY değerlerinin yüksekliğe bağlı olarak değişimi.....	35
Şekil 4.8. Kritik burkulma yüklerinin L/h oranlarına göre karşılaştırılması.....	36



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Farklı koşullar için terim sayısına göre boyutsuz kritik burkulma yükleri.....	26
Çizelge 4.2. Farklı yükseklik değerleri için boyutsuz kritik burkulma değerleri.....	27
Çizelge 4.3. Farklı L/h oranları ve farklı malzeme boyut parametreleri için kritik burkulma yükleri değerleri ($\mu N \times 10^5$).....	27



1. GİRİŞ

1.1. Nanoteknoloji Kavramı ve Nanomalzemeler

Nanometre, metrenin milyarda birine (10^{-9}) karşılık gelmektedir. Nanoteknoloji ise kısaca bir malzemenin nano boyutta çalışılması, işlenmesi olarak tanımlanabilir. Nanoteknoloji günümüzde sağlık, biyoloji, mühendislik, malzeme bilimi, kimya, fizik, tekstil, enerji, elektrik-elektronik, inşaat ve jeoloji gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Nanomalzemeler birçok alanda kullanıldıkları için bu malzemeler birçok farklı şekilde tanımlanabilir. Günümüzde nanoteknoloji alanında, nanomalzemelerin iletkenlikleri, ısı iletkenlikleri, erime noktaları, eğilme ve burkulma gibi davranışları, eksenel dayanıklılıkları gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra malzemelerin atomik ve moleküler boyutta dizilimleri incelenerek malzemelerin atomik boyuttaki davranışları araştırılmaktadır.

Nanoteknoloji ve nanomalzemeler günümüzdeki ve gelecekteki dünya için oldukça önemlidir. Bu yüzden nanoteknoloji tüm dünya tarafından dikkatle incelenmekte ve yaygın uygulama alanları olmasından dolayı İngiltere, Amerika, Rusya ve Almanya gibi gelişmiş ülkeler tarafından bolca Ar-Ge'si yapılmakta olan bir araştırma alanı olmuştur. Tüm alanlarda olduğu gibi inşaat alanında da nanoteknoloji yeni yöntemler, teknikler ve nanoteknoloji ile geliştirilen malzemeler ile daha yenilenebilir, sürdürülebilir, çevreye daha duyarlı malzemeler üretmeyi ve daha dayanıklı, hafif ve daha hesaplı yapılar, oluşturmayı amaçlamaktadır.

Bu alandaki uygulamalarda genellikle mikro-nano yapılar kullanılır. Bu mikro yapılar genellikle mikro elektronik mekanik sistemler (MEMS) formunda bulunur. MEMS cihazlarının boyutları genellikle mikrometreden milimetreye kadar değişir ve genellikle elektrik, mekanik ve algılama bileşenlerini tek bir çip üzerinde birleştirirler. MEMS yapılarının modellenmesi ise 1980'lerde Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) ve bunun türevleri ile mümkün kılınmıştır. TEM ve MEMS inşaat mühendisliğinde genellikle yapıların deformasyon, titreşim ve dayanıklılık gibi mekanik özelliklerinin incelenmesinde, yapıları oluşturan malzemelerin dayanıklılığını ölçmede kullanılabilir. Nanomalzemeler arasında inşaat alanında en çok kullanılan malzemeler ise titanyum dioksit, karbon nanotüpler, karbit, grafen, borofen, borofin, silika, bakır, kil ve alüminyum oksittir. Bu malzemelere arasında en yaygın olanları karbon nanotüp yapılar

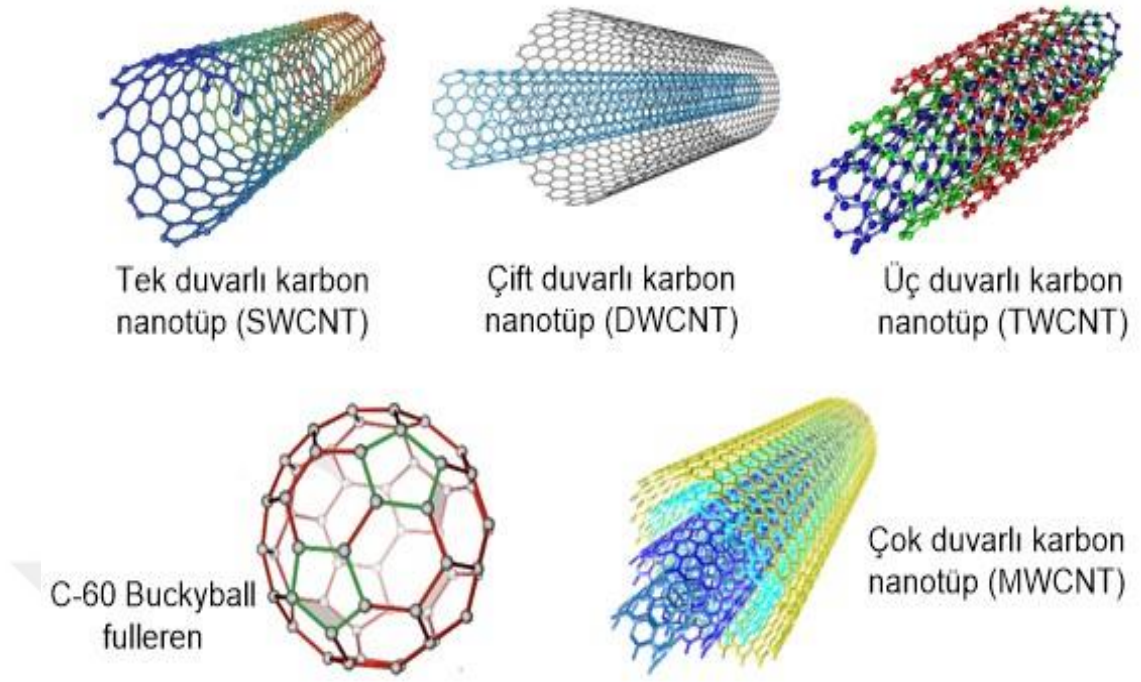
olsa da son yıllarda borofe ve karbit nanomalzemelerin çalışmaları, uygulama alanları ve özelliklerinin araştırmaları da revaçtadır.

1.1.1.Karbon Nanotüpler

Karbon nanotüpler fulleren ve grafitlerden oluşabilen ve bu nanomalzemelerin nano boyda silindirik bir tüp şeklinde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Karbon nanotüpler tek çeperli ya da çok çeperli olabilmektedirler. Tek çeperlilerin çapları 1 nm ve/veya daha az olabilirken çok çeperlilerin çapları 100 nanometrelere ulaşabilir. Uzunlukları değişmekle birlikte mikrometrelere hatta milimetrelere ulaşabilir. Karbon nanotüpler güçlü bağlarla birleşmiştir. Bu özellik, karbon nanotüplerin Van der Waals kuvvetleri aracılığıyla birbirine bağlanmaya yönelik doğal eğilimi ile birleştiğinde, yüksek iletkenliğe sahip elektriksel ve termal özelliklere sahip ultra yüksek mukavemetli, düşük ağırlıklı malzemeler geliştirme fırsatı sunar. Bu özellik onları daha fazla alanda uygulanabilir kılar. Şu anda, karbon nanotüplerin kullanım amacı ise bazı malzemelere katkı maddesi olarak eklenerek onların dayanıklılığını arttırmaktır. Karbon nanotüpler özel lifler halinde kullanılarak ütöpik bir projenin (uzay asansörü) gerçekleştirilmesinde kullanılabilir. Karbon nanotüpler normal malzemelere göre daha dayanıklı, güçlü ve hafif olduğu için birçok alanda, malzeme yapımında kullanılabilmektedir. Otomotiv, bisiklet, uçak, uzay mekiği, gemi, spor malzemeleri ve kumaşlar bunlara örnek olarak verilebilir. Aynı zamanda tıp alanında hastalık tanısı, tedavisi ve radyasyon cihazlarında da kullanımı bulunmaktadır.



Şekil 1. 1. Nanoteknoloji ile güçlendirilmiş su tutmayan kumaş (Anonim 1)



Şekil 1. 2. Farklı karbon nanotüp çeşitleri (Beşergil, 2019)

1.1.2.Borofen

Nanomalzemeler ve nano yapılar birçok kullanım alanına sahip oldukları için bu farklı dallarda ve alanlarda bu durumlara uyabilecek farklı nanomalzemelerin kullanılması, ayrıca bu farklı alanlar için uygun araştırmaların yapılması önemlidir. Bu geliştirilen nanomalzemelerden biri olan borofen ise ülkemizde bulunan zengin bor minarellerinden dolayı şu an özellikle Türkiye’de ön planda olan bir nanomalzemedir.

Borofen iki boyutlu bor atomlarının tek atom boyutu kalınlığında birleşmesiyle oluşan bir bor katmanıdır. Aynı zamanda bor atomlarının kristalize yapılarıyla birlikte tek katman halinde birleşmesiyle oluştuğu da bilinir.

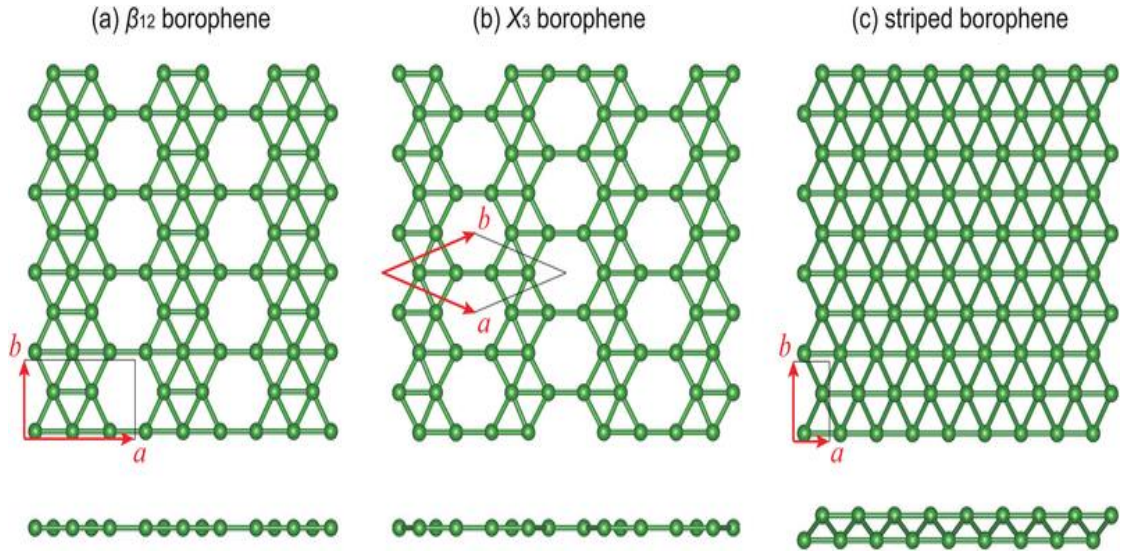
Borofenler üzerine yapılan araştırmalarda ise aslında bu yapının 1990’larda oluşturulabileceği kanıtlanmıştır fakat ilk olarak deneysel sentezlenmesi ancak 2015 yılında gerçekleştirilmiştir ve bu sentezleme borofen çalışmaları için bir dönüm noktası olarak kabul görmektedir. Yapılan birçok çalışmayla birlikte borofen uygun alanlarda farklı formlarda uygulanabilir hale gelmiştir.

Borofenin şu anda yaygın olarak kullanılan ve bilinen grafene göre daha dayanıklı ve daha esnek olduğu bulunmuştur. Fakat grafene göre daha yeni bir malzeme olduğu için üzerindeki çalışmalar hala devam etmektedir.

Borofenin en ilginç yönlerinden biri yüksek taşıyıcı hareketliliği ve ayarlanabilir bant aralığıdır. Bu özellikler borofenleri daha hızlı, daha verimli transistörler ve mantık kapıları geliştirmek amacıyla daha çekici kılmaktadır. Araştırmacılar, borofenin üstün elektronik özelliklerinden yararlanarak elektronikte devrim yaratmayı ve bilgi işlem gücü ve veri işlemedeki ilerlemelerin önünü açmayı düşünmektedirler. Borofenin olağanüstü güç-ağırlık oranı ve termal kararlılığı, onu havacılık uygulamaları için ilgi çekici bir aday haline getirmektedir.

Hafif ama güçlü olan borofen malzemeler, havacılık yapılarının ve bileşenlerinin tasarımında devrim yaratarak yakıt açısından daha verimli uçak ve uzay araçlarının geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Ayrıca, borofenin optik şeffaflığı ve ayarlanabilirliği, gelişmiş güneş pilleri ve yenilikçi aydınlatma sistemleri için heyecan verici olasılıkların önünü açmaktadır. Araştırmacılar borofeni bu teknolojilere dahil ederek enerji verimliliğini artırmayı ve sürdürülebilir enerji üretiminin yeni yollarını keşfetmeyi ummaktadırlar. Ayrıca bataryalarda daha uzun ömürlü ve daha verimli batarya üretimi için kullanılabilen borofen aynı zamanda uçaklarda, özellikle savaş uçaklarının dayanımında ve hızında etkili olabileceği için savunma sanayii için de önemli bir malzeme haline gelmiştir. Ülkemizdeki TOGG ve milli savaş uçakları gibi projelerde önemli bir AR-GE çalışması haline gelmiştir.

Borofen hem üstün mekanik özelliklerinden dolayı hem de ülkemizde bulunan bor minerallerinin zenginliğinden dolayı önemli bir AR-GE çalışması haline gelmiştir. Ülkemizde özellikle Sabancı Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi borofen üzerinde önemli çalışmalar yapmışlardır. Ayrıca dünyada sınırlı sayıda üretiminin yapıldığı borofen, burada da üretilmiştir.



Şekil 1. 3. Borofen kristal yapıları ve çeşitleri, **a)** β_{12} borofeni **b)** X_3 borofeni **c)** Çizgili borofen (Peng, 2017)

1.1.3. Nikel elementi ve nikel malzemeler

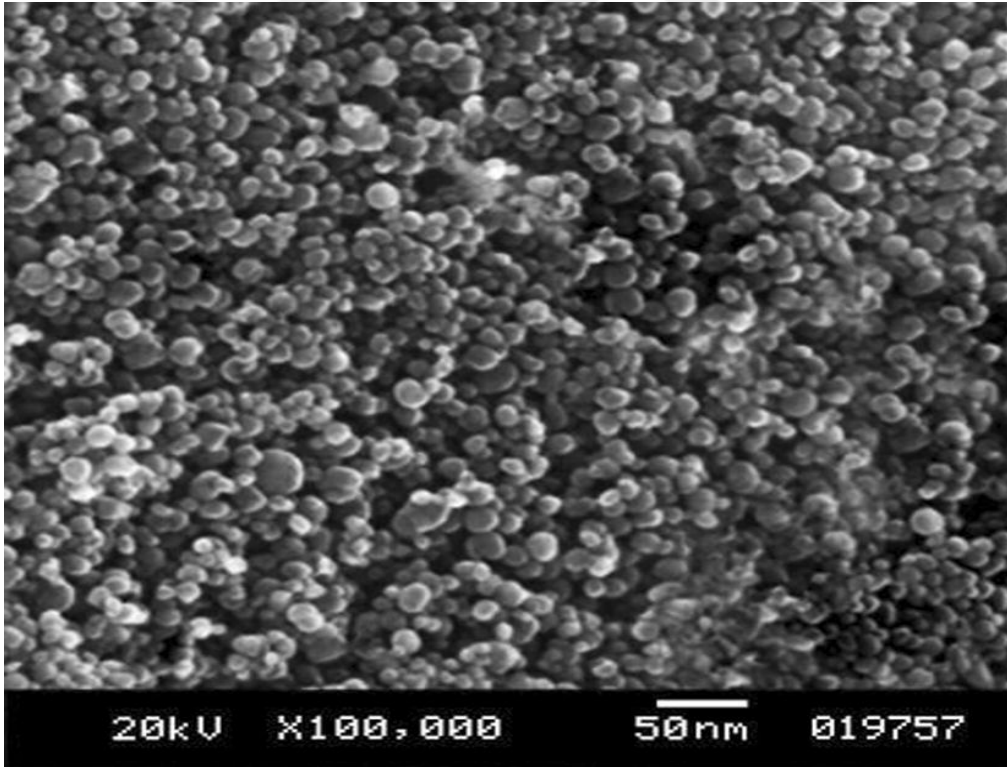
Nanomalzemelerde birçok farklı malzeme türü kullanılabilir. İnorganik nanomalzemelerde kullanılan en yaygın nanoparçacıklar ise metal ve türevleridir. Bu malzemelere altın (Au), çinko (Zn), gümüş (Ag), nikel (Ni), bakır (Cu), titanyum (Ti) ve bu malzemelerin alaşımları, türevleri örnek olarak verilebilir. Bu çalışmada ise nikel çubukların farklı mesnetlenme koşulları altındaki burkulma davranışları incelenmiştir.

Nikel elementi bir metal olup Mendeleyev tablosundaki atom numarası 28 ile gösterilmektedir. Kimyasal sembolü “Ni”dir. Saf nikel nanoparçacıkların boyutları 24 ila 200 nm arasında değişebilmektedir. Nikel nanoparçacıklar mekanik özellikleri bakımından çok işlevseldirler. Dayanıklı bir yapıya sahiptirler, iletkenlik açısından yüksek, korozyona karşı dayanıklı bir yapıları vardır. Bu özelliklerinden dolayı elektronikten havacılığa kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar. Nikel çok iyi bir alaşım malzemesidir. Bu yüzden altın, gümüş, krom, bakır gibi birçok malzemeyle alaşım şeklinde kullanılmaktadır. Demir ve bakır alaşımlarında nikelin güçlü manyetik özelliklerinden faydalanılır. Saf nikel, diğer alkalilere karşı daha dayanıklı olduğu için araçların yapımında ve para basımında da yine alaşım formunda kullanılabilir. Yine de nikelin en yaygın kullanım alanının krom ile birleştiğinde oluşan alaşımı olan paslanmaz çelik olduğu söylenebilir. Paslanmaz çelik özelliğinden dolayı günümüzde tencere, tava,

kaşık gibi mutfak malzemelerinde, çamaşır makinesinin iç kısmı, lavabolar gibi beyaz eşyalarda, bilgisayar, televizyon ve telefon gibi elektronik aletlerde, inşaat sektöründe ise çelik levhalar ve çelik donatılar, aynı zamanda güçlü bir kaplama yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Nikel nanopartiküller, malzemelerin yanma ısısını, dayanıklılığı ve verimliliği arttırmak için sadece nikel partikül şeklinde veya alaşımlı şekillerde de kullanılmaktadır. Katkı maddesi olarak kullanıldığında seramik ve metallerin sinterleme sıcaklığını düşürür. Aynı zamanda plastik, nanotel, tekstil ve nanofiber üretiminde de başarıyla kullanılmaktadır. Nikel nanoparçacıkların yaygın kullanım alanlarından birisi ise biyoloji ve su bilimleridir. Bu parçacıklar bisfenol-a gibi plastik malzemelerde ve su alanlarında bol bulunan toksik maddelerin tespitinde kullanılabilirler.

Nikelin Elastisite modülü 207 GPa 'dır. Bu çalışmada kullanılan nikel çubuklar için DGÇT teorisinde boyut ölçek parametresi Lei vd. (2016)'ne ait $l = 1.553 \mu m$ ve $l = 0$ olarak alınmıştır.

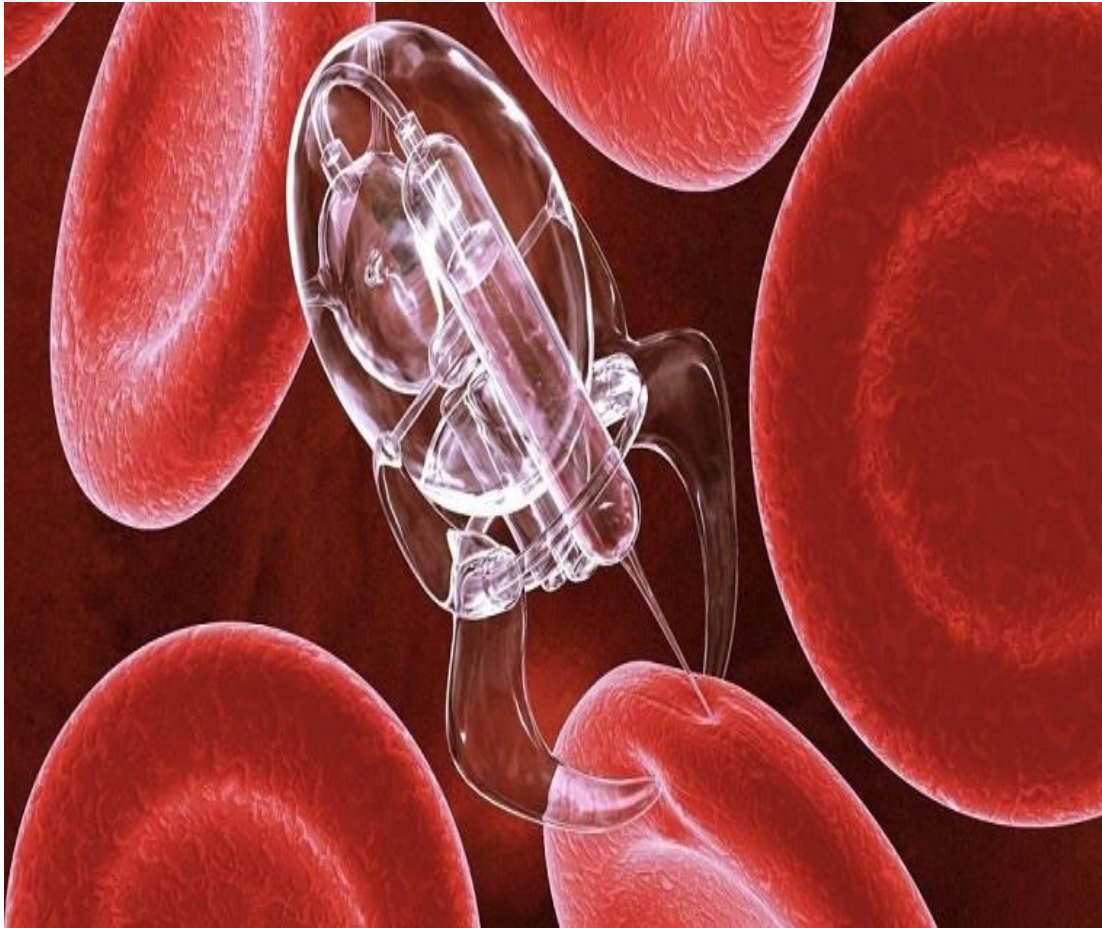


Şekil 1. 4. TEM ile çekilmiş nikel nanoparçacıklar (Khatib-El M., 2018)

1.2. Nanoteknolojinin Başlıca Uygulama Alanları

1.2.1. Sağlık

Nanoteknolojik materyallerin özellikleri sağlık alanında birçok hastalığın tedavisi, tespiti ve izlenmesi, ilaç yönetimi ve ilaç dozajının ayarlanması, DNA ve RNA araştırmaları, akıllı tıp, kişisel bakım ve kozmetik, güneş kremleri ve daha az toksik ilaçların üretilmesi ve kullanılması gibi birçok alanda da insan sağlığını iyileştirmek için araştırılmaya devam edilmektedir. Örnek verecek olursak bu çalışmalardan birinde meme kanserinin tedavisinde kullanılabilecek olan nanotaşıyıcılar ile kanser hücrelerinin reseptörlerinin belirlenmesi kolaylaşmaktadır. Kemoterapi ilaçlarının kullanımı sırasında ortaya çıkabilecek toksisite ve kemorezistans gibi negatif etkiler en aza indirilebilir.



Şekil 1. 5. Nanotaşıyıcılar ile ilaç dağıtım sistemi modeli (Anonim 2)

1.2.3.Enerji

Nanoteknoloji enerji sektöründe de birçok yeniliğin kapısını açmıştır. Nanoteknoloji, günümüzün gelişmekte olan ülkelerinde artan enerji taleplerine ve buna bağlı iklim sorunlarına yeni çözümler sunmaya başlamıştır. Enerji alanında nanoteknoloji ise geleneksel yöntemlerin yerine daha temiz, daha yeşil, daha az toksik, yenilenebilir ve uygun maliyetli enerji üretim yöntemleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Enerji alanında nanoteknolojinin yaygın kullanımlarından biri olarak ise güneş panelleri örnek verilebilir. Nanoteknoloji ile birlikte güneş panellerinden elde edilen enerjinin artırılabilir. Aynı zamanda şarj olabilen pillerin daha hızlı ve daha verimli şarj edilmesi sağlanabilir. Rüzgâr tribünlerinde nanoparçacıkların kullanılmasıyla birlikte tribünlerin daha dayanıklı ve hafif olması sağlanabilir.



Şekil 1. 6. Nanoteknoloji ile güçlendirilmiş güneş panelleri (Anonim 3)



Şekil 1. 7. Karbon nanotüp ile güçlendirilmiş rüzgâr türbini (Case Western Reserve University, 2011.)

1.2.4.Elektronik Sistemler ve Bilgisayarlar

Nanoteknoloji, bilgisayar ve elektronik alanında malzemeler üzerinde çalışarak daha hızlı ve taşınabilir veri akışını sağlamaktadır. Aynı zamanda diğer alanlarda da olduğu gibi bilgisayarlar ve elektronik sistemlerde daha küçük, hafif ve daha dayanıklı malzemeler üretmeyi amaçlamaktadır. Tüm modern bilgisayar işlemlerini mümkün kılan temel anahtarlardan biri olan transistörler, nanoteknoloji sayesinde giderek küçülmüşlerdir. Yüzyılın başında, tipik bir transistörün boyutu 130 ila 250 nanometre iken Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı 2016'da 1 nanometre olan transistörleri bulmuşlardır. Nanoteknolojinin bu alanlarda kullanımına ise yeni nesil televizyonlar, akıllı saatler ve lehim sırasında kullanılan bakır nanoparçacıklar örnek verilebilir. Nanoteknoloji sayesinde nanomalzeme kullanılan televizyonlar hem daha canlı renkler verip hem de enerjiden tasarruf yapmaktadırlar. Nanomalzemeli bakır süspansiyonlar ise diğer kullanılan tehlikeli lehim malzemelerine göre daha güvenli ve ucuzdur. Yeni nesil

akıllı saatlerde kullanılan nanomalzemeler sayesinde ise saatler insanların kalp atış hızı, nefes miktarı gibi fiziksel ve ruhsal sağlığı hakkında bilgiler verebilirler.



Şekil 1. 8. Nanoteknoloji ile güçlendirilmiş akıllı saat (Anonim 4)

1.2.5. İnşaat Mühendisliği

Karbon nanotüplerin ve nano-mikro yapıların inşaat mühendisliğindeki başlıca uygulamalarından biri beton, asfalt ve kompozitler gibi yapısal malzemelerin güçlendirilmesidir. Mühendisler, karbon nanotüpleri bu malzemelere dahil ederek, çekme mukavemeti, sertlik ve tokluk dahil olmak üzere malzemelerin bu mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilmektedirler. Karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin, zorlu çevre koşullarına dayanabildikleri ve yapıların toplam ağırlığını azaltabildikleri, hafif fakat dayanıklı oldukları için diğer inşaat malzemelerine kıyasla daha avantajlı malzemeler oldukları söylenebilir. Benzer şekilde nano-mikro yapılar, geleneksel malzemelerin mikro yapısını değiştirmek, performanslarını ve dayanıklılıklarını artırmak için kullanılabilir. Örneğin, çimentolu malzemelere nanoparçacıkların eklenmesi, bu malzemelerin çatlamaya, büzölmeye ve kimyasal bozulmaya karşı direncini artırabilir, böylece inşaat bileşenlerinin hizmet ömrü uzatılabilir.

Nanoteknoloji aynı zamanda inşaat mühendisliğinde sensör ve izleme sistemlerinin geliştirilmesine de kullanılabilir. Karbon nanotüpler ve nanomalzemelerle

donatılmış nano sensörler, sıcaklık, voltaj, nem ve kimyasal bileşimdeki değişiklikleri benzeri görülmemiş bir hassasiyetle tespit edebilirler. Bu sensörler yapının sağlığı, bütünlüğü ve performansı hakkında gerçek zamanlı veriler sağlaması için yapılara yerleştirilebilir. Bu sistemlerin yardımıyla yapının temel parametreleri sürekli izlenerek potansiyel sorunları erken tespit edebilir ve altyapı sistemlerinin güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamak için zamanında müdahale edebiliriz.

Ayrıca, nanoteknolojinin getirdiği avantajlar ile birlikte normalde yapılması imkânsız gibi düşünülen veya yapımının çok zor olduğu uzay asansörü gibi projeler gerçekleştirilebilir. Bilim insanları hala bu proje üstünde çalışmaktadırlar. Uzay asansörünün temel mantığı dünyanın ekvatorundan sabit bir kablo aracılığı ile sabit bir yörüngede yer alan bir uzay istasyonunun arasında bağ kurmaktır. 36.000 km yüksekliğinde olacağı için bu yükseklikteki nesneler gezegenin etrafında bir günde dönerler. Bu nedenden dolayı belli bir noktanın üzerinde sabit bir şekilde duruyormuş gibi görünebilir. Daha sonra bu kablo aracılığı ile uzay istasyonu ve dünya arasında kargo taşıyıcılığı yapan araçlar oluşturulabilir. Bu araçlar ileride insan taşımacılığı için de kullanılabilir fakat bunu gerçekleştirebilmek için araçların büyük seçilmesi gerekir. Uzay asansörü fikri ilk olarak 1895'te Konstantin Tsiolkovski'ten çıkmış olsa da günümüzde hala gerçekleştirilememiştir. Şu an için ise Japon şirketi olan Obayashi Corporation uzay asansörü için yeşil ışık yakmıştır. Şirketin yaptığı açıklamaya göre uzay asansörünün inşaatının 2025 yılında başlaması öngörülmektedir ve asansörün 2050 yılında insanları uzaya taşıyabileceği düşünülmektedir.



Şekil 1. 9. Uzay asansörü modeli (Anonim 5)

2. KAYNAK TARAMASI

Nanoteknolojiye, mikro malzemelere ve bu yapılara fizik, kimya, malzeme bilimi, mühendislik ve biyoloji gibi alanlarda gün geçtikçe ilgi artmaktadır. Birçok araştırmacı bu konular üzerinde çalışmaya başlamıştır. Fakat aynı zamanda bu alanda bulunan yenilikler uygulanırken beraberinde yeni zorlukları da getirmiştir. Nano-mikro boyuttaki yenilikler ve bu sistemler, ilgili alanlarda uygulanırken bu sistemlerin modellenmesi de önemli bir hale gelmiştir.

Klasik ortam mekaniğinde malzemenin bir yapının her yerinde eşit dağıldığı düşünülür. Bu teoriye göre malzeme özellikleri mikro ve nano yapılar için boyut etkisine bakılmaksızın tespit edilebilir. Fakat malzemelerin mekanik özellikleri için aynı şey geçerli değildir. Normal boyuttaki malzemelerin mekanik özellikleri ile mikro-nano boyuttaki malzemelerin mekanik davranışları farklılık gösterir. Mikro-nano yapılardaki mekanik özelliklerin saptanabilmesi için yeni, farklı, boyut etkisinin dikkate alındığı teoriler geliştirilmiştir. Bu teorilerden bazıları Yerel Olmayan Elastisite teorisi (YOET), Değiştirilmiş Gerilme Çifti teorisi (DGÇT), Değiştirilmiş Şekil Değiştirme Değişimi (DŞDD) teorileridir.

Sürekli ortamlar mekaniğinde gerilmenin uzaklıktan dolayı oluşan etkisinin dikkate alınmadığı bilinir. Yerel olmayan süreklilik teorisi veya yerel olmayan esneklik teorisi ise yerel olmayan etkiler olarak bilinen bu uzaklık etkilerini içerir. Yerel olmayan elastisite teorisinde (YOET) belirli noktalardaki gerilmeler hesaplanırken, bitişik noktalardaki deformasyonlardan oluşan gerilmeler ve çubuğun boyutu gibi parametreler dikkate alınmaktadır. İlk olarak Eringen(1972.b.) tarafından ortaya atılan yerel olmayan elastisite teorisini(YOET) Peddieson ve Sudak Euler- Bernoulli kiriş modelini oluştururken kullanmışlardır. Peddieson(2003) nano kirişlerde eğilmede boyut etkisini incelemek için kullanırken Sudak(2003) da çok çeperli karbon nanotüplerde burkulmayı araştırmak için kullanmıştır. Bu araştırmalardan sonra Zhang vd. (2005) bu modeli kullanarak çift çeperli karbon nanotüplerin titreşimini araştırmışlardır. Çalışmada doğal titreşim için kapalı çözüm yöntemleri ve çift çeperli karbon nanotüplerde boyut etkisi araştırılmıştır.

Yüksek mertebeden ortamlar teorileri ilk olarak 1900'lerin başında konuşulmaya başlanmıştır. Gerilme Çifti Teorilerinin varlığı ilk olarak Voigt(1887) tarafından varsayılmış olsa da gerilme çifti içeren malzemelerin matematiksel modelini geliştiren ilk kişiler Cosserat kardeşlerdir (Cosserat ve Cosserat 1909). Gerilme Çifti teorisi (GÇT) ise çok daha sonra geliştirilmiştir. Teori Toupin (1962), Mindlin (1962) ve Tiersten (1962) ve Koiter (1964) tarafından elastik cisimler kullanılarak geliştirilmiştir. Lam vd (1990) yaptıkları bir çalışmada mikro boyuttaki metal ve polimer yapıların karakteristik mekanik özelliklerini GÇ teorisine göre incelemişlerdir.

Yang vd. (2002) yaptıkları çalışma ile yüksek mertebeden denge denklemlerini Değiştirilmiş Gerilme Çifti Teorisi (DGÇT) ile tanıtmışlardır. Bu çalışmada mikro yapıların boyunun çapına eşit olduğu durumlarda rijitliğinin klasik sonuçlara göre 7 kat fazla olduğunu bulunmuştur.

Lam vd. 2003 yılında yaptıkları bir çalışmada değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorisi (DŞDD) üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışma ile kuvvetlerin yüksek mertebeden gerilimleri ve gerilim çiftlerini de kullanan yeni bir denge denklemi elde etmişlerdir.

Park ve Gao (2006), Euler-Bernoulli kiriş modelinin doğrusal etkiler altında eğilmesini DGÇT ile çözmüşlerdir. Burada izotropik mikro kiriş kullanmışlardır. Buluşları doğrultusunda konsol mikro kirişin eğilmesinin klasik elastisite teorilerine oranla daha fazla olduğunu saptamışlardır. Ayrıca boyut etkilerinin göz önünde bulundurulmasıyla eğilme rijitliğinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu etkinin kiriş kalınlığı arttıkça etkisini kaybettiğini de gözlemlemişlerdir.

Park ve Gao'nun modelini geliştirerek, kayma deformasyonu etkisini de göz önünde bulundurarak ve GÇ teorisini kullanarak Ma vd. (2008) mikro kirişler için Timoshenko kiriş modelini oluşturmuşlardır.

Kong (2009) gerilme enerjisi denklemlerine 3 adet farklı boyut parametresi eklenerek oluşturulan Lam'ın teorisini (Lam vd 2003) kullanarak izotropik konsol kirişlerin çökmesini ve doğal frekanslarını incelemek için bir Euler-Bernoulli kiriş modeli oluşturmuştur. Daha fazla boyut parametresi içerdiği için bu modelin GÇT kullanılarak oluşturulan modellere kıyasla gerçeğe daha yakın olduğu saptanmıştır.

Aydoğdu (2009.b.) nano çubuklarda farklı sınır koşulları için boyuna titreşimde boyut etkisini incelemiştir. Aynı zamanda Aydoğdu (2009.a.) farklı kiriş teorileri için (Timoshenko, Euler-Bernoulli, Levinson, Reddy) yerel olmayan elastisite teorisini kullanarak nano kirişlerde eğilmeli burkulma ve titreşim problemlerini inceledi.

Wang DşDD teorisini Timoshenko kiriş modelinde kullanarak yeni bir model oluşturmuştur (2010). Burada izotropik mikro kirişlerin titreşim ve eğilme davranışlarını incelemiştir.

Zhao vd. (2012) DşDD teorisini kullanarak doğrusal olmayan eğilme davranışını, doğrusal olmayan burkulma sonrası durumu ve doğrusal olmayan serbest titreşimi araştırmışlardır.

Akgöz ve Civalek (2011.a, 2011.b, 2012, 2013.a) Kong'un 2009 yılında önerdiği modeli (Kong 2009) kullanarak basit mesnetli ve konsol mikro kirişlerin burkulmasını araştırmışlardır. Aynı zamanda bu modeli tek çeperli karbon nanotüplerin burkulmasında, eğilmesinde ve boyuna titreşiminde boyut etkisini araştırmada da kullanmışlardır.

Akgöz ve Civalek aksenal olarak fonksiyonel derecelendirilmiş, değişken boyutlu kirişlerde GT ve Euler-Bernoulli kiriş modelini kullanarak konsol kirişlerde serbest titreşim davranışını incelemişlerdir. Aynı zamanda G teorisini kullanarak ve bir sinüzoidal model oluşturarak basit mesnetli fonksiyonel derecelendirilmiş mikro kirişlerin termal ve mekanik eğilme karakteristik özelliklerini incelemişlerdir (2013.b). DG metoduna göre daha büyük çökmeler oluşturduğunu gözlemlemişlerdir.

Wang vd. (2014) Reddy kiriş teorisini ve DDşD teorisini kullanarak bir model geliştirdiler. Bu modelde boyut etkilerinin eğilme ve titreşimdeki etkisi incelenmiştir.

Ansari vd. (2016) fonksiyonel derecelendirilmiş mikro plaklarda DşDD teorisini kullanarak burkulma, serbest titreşim ve eğilme gibi problemlere çözüm türetmiştir. Bu çalışmasında uzunluk ve malzeme parametrelerine ek olarak DşDD teorilerinde kullanılan nc bir parametre olarak en/boy oranı parametresini kullanmışlardır.

Mikro-nano yapılardaki boyut etkisi, özellikle kiriş, plak ve kabuk modeller için incelenmiştir (Thai vd. 2017). Yapılan çalışmada boyut etkisi yerel olmayan teori, değiştirilmiş gerilme çifti teorisi ve değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi gibi yüksek mertebeden teoriler ile modellenerek araştırılmıştır. Çalışmada klasik teori ile bu teoriler

arasında kayma deformasyonu için karşılaştırma yapılmıştır. Aynı zamanda boyut etkisinin araştırılması için sonlu elemanlar yönteminin kiriş ve plaklardaki kullanımının da önemli olduğu gösterilmiştir.

Zhang ve Gao (2020) mikro kirişlerin mekanik özelliklerini incelemek için DŞDD teorisi üzerinde farklı bir boyut parametresi(ivme) ile çalışılarak yeni bir klasik olmayan Bernoulli-Euler kiriş modeli geliştirmişlerdir. Bu teoriye Yeniden Formüle Edilmiş Şekil Değiştirme Değişimi elastisite teorisi adı verilmiştir.

Yin vd. (2021) yaptıkları bir çalışmada YFEŞDD teorisini kullanarak mikro kirişler için izogeometrik analiz yapmışlardır. Bu çalışmada mikro kirişler için eğilme ve serbest titreşim gibi durumlar incelemişlerdir. Çalışmada basit mesnetli Euler-Bernoulli mikro kirişleri için Hamilton prensibi ile numerik yaklaşım yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarını karşılaştırmak için çalışma konsol kirişlere ve bir ucu sabit bir ucu hareketli mesnete uygulanmıştır. Ayrıca bu çalışma ile birlikte gerilme çifti tansörünün ve gerilme değişimi tansörünün klasik olmayan teorilerde hesaba katılması ile doğal frekansının arttığı, YFEŞDD teorisindeki hız değişimi(ivme) parametresinin hesaba katıldığı zaman ise doğal frekansın azaldığı tespit edilmiştir.

Zhang vd. (2021) yaptıkları çalışmada YFEŞDD teorisini kullanarak, mikro yapıya bağlı olarak klasik olmayan Kirchhoff plak modelini geliştirmişlerdir. Bu modelde çift gerilme tansöründe ve gerilme tansöründe ikisi için de birer tane olacak şekilde malzeme parametresi kullanmışlardır. Sınır koşulları ve hareket denklemleri oluşturulurken Hamilton prensibi kullanmışlardır. Yeni modelde basit mesnetli dikdörtgen bir plağın burkulması, statik eğilmesi ve serbest titreşim problemleri, elde edilen genel formüllerin doğrudan uygulanmasıyla analitik olarak çözülmüştür. Çalışmanın sonucunda, gerilme değişimi tansörünün ve gerilme çifti etkilerinin, plaka sapmalarının azalmasına, kritik burkulma yüklerinin artmasına ve doğal frekansların artmasına yol açtığını gözlemlenmiştir. Bu mikro yapı etkileri plaka çok ince olduğunda önemlidir, ancak plaka kalınlığı arttıkça bu etkiler azalmaktadır.

Alankar vd. (2022) ise yeniden formüle edilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorisi (YFEŞDD) ile, izogeometrik çözüm yöntemlerini kullanılarak basit mesnetli, konsol ve sabit-hareketli mesnetli fonksiyonel derecelendirilmiş Euler-Bernouilli mikro kirişlerinin farklı sınır koşulları için statik ve dinamik analizleri yapmıştır. Mevcut YFEŞDD teorisinin formülasyonuna ek olarak tarafsız eksenindeki geometrik merkezden kayma da dahil edilmiştir. Ayrıca parametrelerin doğal frekansa etkisi de incelenmiştir. Çalışma sonucunda FD YFEŞDD modelinin mikro kirişlerde FD DGÇ teorisine göre daha sert bir sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Akgöz ve Civalek (2022) yaptıkları çalışmada değişken kesitli ve fonksiyonel derecelendirilmiş Euler-Bernouilli mikro kirişinin burkulma davranışı incelenmiştir. İncelenen kolonda fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kullanılmıştır ve kolonun kesiti değişmektedir. Burkulma davranışındaki boyut etkileri dikkate alınırken DŞDD teorisi kullanılmıştır. Farklı sınır koşulları incelenirken Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılarak öz değer problemi çözülmüştür. Kesitteki ve Young modülündeki değişikliklerin, boyut bağımlılığının ve klasik olmayan sınır koşullarının etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Koniklik oranlarının artmasıyla boyut etkisinin daha küçük boyutlar için daha belirgin hale geldiği ve klasik ve klasik olmayan burkulma yükleri arasındaki farkların arttığı görülmüştür.

Bir çalışmada ise bazı polimer ve metal mikro kiriş ve plakların çökme davranışının mevcut değiştirilmiş gerilme çifti teorileriyle açıklaması yapılmıştır (Kong 2022). Çalışmada mikro kirişlerin ve plakların burkulma, eğilme, titreşim gibi mekanik davranışları için değiştirilmiş gerilme çifti teorisi kullanılmıştır. Analitik ve sayısal çözümlerle karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca mikro yapılar için boyut etkisi çalışmaları önerilmiştir.

Roudbari vd. (2022) yaptıkları bu çalışmada mikro-nano yapıların mekanik davranışlarını ve performanslarını değerlendirmek için üretilen yüksek mertebeden teorilerin tüp, kiriş, plak, çubuk, kabuk gibi modellemelerini ve bu teorilerin de bulunduğu genel bir literatür taraması çalışması yapmışlardır. Çalışmada eğilme, serbest titreşim ve burkulma gibi davranışlar incelenmiştir ve bu alanda neler yapılabileceği tartışılmıştır.

Yaylı vd. (2022) eksenel yük altındaki nano kirişlerin burkulma davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmada DŞDD teorisi kullanılmıştır ve farklı deforme olabilen sınır koşulları için Fourier açılımları ve Stokes dönüşümü kullanarak analitik çözüm sunulmuştur. Analitik çözümler elde edilmiştir ve araştırmacıların katı sınır koşulları için elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Burada çıkan sonuçların ise nano boyutlu kirişlerin optimizasyonu ve tasarımı için faydalı olabileceği ayrıca nano-mekanik analizler için yeni ölçütler sunulabileceğinden bahsedilmiştir.

Yin vd. (2022.a) tarafından yapılan çalışmada YFEŞDD modelini kullanarak Euler-Bernoulli mikro kirişinde ve Timoshenko mikro kirişinde izogeometrik yaklaşım metodunu kullanarak bu kirişlerin burkulma davranışlarını incelemişlerdir ve bu durum için analitik çözüm sunmuşlardır. Numerik çözümler ve izogeometrik çözümler çözümün doğruluğu için birbiri ile karşılaştırılmıştır. Uzunluk-boyut parametresinin, uzunluk-kalınlık oranının, kiriş kalınlığının ve sınır koşullarının etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda ise Euler-Bernoulli kiriş modelinin ince kirişler için daha uygun olduğu ortaya çıkmıştır.

Yin vd. (2022.b) yaptıkları bu çalışmada Timoshenko ve Euler-Bernoulli mikro kirişlerindeki boyut etkisini incelemişlerdir. Çalışmada YFEŞDD kullanılmıştır. Sınır koşulları ve hareket denklemleri ise Von Karman geometrik doğrusal olmayan teorisi ve minimum potansiyel enerji ilkesi ile ortaya çıkartılmıştır. Buradaki denklemlerde malzeme boyut parametresi 0 alındığında formülün GÇ teorisine indirgendiği görülmüştür. Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerinin kritik burkulma yükü çıkartılmıştır. Sonuçlarda malzeme uzunluk ölçeği parametresinin, uzunluk-kalınlık oranının ve kiriş kalınlığının farklı alınmasıyla değişim gösterilmiştir.

Yin vd. (2022.c) yaptıkları çalışmada klasik olmayan Timoshenko-Ehrenfest mikro kirişlerindeki eğilme ve serbest titreşim davranışını incelemişlerdir. Çalışmadaki klasik olmayan teori olarak YFŞEDD kullanılmıştır. Yönetici denklemler ve sınır koşulları oluşturulurken formülasyonda Hamilton prensibi ve varyasyonel yaklaşım kullanılmıştır. Eğilme ve serbest titreşim problemleri için analitik çözüm ve izogeometrik çözüm belirtilmiştir. Çalışmanın tutarlılığını test etmek için de farklı sınır koşulları ve farklı malzeme boyut paramtereleri, farklı kiriş kalınlıkları kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

Wang vd. (2023) fonksiyonel derecelendirilmiş ve eksenel yüklü mikro kirişlerde araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada YFEŞDD teorisi kullanılmış olup oluşturulan bu yeni modelde mikro yapıların statik ve titreşim gibi mekanik özelliklerinin geleneksel yöntemlere göre daha farklı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yeni modelin yalnızca mikro akustik dalga cihazlarının optimizasyonunda değil aynı zamanda FDEYK kullanılmış mikrosensörlerin ve mikroaktüatörlerin tasarımında da uygulanabildiğini keşfetmişlerdir.

Majeed vd. (2024) yaptıkları çalışmada iki boyutlu fonksiyonel derecelendirilmiş ve termal etkilere maruz bırakılmış fonksiyonel derecelendirilmiş Euler-Bernoulli mikro kirişinin titreşimini incelemişlerdir. Çalışmada YFEŞDDT kullanılmış olup hareket denklemleri oluşturulurken Hamilton'un prensibinden yararlanılmıştır. Galerkin yöntemi kullanılarak iki farklı sınır koşulu için çözüm yapılmıştır. Araştırma sonucunda normal frekansın kullanılan yeniden formüle edilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorisinde klasik teorilere göre elde edilen frekanstan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Değiştirilmiş Gerilme Çifti Teorisi (DGÇT)

Klasik gerilme çifti teorisinde iki Lamé sabitine ilave olarak yüksek dereceli iki malzeme uzunluk ölçeği parametresi önerilmiştir. Bu teorinin avantajlarından biri, mikro polar teoriye ilave dört parametrenin ve gerilme-şekil değiştirme teorisine ilave beş parametrenin iki parametreye indirilmiş olmasıdır. Bu, hesaplamalarda kolaylık sağlayabilir. Gerilme çifti teorisinin içeriğinde, şekil değiştirme enerjisinin yoğunluğu hem şekil değiştirmenin hem de eğriliğin bir fonksiyonu şeklindedir. Ω bölgesini tamamen kaplayan şekil değiştirmiş lineer elastik bir materyal için şekil değiştirme enerjisini tanımlayan U fonksiyonu şu şekildedir (Yang vd. 2002):

$$U = \frac{1}{2} \iint \int_{\Omega} (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + m_{ij} X_{ij}) dv \quad (3.1)$$

Bu formülasyonda gerilme tansörü σ_{ij} , şekil değiştirme tansörü ε_{ij} , simetrik gerilme değişimi çifti tansörü m_{ij} , X_{ij} ise eğrilik tansörünü temsil etmektedir.

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.3)$$

$$m_{ij} = 2l^2 G X_{ij} \quad (3.4)$$

$$X_{ij} = \frac{1}{2} (\theta_{ij} + \theta_{ji}) \quad (3.5)$$

Bu formülasyonlarda ise λ ve μ lame sabitleri, 1 boyut ölçek parametresini, u deplasman vektörünü ve θ dönme vektörünü tanımlamaktadır.

$$\theta_i = \frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} u_{kj} \quad (3.6)$$

3.2. Değiştirilmiş Şekil Değiştirme Değişimi Teorisi (DŞDDT)

Değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorisi ilk olarak Lam vd. (2003) tarafından sunulmuştur. Bu çalışma ile kuvvetlerin yüksek mertebeden gerilimleri ve gerilim çiftlerini de kullanan yeni bir denge denklemi türetilmiştir. Bu teorideki denklemler lineer elastik izotropik malzemeler için iki klasik malzeme parametrelerine ek olarak 3 bağımsız yüksek mertebeli malzeme boyut parametresi içerir. U doğrusal elastik bir malzeme için şekil değiştirme enerjisi aşağıdaki gibi sunulabilir;

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + p_i \gamma_i + \tau_{ijk}^{(1)} \eta_{ijk}^{(1)} + m_{ij}^s X_{ij}^s) dV \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_{mm} = \gamma_i \quad (3.9)$$

$$\eta_{ijk}^{(1)} = \frac{1}{3}(\varepsilon_{jk,i} + \varepsilon_{ki,j} + \varepsilon_{ij,k}) - \frac{1}{15}[\delta_{ij}(\varepsilon_{mm,k} + 2\varepsilon_{mk,m}) + \frac{1}{15}[\delta_{ij}(\varepsilon_{mm,i} + 2\varepsilon_{mi,m})] \quad (3.10)$$

$$\chi_{ij}^s = \frac{1}{2}(\varepsilon_{ipq}\varepsilon_{qj,p} + \varepsilon_{jqp}\varepsilon_{qi,p}) \quad (3.11)$$

χ_{ij}^s Simetrik dönme değişimi tansörü, δ_{ij} Kronecker delta, ε_{ij} şekil değiştirme tansörü, $u_{i,j}$ deplasman vektörü, $\varepsilon_{mm,i}$ dilatasyon (genleşme) değişimi vektörü, $\eta_{ijk}^{(1)}$ deviatorik uzama değişimi tansörü ve e_{ijk} permütasyon sembolüdür.

Ayrıca DŞDD kullanılarak üretilmiş doğrusal izotropik elastik modellerin gerilmeyle ve kinematik parametrelerle alakalı yönetici denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sigma_{ij} = \lambda tr(\varepsilon')\delta_{ij} + 2G\varepsilon_{ij} \quad (3.12)$$

$$p_i = 2Gl_0^2\gamma_i \quad (3.13)$$

$$\tau_{ijk}^{(1)} = 2Gl_1^2\eta_{ijk}^{(1)} \quad (3.14)$$

$$m_{ij}^s = 2Gl_2^2\chi_{ij}^s \quad (3.15)$$

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)}, G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.16)$$

Burada Cauchy gerilme tansörü σ_{ij} , çift gerilme tansörü $\tau_{ijk}^{(1)}$, gerilme çifti tansörü m_{ij}^s , p_i gerilme tansörü, λ ve G Lamé sabitlerini temsil etmektedir.

3.3. Yeniden Formüle Edilmiş Şekil Değiştirme Değişimi Teorisi (YFESDDT)

Geleneksel yöntemlerin mekanik özelliklerini ve problemlerini çözmede çoğu zaman zayıf kaldığı için mikro-nano kirışlerin mekanik davranışlarını incelemek için boyut etkilerinin de göze alındığı yüksek mertebeden ortam teorileri türetilmiştir. Bu önerilen teorilerden biri olan DŞDD teorisinde ise DGÇ teorisinden farklı olarak iki klasik malzeme parametresine ek olarak bir tane daha katsayı önerilir. ŞDD teorisinin yeniden formüle edilmesiyle bulunan bu Zhang ve Gao(2020) kullanılacak olan katsayı için hız değişimi(ivme) boyut parametresini kullanmıştır. Teorideki formülasyonları basitleştirilmiş şekilde yazacak olursak şekil değiştirme enerjisi U aşağıdaki gibi belirtilebilir:

$$U = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + \tau_{ijk}^S \eta_{ijk}^S + m_{ij} \chi_{ij}) dV \quad (3.17)$$

Bu formülasyonda Cauchy gerilme tansörü σ_{ij} , simetrik olarak alınmış çift gerilme tansörü τ_{ijk}^S ve gerilme çifti tansörü m_{ij} olacak şekilde yazılırsa formülasyonları;

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (3.18)$$

$$\tau_{ijk}^S = 2G l_s^2 \eta_{ijk}^S \quad (3.19)$$

$$m_{ij} = 2l_m^2 G \chi_{ij} \quad (3.20)$$

Denklemlerdeki G (kayma modülü) ve λ Lamé sabitleri olacak şekilde yazılırsa;

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)}, \quad G = \frac{E}{2(1+v)} \quad (3.21)$$

δ_{ij} Kronecker delta, l_s ve l_m gerilme gradyanı etkisi ve gerilme çifti etkileri için malzeme uzunluk parametreleridir. E Young Modülü ve ν Poisson oranıdır. Şekil değiştirme tansörü ε_{ij} , η_{ijk}^S deviatorik uzama değişimi tansörü ve χ_{ij} simetrik dönme değişimi tansörü yazılacak olunursa;

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.22)$$

$$\eta_{ijk}^S = \frac{1}{3} (u_{i,jk} + u_{j,ki} + u_{k,ji}) \quad (3.23)$$

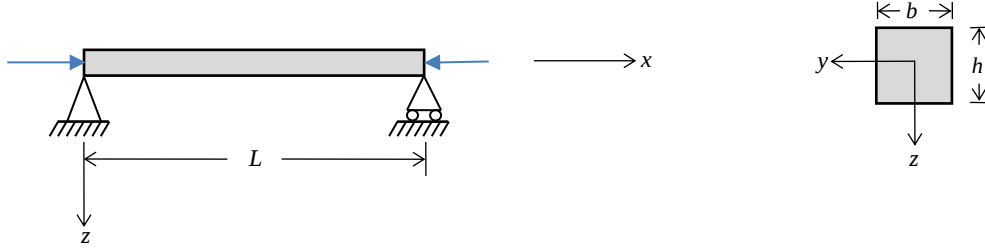
$$\chi_{ij} = \frac{1}{2} (\theta_{i,j} + \theta_{j,i}) \quad (3.24)$$

$$\theta_i = \frac{1}{2} e_{ijk} u_{k,j} \quad (3.25)$$

Burada u_i deformasyon ve e_{ijk} permütasyon sembolüdür. θ_i ise dönme vektörüdür.

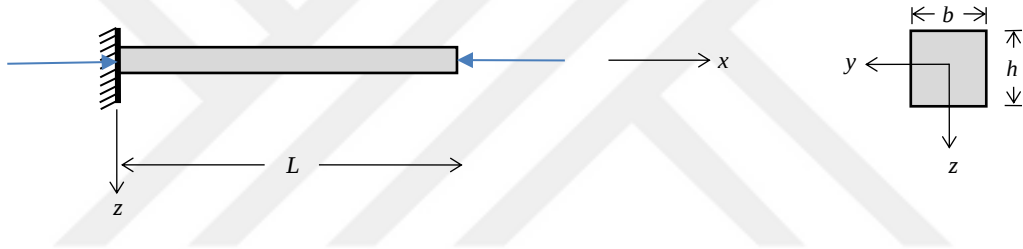
Basit mesnetli mikro kiriş için ve konsol bir mikro kiriş için geometrik koşullar aşağıdaki gibi belirlenmiştir. İki durum için de b genişlik, h yükseklik ve L uzunluk olarak belirlenmiştir.

a)



Şekil 3.1.a. Bir ucu sabit bir ucu hareketli mesnetli kiriş

b)



Şekil 3.1.b. Bir ucu ankastre mesnetli diğer ucu serbest kiriş

Timoshenko kirişinin kesitindeki herhangi bir noktanın yer değiştirme alanı şu şekilde gösterilebilir:

$$u_1 = -z\varphi(x), u_2 = 0, u_3 = w(x) \quad (3.26)$$

Burada $u_i (i=1,2,3)$ kirişin herhangi bir noktadaki deplasman vektörlerini, φ y eksenindeki dönme açısını, w ise w , x eksenindeki z yönündeki yer değiştirmedir. $\varphi(x) = dw(x)/dx$ olarak yazılırsa Euler-Bernoulli kiriş modelinin deplasman denklemi çıkartılabilir.

3.3.1.Klasik olmayan teoriye göre Burkulma analizi

Denklem (3.26) 'da $\varphi(x, t) = dw(x, t)/dx$ yazılırsa Euler Bernoulli kirişleri için deplasman bulunabilir. Denklem (3.26)'daki deplasman formülünü Denklem (3.22-3.25)'te yerine yazacak olursak ikinci dereceden yer değiştirme gradyanı tensörünün simetrik kısmı, eğrilik ve dönme vektörü şu şekildedir;

$$\varepsilon_{xx} = -z \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.27)$$

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0 \quad (3.28)$$

$$\eta_{xxx}^S = -Z \frac{d^3 w}{dx^3}, \quad \eta_{xxz}^S = -\frac{1}{3} \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.29)$$

$$\eta_{yyy}^S = \eta_{zzz}^S = \eta_{xxy}^S = \eta_{xyy}^S = \eta_{xzz}^S = \eta_{yyz}^S = \eta_{yzz}^S = \eta_{xyz}^S = 0 \quad (3.30)$$

$$\chi_{xy} = -\frac{1}{2} \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.31)$$

$$\chi_{xx} = \chi_{yy} = \chi_{zz} = \chi_{xz} = \chi_{yz} = 0 \quad (3.32)$$

$$\theta_y = -\frac{dw}{dx} \quad (3.33)$$

Büyük boyut oranları için ince kiriş varsayımları yapılmıştır ve Lamé sabitleri $(\lambda + 2G)$ Young'un modülü E olarak kabul edilmiştir. Ayrıca b/h oranı yüksek olan ince kirişlerde Poisson etkisi ikincil planda kalmaktadır. Denklem (3.27-3.33) ve (3.18-3.20) kullanılırsa, Cauchy gerilme tansörü, çift gerilme tansörü ve gerilme çifti tansörü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma_{xx} = -Ez \frac{d^2 w}{dx^2}, \quad \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -Ez \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.34)$$

$$\tau_{xxz}^S = -\frac{2}{3} G l_s^2 \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.35)$$

$$m_{xy} = -l_m^2 G \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.36)$$

$$\tau_{xxx}^S = 2G l_s^2 \left(-Z \frac{d^3 w}{dx^3} \right) \quad (3.37)$$

Yukarıdaki denklemler Denklem (3.17)'de yerine yazılırsa şekil değiştirme enerjisi (U) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\left(EI + \frac{2}{3} G A l_s^2 + G A l_m^2 \right) \left(\frac{d^2 w(x)}{dx^2} \right)^2 + (2G l_s^2) \left(\frac{d^3 w(x)}{dx^3} \right)^2 \right) dx \quad (3.38)$$

Buradaki denklemde A alan ve I atalet momenti olacak şekilde aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$A = b x h, \quad I = \int_A z^2 dA = \frac{1}{12} b h^3 \quad (3.39)$$

3.3.2. Rayleigh-Ritz Metodunun uygulanması

Rayleigh-Ritz yöntemine göre toplam potansiyel enerji, şekil değiştirme enerjisinden eksenel basınç kuvvetlerinin yaptığı işin çıkarılması ile bulunabilir:

$$\Pi = U - W_{Dış} \quad (3.40)$$

Bu denklemde U Denklem (3.38)' de belirtilen şekil değiştirme enerjisi ve $W_{Dış}$ dış kuvvetlerinin yaptığı iş olup Euler-Bernoulli mikro kirişleri için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$W_{Dış} = \frac{1}{2} \int_0^L P \left(\frac{dw(x)}{dx} \right)^2 dx \quad (3.41)$$

Bu denklemde P eksenel basınç kuvvetidir. Denklem (3.38) ve Denklem (3.41) Denklem (3.40)'da yerine yazılacak olursa Euler-Bernoulli mikro kirişleri için toplam potansiyel enerji aşağıdaki gibi belirtilebilir:

$$\Pi = \frac{1}{2} \left(\left(EI + \frac{2}{3} GAl_s^2 + GAl_m^2 \right) \left(\frac{d^2 w(x)}{dx^2} \right)^2 + (2GIl_s^2) \left(\frac{d^3 w(x)}{dx^3} \right)^2 - P \left(\frac{dw(x)}{dx} \right)^2 \right) dx \quad (3.42)$$

Rayleigh-Ritz çözüm yönteminde deneme fonksiyonu $W(x)$ kullanılacaktır. Bu fonksiyon aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$W(x) = \sum_{i=1}^N c_i \phi_i(x) \quad (3.43)$$

Buradaki c_i keyfi katsayılar olup $\phi_i(x)$ ise sadece geometrik sınır koşullarını (çökme ve dönme) sağlaması yeterli olan kabul edilebilir bir fonksiyon ve N bu fonksiyonda bulunan polinom sayısıdır. Ayrıca buradaki seçilen $W(x)$ ve Denklem (3.42)'deki $w(x)$ ile aynıdır.

Rayleigh-Ritz metodunu kullanarak deneme fonksiyonu olan Denklem (3.43)'ü yazabilmek için bir ucu ankastre diğer ucu serbest kiriş için ve basit mesnetli kiriş için geometrik sınır koşullarını yazacak olursak;

$$\text{Ankastre uç için : } W = 0, \frac{dW}{dx} = 0 \quad (3.44)$$

$$\text{Basit mesnetli uçlar için: } W = 0 \quad (3.45)$$

Bu çalışmada bir ucu ankastre diğer ucu serbest olan ve bir ucu hareketli diğer ucu sabit mesnetli olan basit mesnetli kiriş için sınır koşullarını sağlayan iki farklı fonksiyon aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$\text{Bir ucu ankastre diğer ucu serbest için } \phi_i(x) = (x)^{i+1}, i = 1, 2, 3, 4, \dots, 10 \quad (3.46)$$

$$\text{Basit mesnetli kiriş için } \phi_i(x) = (x)^i (L - x), i = 1, 2, 3, 4, \dots, 10 \quad (3.47)$$

Denklem (3.47)'de şekil (3.1.b)'de $x = 0$ ve $x = L$ için W değeri 0 olur. Denklem (3.44)'te de görülebildiği gibi dönme değeri olan $\frac{dW}{dx}$ de 0 olur. Denklem (3.47)'de şekil (3.1.a) için $x = 0$ ve $x = L$ değerlerinde de çökme 0'dır. Toplam potansiyel enerji, aşağıdaki denklemin sağlanması ile birlikte çözülebilir.

$$\frac{d\Pi}{dc_i} = 0, i = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, 10 \quad (3.48)$$

Örnek olarak gösterme amacı ile $i = 4$, alınarak Denklem (3.46) ve (3.47), Denklem (3.43)'te yerine yazılırsa;

$$W(x) = c_1x^2 + c_2x^3 + c_3x^4 + c_4x^5 \quad (3.49)$$

$$W(x) = c_1x(L-x) + c_2x^2(L-x) + c_3x^3(L-x) + c_4x^4(L-x) \quad (3.50)$$

Burada Denklem (3.49) bir ucu ankastre diğer ucu serbest olan kiriş için deneme fonksiyonu olup Denklem (3.40) ise bir ucu hareketli diğer ucu sabit mesnetli basit mesnetli kiriş için deneme fonksiyonudur. Homojen bir kiriş için potansiyel enerji denklemini aşağıdaki gibi belirtilebilir:

$$\Pi = \frac{1}{2} [EI \left(\frac{d^2W}{dx^2} \right)^2 - P \left(\frac{dW}{dx} \right)^2] dx \quad (3.51)$$

Denklem (3.51)'de Denklem (3.50) ve Denklem (3.49) ikinci ve birinci türevleri cinsinden yerlerine yazılırsa ve daha sonra oluşan sonuç Denklem (3.48)'e yazılırsa oluşacak olan sonuçlarla aşağıdaki gibi 4x4 boyutlu bir matris oluşturulabilir.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & K_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{41} & \cdots & K_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Burada bir öz değer problemi oluşmuştur. Denklem (3.52)'de oluşturulan matrisin determinantı alınıp 0'a eşitlenerek kökler bulunabilir. Bulunan bu kökler arasından en küçük değer alınarak kritik burkulma yükü belirlenebilir. Aynı şekilde $i=10$ alınarak da 10x10 boyutlu bir matris oluşturularak çözüm elde edilebilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu kısmında, elde edilen sonuçlar mevcut çalışmalarla karşılaştırılıp incelenecektir. Sonuçlar farklı malzeme boyut parametreleri, farklı klasik olmayan teoriler ve farklı boyut parametreleri için incelenecek, sonuçlar grafik ve tablolar halinde gösterilecektir.

Öncelikle kullanılan yöntemin tutarlılığını gösterebilmek için çözülmesi ile birlikte boyutsuz kritik burkulma yükünü (PL^2/EI) veren Denklem (3.42), Rayleigh-Ritz yöntemi ile analiz edilmiştir. Bu çözüm oluşturulurken matrislerin determinantları alınır ve determinantlar sıfıra eşitlenir. Bu işlemden sonra oluşan denklemlerin kökleri incelenir. Bu kökler kritik burkulma yükleri oldukları için köklerin içerisinde minimum olanın seçilmesi gerekmektedir. Matrislerin çözümleri için MATLAB programı kullanılmış olup buradaki kodlar ile çözümleme yapılmıştır. Sonucun doğruluğunu arttırabilmek için ise oluşturulacak olan matrislerin elemanları arttırılarak yakınsama gösterilmiştir. Bulunan sonuçlar kesin sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1. Farklı koşullar için terim sayısına göre boyutsuz kritik burkulma yükü

YAKINSAMA	Boyutsuz kritik burkulma yükü	
Terim sayısı	KONSOL KİRİŞ	Basit mesnetli
2	2.4859616	12
3	2.4677381	9.8750975
4	2.4674044	9.8750975
5	2.4674011	9.8696070
6	2.4674011	9.8696070
7	2.4674011	9.8696044
8	2.4674011	9.8696044
9	2.4674011	9.8696044
10	2.4674011	9.8696044
Kesin (Wang 2005)	2.467	9.8696044

Çizelge 4.1’ de görüldüğü gibi bir ucu hareketli diğer ucu sabit mesnetli kirişin ve bir ucu ankastre diğer ucu serbest kiriş için kritik burkulma değerleri elde edilmiştir. Çalışmanın doğruluğunu gösterebilmek için farklı terim sayısındaki matrislerin karşılaştırılması yapılmıştır. Terim sayısının artması ile birlikte kritik burkulma yükü azalmıştır ve sonuçların kesin sonuç ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.1’de de görüldüğü gibi terim sayısı 8, 9 ve 10 olduğunda kritik burkulma yükü değeri sabitlenmiştir. Bu yüzden yapılan bu çalışmada 10 terimli çözümün kullanılması uygun görülmüştür.

Çizelge 4.2. Farklı yükseklik değerleri için boyutsuz kritik burkulma değerleri

Çalışmalar	h (μm)		
	17.6	52.8	158.4
Akgöz ve Civalek (2011)	52.7809	14.6375	10.3994
Mohammad vd (2014)	52.7809	14.6375	10.3994
Bu çalışma	52.7809	14.6375	10.39937

Çizelge 4.2.’de çalışmanın tutarlılığını gösterebilmek için basit mesnetli Euler-Bernoulli mikro kirişinde yapılan diğer çalışmalardaki büyüklükler kullanılarak bu farklı yükseklik değerleri için boyutsuz kritik burkulma yükleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Akgöz ve Civalek (2011.a.)’in yaptığı bu çalışmada kritik burkulma yükü DGÇ teorisine göre incelenmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan YFEDŞDD teorisinde $l_s=0$, alınarak DGÇ teorisi elde edilebilir. Karşılaştırmanın yapılabilmesi için epoksi malzemenin özellikleri kullanılmıştır. Geometrik büyüklükler için $L = 20h$, $b = 2h$ ve $l_m=17.6 \mu m$ değerleri kullanılmıştır. Elastisite modülü $E = 1.44 GPa$ ve poisson $\nu = 0.38$ olarak kabul edilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi yapılan çalışma önceki yapılmış olan çalışmalarla birebir uyum içerisinde.

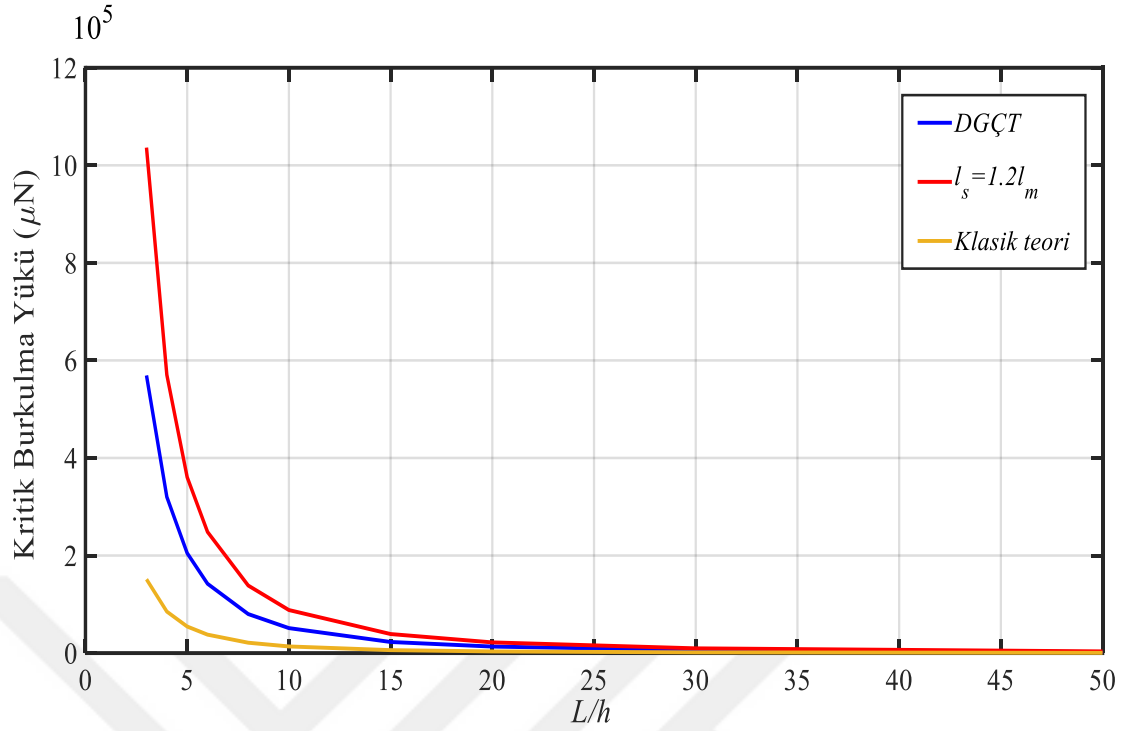
Çizelge 4.3. Farklı L/h oranları ve farklı malzeme boyut parametreleri (l_s) için kritik burkulma yükleri değerleri ($\mu N \times 10^5$)

L/h	$l_s=0.6l_m$ (Yin vd. 2022)	$l_s=0.6l_m$ (Bu çalışma)	$l_s=1.2l_m$ (Yin vd. 2022)	$l_s=1.2l_m$ (Bu çalışma)
3	6.695619437	6.899546886	9.7046853	10.36312535
4	3.766285934	3.836406413	5.458885481	5.705758357

Çizelge 4.3. Devamı

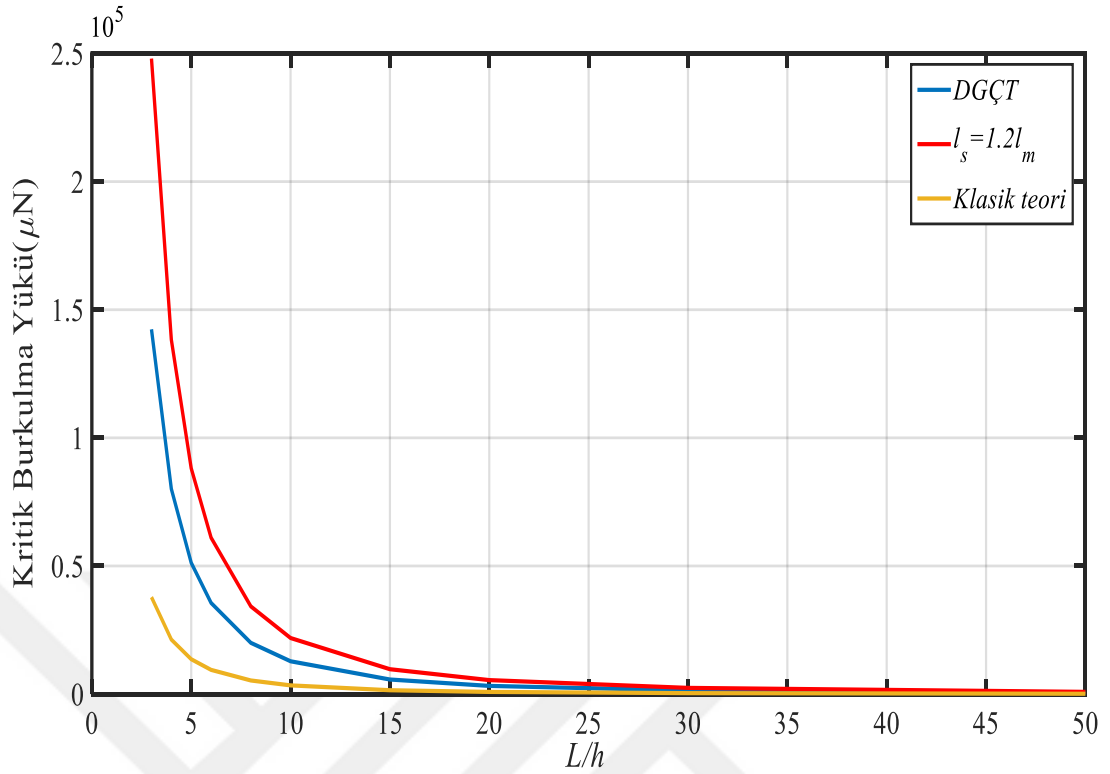
5	2.410422997	2.440539455	3.493686708	3.605942213
6	1.673904859	1.688883673	2.426171325	2.48453092
8	0.941571483	0.946496504	1.36472137	1.385396923
10	0.602605749	0.604671068	0.873421677	0.882726661
15	0.267824777	0.26824611	0.388187412	0.390478054
20	0.150651437	0.150786866	0.218355419	0.219258885

Çizelge 4.3'te basit mesnetli bir Euler-Bernoulli mikro kirişinin burkulma hesabını YFEŞDDET kullanılarak izogeometrik ve analitik çözüm yöntemi kullanarak hesaplayan bir çalışma (Yin vd. 2022.a) ile yapılan çalışmanın karşılaştırılması görülmektedir. Hesaplar yapılırken geometrik özellikler olarak $h=2\mu m$, $b=2h$, $A=bh$ kullanılmıştır. Malzeme boyut parametrelerinden biri olan l_m nikel için $1.553 \mu m$ alınmıştır. Diğer bir boyut parametresi olan l_s ise $l_s=0.6l_m$ ve $l_s=1.2l_m$ alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Çizelge 4.3'te de görüldüğü gibi bu çalışma ile daha önce yapılmış olan çalışmada kritik burkulma yükü değerleri farklıdır. Bunun sebebi daha önce yapılmış olan çalışmada (Yin vd. 2022.a) Denklem (3.37)'nin hesaba dahil edilmemesidir. Bunun hesaba dahil edilmemesi ile denklemlere üçüncü dereceden diferansiyel terimler dahil edilmemiş olur. Bu yüzden bu çalışmadaki Denklem (3.38)'in Rayleigh-Ritz yöntemi ile çözülmesiyle elde edilen kritik burkulma yükü ve daha önceki çalışmada elde edilen kritik burkulma yükü (Yin vd. 2022.a, Denklem (34)) farklıdır. İki çalışma arasındaki kritik burkulma yükleri arasındaki fark özellikle düşük L/h oranları için daha belirgindir. Aynı zamanda ilave malzeme boyut parametresi l_s değeri arttıkça, özellikle düşük L/h oranları için iki çalışma arasındaki fark daha belirgin hale gelmektedir. Bu yüzden burkulma hesabı yapılırken Denklem (3.37)'nin da hesaba dahil edilmesi daha doğrudur.



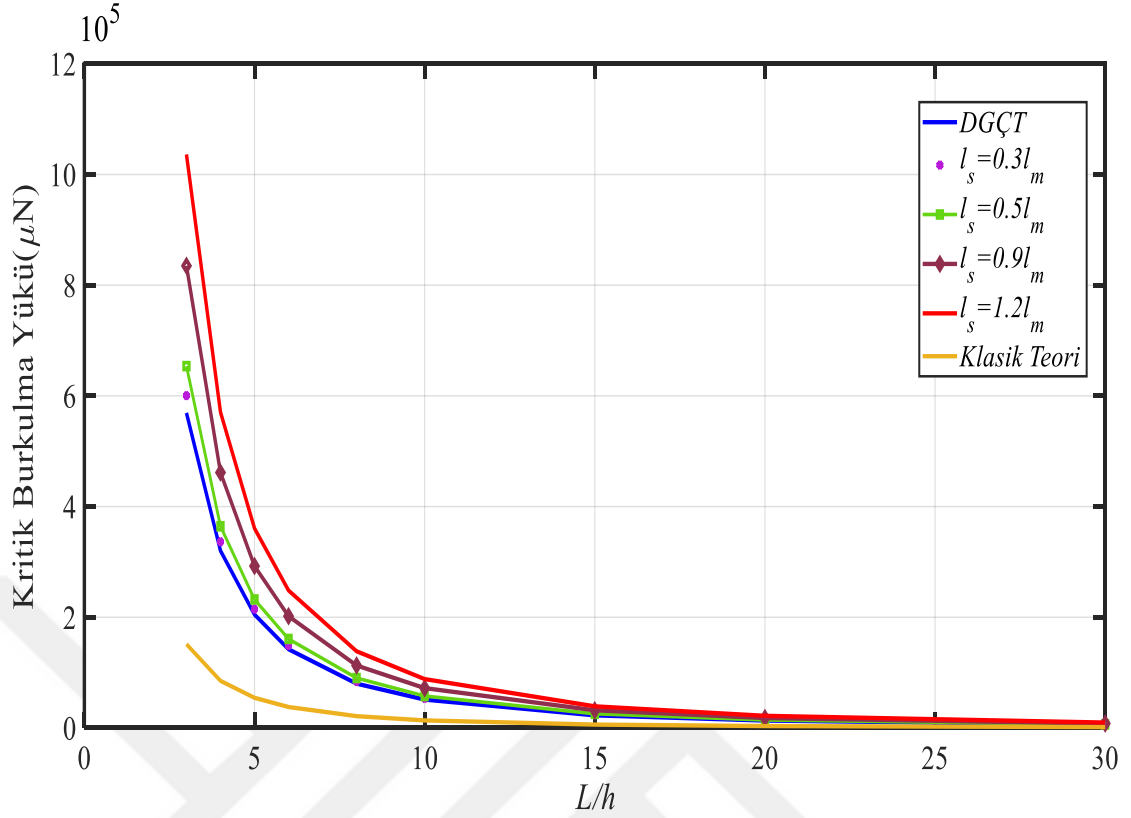
Şekil 4.1. Bir ucu sabit diğer ucu hareketli mesnetli mikro kirişin farklı L/h oranlarında farklı teoriler için kritik burkulma yükü değerleri

Şekil 4.1’de basit mesnetli Euler-Bernoulli mikro kirişi için farklı L/h oranlarına göre kritik burkulma yüklerinin karşılaştırması görülmektedir. Şekil oluşturulurken nikel malzeme özellikleri kullanılmış olup $E = 207$ GPa, poisson oranı ν ise 0.31 olarak kullanılmıştır. Geometrik koşullar için ise Şekil 3.1.a’daki kesitler kullanılarak kesit alanı $A = bh$, kiriş genişliği $b = 2h$, yükseklik ise $h = 2\mu m$ alınmıştır. Malzeme boyut parametrelerinden l_m nikel için $1.553 \mu m$ kabul edilmiştir ve YFEŞDD teorisinde malzeme boyut parametresi $l_s = 1.2 l_m$ olarak kullanılmıştır. YFEŞDD teorisinde malzeme boyut parametresi $l_s = 0$, olarak kullanıldığında DGÇT elde edilebilir. $l_s = 0$, $l_m = 0$, kullanıldığında ise da klasik teori elde edilebilir. Şekilde de görüldüğü gibi YFEŞDD teorisi ile genellikle düşük L/h oranlarında, özellikle $L/h < 10$ iken yüksek kritik burkulma yükü değerleri elde edilmektedir. L/h oranı arttıkça teoriler arasındaki kritik burkulma yükü farkı azalmaktadır. Örneğin L/h oranı 5’e eşit olduğunda YFEŞDD teorisinin kritik burkulma yükü $3.605 \times 10^5 \mu m$ iken DGÇ teorisinde bu değer $2.049 \times 10^5 \mu m$ olduğu görülmektedir. Buradan da görülebildiği gibi YFEŞDD teorisi ile DGÇ teorisine oranla 1.71 kat daha fazla kritik burkulma değeri elde edilmiştir.



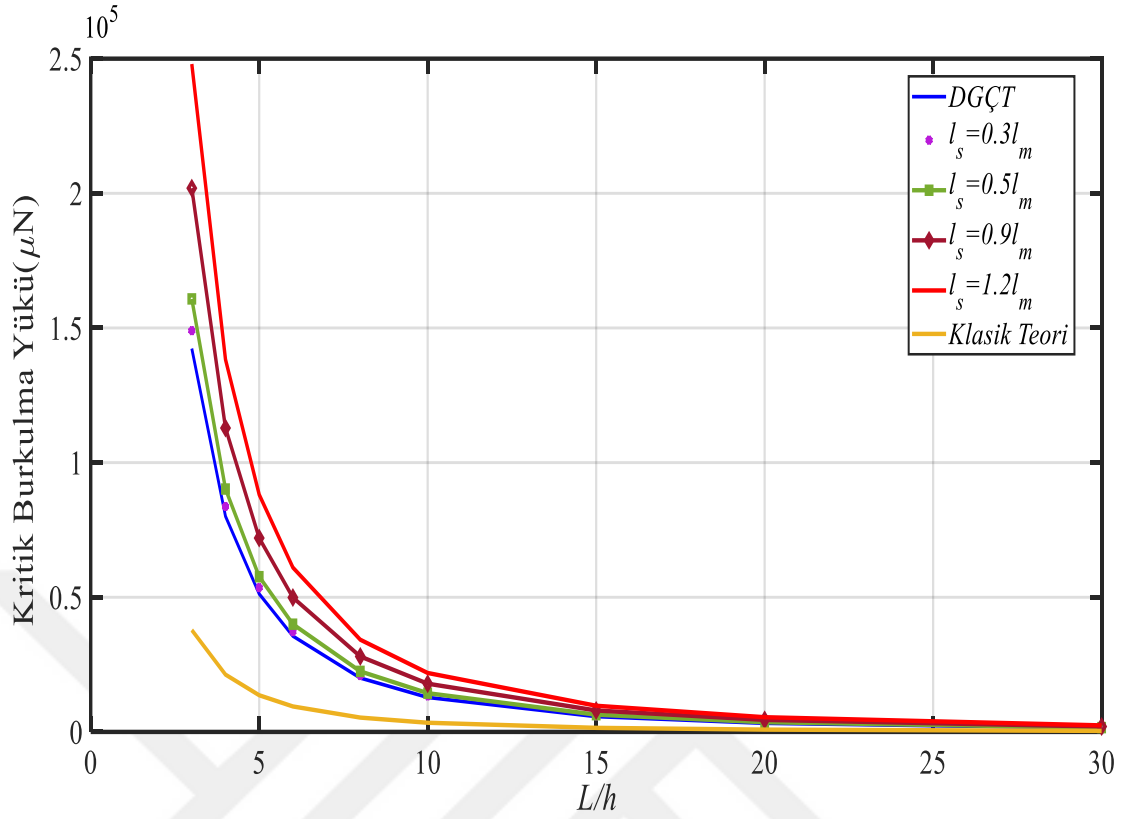
Şekil 4.2. Bir ucu ankastre diğer ucu serbest konsol kirişin farklı L/h oranlarında farklı teoriler ile kritik burkulma yükü değerleri

Şekil 4.2’de de konsol kiriş için klasik teori, DGÇT ve YFEŞDD teorileri ile L/h oranının artırılmasıyla elde edilen kritik burkulma yükleri gösterilmiştir. Malzeme nikel olup elastisite modülü $E = 207$ GPa, poisson oranı ν ise 0.31 olarak alınmıştır. Geometrik koşullar için Şekil 3.1.b kullanılarak $A = bh, b = 2h$, yükseklik h ise $2\mu m$ kabul edilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi L/h oranları arttıkça Euler-Bernoulli kirişinde kritik burkulma yükü azalmaktadır. Teoriler arasındaki fark ise özellikle $L/h < 10$ iken daha belirgin hale gelmektedir. Görüldüğü gibi YFEŞDD teorisi ile konsol kiriş için de DGÇT teorisine göre daha fazla kritik burkulma yükü elde edilmiştir. Malzeme boyut parametreleri l_s ve l_m , etkilerinin özellikle $L/h < 10$ durumu için daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Kritik burkulma yükünün, uzunluğun artmasıyla birlikte azalması ise uzunluğun arttıkça kirişin sertliğinin azalmasından dolayı olduğu düşünülebilir.



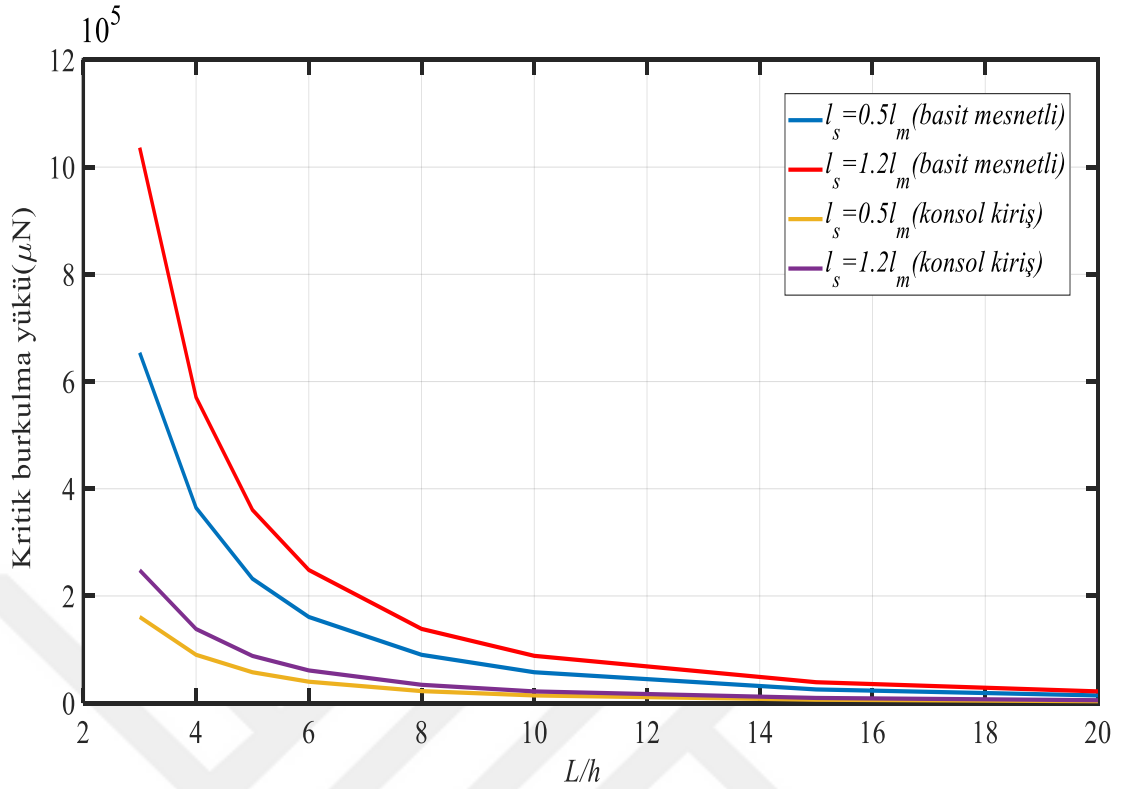
Şekil 4.3. Basit mesnetli kiriş için farklı teoriler ve boyut parametreleri için kritik burkulma yükünün L/h oranına bağlı değişimi

Bir ucu sabit diğer ucu hareketli bir Euler- Bernoulli mikro kirişi için DGÇ teorisi, klasik teori ve farklı boyut parametreleri ile YFEŞDD teorisine göre kritik burkulma yükü Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Boyut parametreleri diğer şekillerdeki gibi aynı olup, $A = bh$, $b = 2h$, $h = 2\mu m$ alınmıştır. Malzeme parametreleri için $E = 207$ GPa, ν ise 0.31 alınmıştır. DGÇT için $l_m = 1.553 \mu m$ kabul edilmiş olup YFEŞDD teorisinde farklı l_s büyüklükleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi tüm teorilerde L/h oranı arttıkça kritik burkulma yükü azalmaktadır. Özellikle YFEŞDD ve DGÇT arasındaki fark ise L/h oranının küçük olduğu değerlerde daha belirgin hale gelmektedir. Ayrıca L/h oranı arttıkça tüm teorilerin klasik teoriye yaklaştığı da görülmektedir. Bunun nedeninin kiriş boyu arttıkça boyut etkisinin azalması ve kiriş rijitliğinin azalması olduğu düşünülebilir. YFEŞDD teorisinde farklı l_s büyüklükleri için kritik burkulma yükünün değiştiği gözlemlenmiştir. $l_s=1.2$ olduğunda kritik burkulma yükünün en fazla olduğu gözlemlenirken $l_s=0.3l_m$ olduğunda kritik burkulma yükü diğerlerine göre daha azdır. Görüldüğü gibi l_s sıfıra yaklaştıkça değerler DGÇT değerine yaklaşmaktadır.



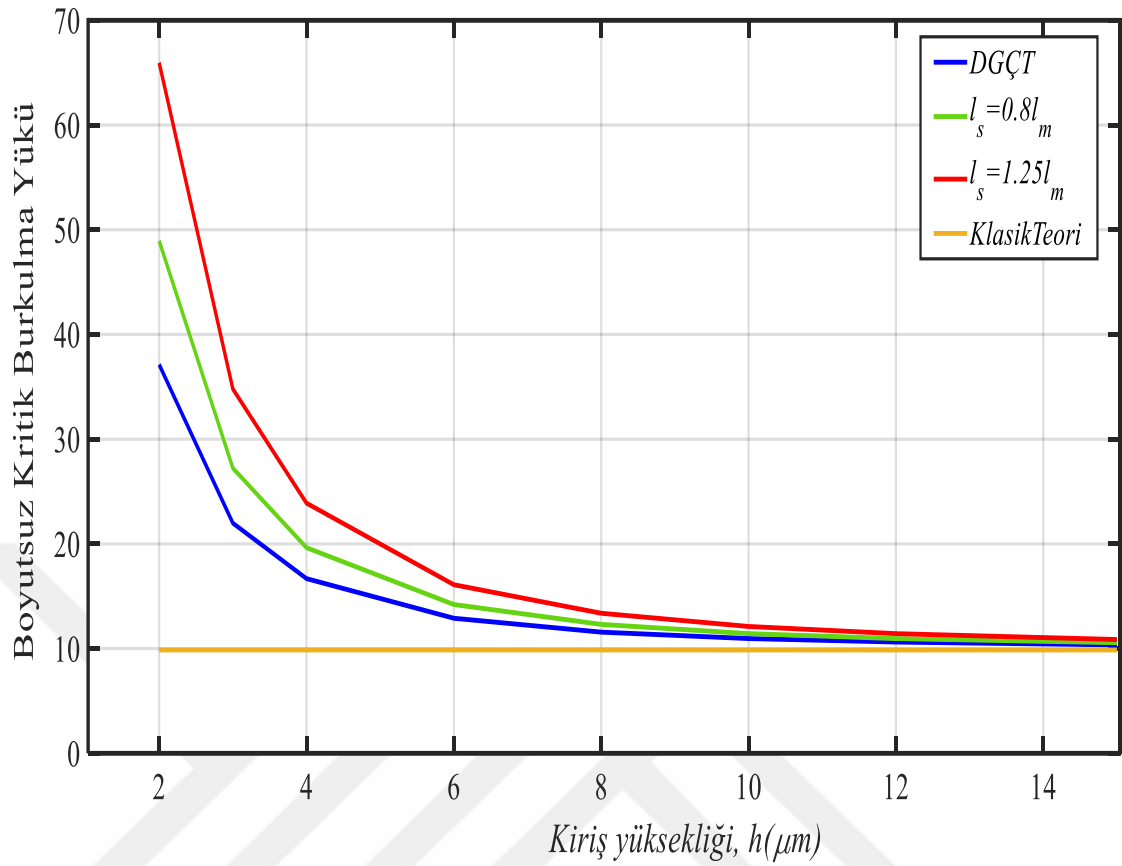
Şekil 4.4 Konsol mikro kirişin farklı teoriler ve boyut parametreleri için kritik burkulma yükünün L/h oranına bağlı değişimi

Bir ucu ankastre diğer ucu serbest olan bir konsol kirişin farklı teorilere ve farklı malzeme boyut parametrelerine göre karşılaştırılması Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Bu şekil için geometrik koşullar ve malzeme parametreleri diğerleri ile aynı alınmıştır. Burada da gözlemlendiği gibi L/h oranı arttıkça kritik burkulma yükü tüm teorilerde azalmaktadır ve aslında diğer teoriler klasik teoriye yaklaşmaktadır. Şekilde de görülebildiği gibi L/h oranının küçük olduğu değerlerde teoriler arasındaki kritik burkulma yükü farkı açıkça görülebilmektedir. Malzeme boyut parametreleri l_s ve l_m 'nin etkileri özellikle L/h oranının küçük olduğu değerlerde belirgindir.



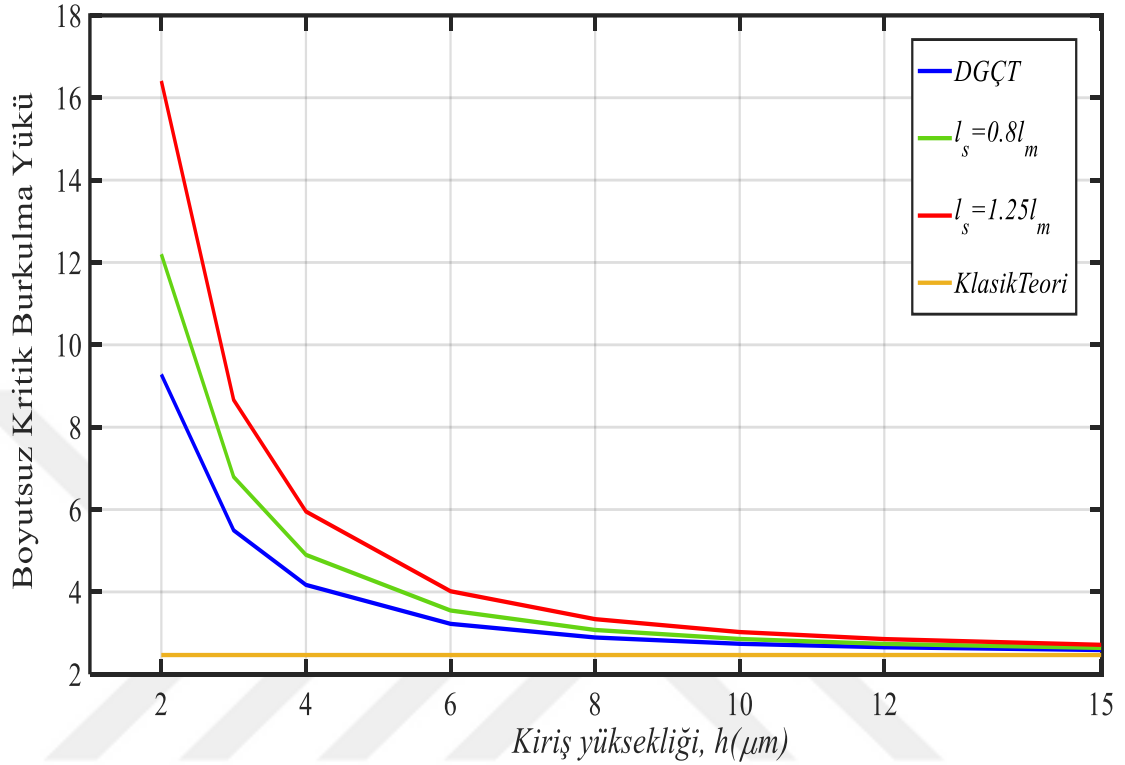
Şekil 4.5. Konsol kiriş ve basit mesnetli kirişin kritik burkulma yükünün L/h oranına bağlı değişimi

Şekil 4.5'te bir ucu ankastre diğer ucu serbest bir Euler-Bernoulli mikro kiriş ile bir ucu sabit diğer ucu hareketli mesnetli olan bir mikro kirişin karşılaştırması gösterilmiştir. Malzeme boyut parametresi $l_m = 1.553 \mu m$ ve YFEŞDD teorisi için ise l_s oranları $l_s = 1.2l_m$ ve $l_s = 0.5l_m$ olarak kullanılmıştır. Malzeme parametreleri yukarıdakilerle aynı olup geometrik koşullar da Şekil 3.1.b'de gösterildiği gibidir. Şekilde görüldüğü gibi boyut etkileri L/h oranı küçüldüğünde daha belirgin hale gelmektedir ve kritik burkulma yükü bu yüzden L/h oranı azken daha fazladır. İki l_s durumunda da konsol kirişin kritik burkulma yükünün daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin ise sınır koşullarının değişmesiyle birlikte rijitliğin de değişmesi olduğu söylenebilir.



Şekil 4.6. Basit mesnetli mikro kirişin farklı teoriler ile boyutsuz kritik burkulma yükünün kiriş yüksekliğine bağlı değişimi

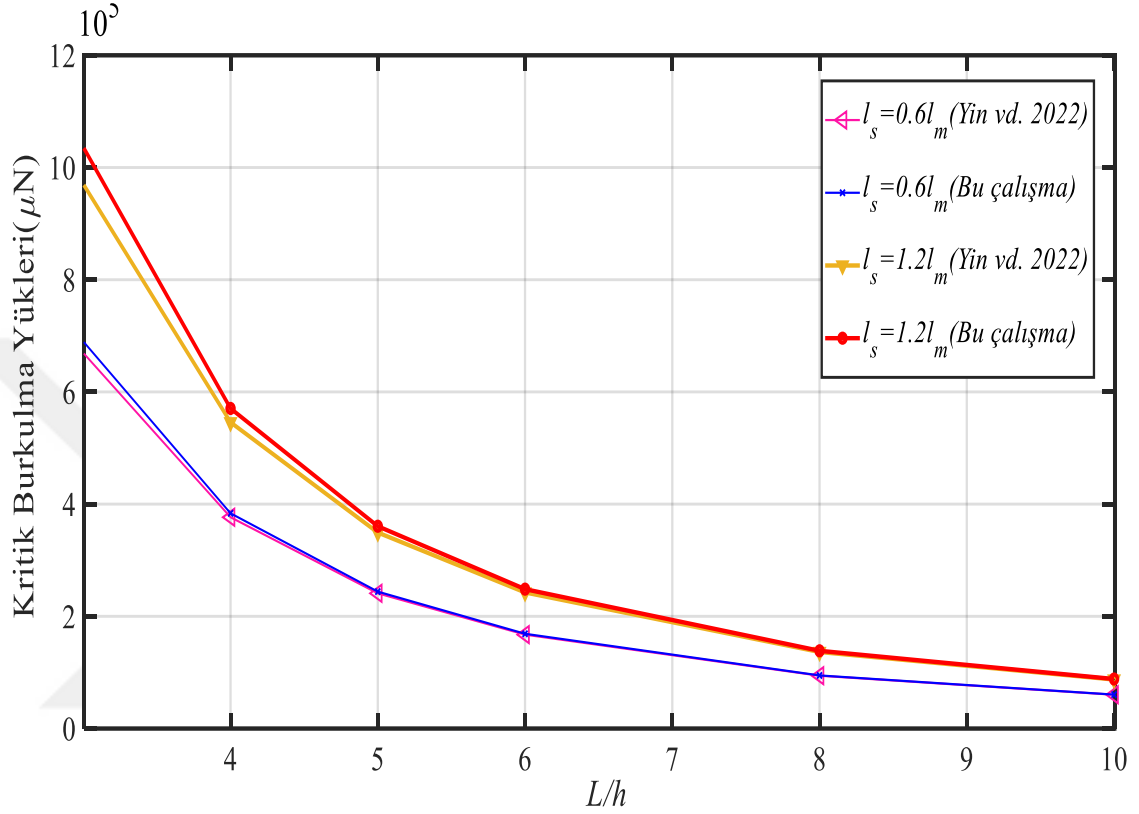
Basit mesnetli kirişin farklı geometrik koşullar için farklı teoriler ile boyutsuz kritik burkulma yükünün kiriş yüksekliğine bağlı değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Malzeme parametreleri yine nikel için olup $E = 207 \text{ GPa}$, ν ise 0.31 alınmıştır. Geometrik koşullar Şekil 3.1.a'daki gibi kabul edilmiştir ve $L = 12h$ alınmıştır. $l_m = 1.553 \mu m$ alınmıştır ve iki farklı YFEŞDD teorisi için $l_s = 0.8l_m$ ve $l_s = 1.25l_m$ alınmıştır. Şekilde görüldüğü gibi kiriş yüksekliği arttıkça tüm teorilerde boyutsuz kritik burkulma yükü (BKBY) azalmıştır. Küçük yükseklik değerleri için YFEŞDDE teorisinde yine daha yüksek BKBY elde edildiği görülmektedir. Malzeme boyut parametresi l_s arttıkça, BKB yükünün arttığı da görülmektedir DGÇT ile YFEŞDD teorisi arasındaki burkulma yükü farkının yüksekliğin daha düşük olduğu değerlerde daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu malzeme boyut parametrelerinin kullanılmasının, daha düşük yükseklik değerlerinde daha belirgin etkileri olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.7. Bir ucu ankastre diğer ucu serbest olan kiriş için BKBY değerlerinin yükseklığe bağlı olarak değişimi

Şekil 4.7’de konsol bir Euler-Bernoulli mikro kirişinin boyutsuz kritik burkulma yükünün değişiminin kiriş yüksekliği ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 3.1.b’deki geometrik koşullar kabul edilmiştir ve $L = 15h$ alınmıştır. Malzeme parametreleri de daha önce belirtildiği gibidir ve YFEŞDD teorisi için iki farklı l_s değeri kullanılmıştır. Bu konsol kiriş için de yüksekliğin artması ile BKB yükünü azaldığı görülmektedir. Yükseklik arttıkça kullanılan teoriler ile elde edilen burkulma değerlerinin birbirine yaklaştığı da söylenebilir. Ayrıca YFEŞDD teorisinin BKBY değerinin daha yüksek olduğu özellikle düşük kiriş yüksekliği değerlerinde gözlemlenebilir. Örnek olarak $h = 3\mu m$, iken $l_s = 1.25l_m$ iken $BKBY = 8.663326$, $l_s = 0.8l_m$ olduğu zaman $BKBY = 6.793331$, DGÇT için ise $BKBY = 5.49584902$ bulunmuştur. Buradan görülebileceği gibi YFEŞDDET ile $l_s = 1.25l_m$ olduğunda ortalama 1.578 kat daha fazla BKBY değeri elde edilmiştir. l_s değeri arttıkça BKBY değerinin arttığı da görülmektedir. Bir ucu ankastre diğer ucu serbest bu kiriş için malzeme boyut parametrelerinin (l_s ve l_m) kullanılmasının etkileri özellikle düşük

yükseklik değerlerinde görülmektedir. Ayrıca bu şekil ile Şekil 4.6'nın farklılıklarından da söz edilebilir. Görüldüğü gibi iki şekilde de YFEŞDD teorisi ile düşük yüksekliklerde daha büyük BKBY elde edilmektedir. Ayrıca BKB yükünün konsol kirişler için daha düşük olduğu da görülebilir. Farklı sınır koşulları için farklı sonuçların elde edilmesi sınır koşullarının rijitliğe olan etkisiyle ilişkilendirilebilir.



Şekil 4.8. Kritik burkulma yüklerinin L/h oranlarına göre karşılaştırılması

Şekilde, Çizelge 4.3'te elde edilen iki çalışma arasındaki kritik burkulma yükü değerlerinin farkı görülmektedir. Şeklin okunabilirliği için L/h oranı sadece 10'a kadar alınmıştır. Bu şekildeki geometrik koşullar $A = bh, b = 2h, h = 2\mu m$ olup malzeme özellikleri olan $E = 207 GPa$ ν ise 0.31 alınmıştır. Malzeme boyut parametresi $l_m = 1.553 \mu m$ olup $l_s = 1.2l_m$ ve $l_s = 0.8l_m$ alınmıştır. Burada da görüldüğü gibi düşük L/h oranlarında ve yüksek l_s değerlerinde iki çalışma arasındaki fark belirginleşmektedir.

5. SONUÇLAR

Yapılan bu tez çalışmasında mikro boyuttaki homojen kirişlerinin burkulma davranışları incelenmiştir. Klasik kiriş modelleri, mikro kirişlerin mekanik davranışlarını incelemede hatalı olabileceği için klasik olmayan teorilere başvurmak gerekir. Bu inceleme yapılırken birçok klasik olmayan teori arasından yeni sayılabilecek olan yeniden formüle edilmiş şekil değiştirme değişimi teorisi kullanılmıştır. Bu teori, burkulma probleminin çözümüne uyarlanmıştır. Modeller oluşturulurken nikel çubuklar kullanılmıştır. Bu nikel çubukların malzeme boyut parametreleri ve diğer malzeme özellikleri Lei vd. (2016) yapmış oldukları çalışmadan alınmıştır. Tezde iki farklı sınır koşulu için burkulma hesabı yapılmıştır. Bu burkulma hesabı bir ucu ankastre diğer ucu serbest olan konsol mikro boyuttaki kiriş ve bir ucu sabit diğer ucu hareketli mesnet olan mikro boyuttaki kiriş için çözülmüştür.

Çözüm yöntemi olarak Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılmıştır ve yaklaşık çözüm fonksiyonu oluşturulmuştur. YFEŞDDET bu yöntem uyarlanarak konsol kiriş ve bir ucu hareketli diğer ucu sabit mesnetli durumlar için yönetici denklemler oluşturulmuştur. Daha sonra toplam potansiyel enerjiyi bulabilmek amacı ile yöntem gereğince şekil değiştirme enerjisinden yapılan toplam iş çıkartılmıştır. Daha sonra farklı sınır koşulları için bir deneme fonksiyonu oluşturulmuştur. Geometrik sınır koşullarında yerlerine yazılarak bir katsayılar matrisi oluşturulur. Bu katsayılar matrisinin determinantının sıfıra eşitlenmesi ile oluşan denklemin çözülmesiyle minimum olan değer alınarak kritik burkulma yükü bulunabilir.

Bahsedilen matrislerin analizleri için ise MATLAB programı kullanılmıştır. Farklı sınır koşulları için oluşturulan matrisler burada çözümlenmiştir. Yapılan çalışmada ikiden ona kadar terimler kullanılarak cevabın yakınsaması yapılmıştır. 10 terimli çalışmanın daha önce yapılan ve kesin çözüm olan diğer çalışmalarla karşılaştırılarak kullanılması uygun görülmüştür.

Analiz kısmında ise farklı sınır koşulları için bu mikro kirişlerin kullanılan ilave malzeme boyut parametrelerinin burkulma problemine olan etkisi incelenmiştir. Farklı parametreler arasında karşılaştırma yapılmıştır.

Çalışmanın güvenilirliğini inceleyebilmek için daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar bu çalışmanın daha önce yapılan çalışmalarla uyumlu olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda çalışmanın hassasiyetini arttırabilmek için Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılırken 10 terimli matrisler kullanılmıştır. Tüm bunların sonucunda bulunan bulgular aşağıda belirtilmiştir:

Değiştirilmiş Gerilme Çifti teorisi ile hesaplanan kritik burkulma yükü ilave malzeme boyut parametrelerinin eklenmesi nedeni ile klasik teori ile hesaplanan değerden daha yüksektir.

Bu çalışmada kullanılan Yeniden Formüle Edilmiş Şekil Değiştirme Değişimi teorisi farklı maddeden yapılmış ve farklı malzeme geometrik koşulları alınsa da

literatürdeki bu teori ile yapılan diğer burkulma çalışmaları ile benzer sonuçlar vermektedir.

İlave malzeme boyut parametrelerinin eklenmesi ile birlikte farklı l_s değerleri için kritik burkulma yükleri klasik teoriye göre ve DGÇ teorisine göre daha büyük çıkmaktadır. Bu büyüklük DGÇ teorisine oranla $l_s=1.2l_m$ için yaklaşık olarak 1.71 katı kadardır. Bu artışın sebebi ise bu teoride kullanılan iki tane malzeme boyut parametresine ek olarak kullanılan 1 ilave malzeme boyut parametresidir.

İki sınır koşulu için de L/h oranı arttıkça kritik burkulma yükü ve BKBY azalmaktadır. Aynı zamanda teoriler arasındaki fark da azalmaktadır. Kiriş yüksekliği azken YFEŞDD ve DGÇT arasındaki kritik burkulma yükü farkı daha belirgindir. Aynı zamanda farklı l_s değerleri için de farklı kritik burkulma yüklerini görmek mümkündür. Ayrıca konsol kirişin kritik burkulma yükünün basit mesnetli kirişe göre kritik burkulma yüküne göre daha küçük olduğunu görmek mümkündür.

İki sınır koşulu için de DGÇT ve YFEŞDD teorisi ile hesaplanan BKBY değerleri kirişin yüksekliği ile azalmaktadır. Boyut etkisi burada da daha küçük yükseklik değerlerinde daha belirgindir ve DGÇT ve YFEŞDD teorisi arasındaki farkı görebilmek mümkündür.

Ayrıca daha önce yapılan çalışma ile Yin vd. (2022.a) sonuçların farklı çıktığı Çizelge (4.3)'te ve Şekil (4.8)'de görülmektedir. Boyut etkisi incelenirken simetrik parametrenin alınmasının daha uygun olduğu söylenebilir.

Mikro ve nano ölçekli sistemler, nanoteknolojinin mühendislik, sağlık, savunma, elektronik, otomotiv, uçak-uzay araştırmaları ve tekstil gibi önemli alanlarında yaklaşık son on yıldır yoğun bir biçimde kullanılmakta olup su sistemlerin gelecekteki uygulamalarının giderek artacağı düşünülmektedir. Bu sistemlerin verimli olarak kullanılması için karakteristik özelliklerinin ve mekanik davranışlarının tasarım aşamasında biliniyor olması gerekir. Deneysel çalışmaların ve atomik düzeyde oluşturulan modellerle yapılan yaklaşımların, pahalı olmaları, karmaşık ve uzun işlemlerden dolayı daha fazla zamana gereksinim duymaları gibi nedenlerden dolayı kullanımları sınırlı olmaktadır. Ayrıca, çoğu durum için de bu fizibil olmamaktadır. Bu nedenlerden dolayı sürekli ortam mekaniğine dayalı modellerin kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır. Önceleri geleneksel elastisite teorileri ile oluşturulan modeller kullanılmıştır fakat boyut etkisi dikkate alınmadığından elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların birbirinden farklı oldukları tespit edilmiştir.

Benzer boyut etkili teorilerden farklı olarak hız değişimi boyut parametresini içeren yeniden formüle edilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorisi nispeten daha yeni olup mevcut çalışmalar da çok sınırlı sayıdadır. Bu yüksek mertebeden elastisite teorisine dayalı henüz literatürde yer almayan, mikro kirişlerin çeşitli parametreler için burkulma değerlerinin hesaplanması ve SCI kapsamında yapılacak en az bir makale ile literatürdeki bu eksikliğin giderilmesi düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Akgöz, B. and Civalek, Ö. 2011.a Strain gradient elasticity and modified couple stress models for buckling analysis of axially loaded micro-scaled beams. *International Journal of Engineering Science*, 49(11): 1268-1280.
- Akgöz, B. and Civalek, Ö. 2011.b Buckling analysis of cantilever carbon nanotubes using the strain gradient elasticity and modified couple stress theories. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 8(9): 1821-1827.
- Akgöz, B. and Civalek, Ö. 2012. Free vibration analysis for single-layered graphene sheets in an elastic matrix via modified couple stress theory. *Materials & Design*, 42: 164-171.
- Akgöz, B. and Civalek, Ö. 2013.a 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. 2013.b 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. ve Civalek, Ö. 2022. Buckling Analysis of Functionally Graded Tapered Microbeams via Rayleigh–Ritz Method. *Mathematics*, 10(23): 4429.
- Alankar, A. and Dinachandra, M. 2022. Static and dynamic modeling of functionally graded Euler–Bernoulli microbeams based on reformulated strain gradient elasticity theory using isogeometric analysis. *Composite Structures*, 280: 114923.
- Anonim 1: <https://www.technicaltextile.net/articles/the-gift-of-nanotechnology-water-proof-fabrics-3796> (Son erişim: 20 Nisan 2024)
- Anonim 2: <https://statnano.com/news/71690/Nanotech-Could-be-the-Next-Frontier-of-Drug-Delivery> (Son erişim: 21 Nisan 2024)
- Anonim 3: <https://www.cnet.com/home/energy-and-utilities/what-are-flexible-solar-panels-the-lightweight-alternative-solar-option/> (Son erişim: 20 Nisan 2024)
- Anonim 4: <https://www.epey.com/akilli-saat/samsung-galaxy-gear.html> (Son erişim: 20 Nisan 2024)
- Anonim 5: <https://www.ntv.com.tr/galeri/teknoloji/uzay-asansoru-icin-tarihi-adim,CdZ5mVTydkSq1q99feAr1w/k9e1b47ZnEuY4Gxzhgtf3Q> (Son erişim: 23 Nisan 2024)
- Ansari, R., Gholami, R., and Darabi, M. 2012. A nonlinear Timoshenko beam formulation based on strain gradient theory. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 7(2): 195-211
- Ansari, R. E. Z. A., Hasrati, E. M. A. D., Faghih Shojaei, M., Gholami, R. A. H. E. B., Mohammadi, V. A. H. I. D. and Shahabodini, A. B. O. L. F. A. Z. L. 2016. Size-dependent bending, buckling and free vibration analyses of microscale functionally graded mindlin plates based on the strain gradient elasticity theory. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13: 632-664.
- Aydogdu, M. 2009.a. A general nonlocal beam theory: Its application to nanobeam

- bending, buckling and vibration. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 41(9): 1651-1655.
- Aydogdu, M. 2009.b. Axial vibration of the nanorods with the nonlocal continuum rod model. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 41(5): 861-864.
- Beşergil, B. 2019. <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/karbon-nanotup-carbon-nanotube.html>.
- Case Western Reserve University. 2011. Tougher, lighter wind turbine blade developed: Polyurethane reinforced with carbon nanotubes. ScienceDaily. Son erişim: [23 Mayıs 2024] www.sciencedaily.com/releases/2011/08/110830102159.htm
- Cosserat, E., Cosserat, F. 1909. *Theorie de Corps deformables*. Editions A. Hermann, Paris
- El-Khatib, A. M., Badawi, M. S., Roston, G. D., Moussa, R. M. and Mohamed, M. M. 2018. Structural and magnetic properties of nickel nanoparticles prepared by arc discharge method using an ultrasonic nebulizer. *Journal of Cluster Science*, 29: 1321-1327.
- Eringen, A. 1972.a. Linear theory of nonlocal elasticity and dispersion of plane waves. *International Journal of Engineering Science*, 10(5): 425-435.
- Eringen, A. 1972.b. Nonlocal polar elastic continua. *International journal of engineering science*, 10(1): 1-16.
- Kong, S., Zhou, S., Nie, Z. and Wang, K. 2009. Static and dynamic analysis of micro beams based on strain gradient elasticity theory. *International Journal of Engineering Science*, 47(4): 487-498.
- Kong, S. 2022. A review on the size-dependent models of micro-beam and micro-plate based on the modified couple stress theory. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(1): 1-31.
- Koiter, W.T. 1964. Couple stresses in the theory of elasticity, I and II. *Proc. K. Ned. Akad. Wet. (B)*, 67: 17-44.
- Lam, D., Yang, F., Chong, A., Wang, J. and Tonga, P. 2003. Experiments and theory in strain gradient elasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51(8): 1477-1508.
- 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(10):5-202.
- Majeed, S. H., Elaikh, T. E. and Ugla, A. A. H. 2024. reformulated strain gradient elasticity theory for free vibration of thermal bi-directional fg microbeam. *Jurnal Teknologi*, 86(2): 123-134.
- Ma, H. M., Gao, X. L. and Reddy, J. 2008. A microstructure-dependent Timoshenko beam model based on a modified couple stress theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56(12): 3379-3391.
- Mohammad-Abadi, M. and Daneshmehr, A. 2014. Size dependent buckling analysis of microbeams based on modified couple stress theory with high order theories and general boundary conditions. *International Journal of Engineering Science*, 74:1-

14.

- Mindlin, R.D. and Tiersten, H.F. 1962. Effects of couple-stresses in linear elasticity. *Arch. Ration. Mech. Anal.*, 11: 415–448.
- Mindlin, R. D. 1964. Micro-structure in linear elasticity. *Archive for rational mechanics and analysis*, 16: 51-78.
- 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.
- Peddie, J., Buchanan, G. R., McNITT, R. P. 2003. Application of nonlocal continuum models to nanotechnology. *International Journal of Engineering Science*, 41: 305-312.
- Peng, B., Zhang, H., Shao, H., Ning, Z., Xu, Y., Ni, G. and Zhu, H. 2017. Stability and strength of atomically thin borophene from first principles calculations. *Materials Research Letters*, 5(6): 399–407.
- 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
- Roudbari, M. A., Jorshari, T. D., Lü, C., Ansari, R., Kouzani, A. Z., and Amabili, M. 2022. A review of size-dependent continuum mechanics models for micro-and nano-structures. *Thin-Walled Structures*, 170: 108562.
- Sudak, L. J. 2003. Column buckling of multiwalled carbon nanotubes using nonlocal continuum mechanics. *Journal of applied physics*, 94(11): 7281-7287.
- Şimşek, M., and Yurtcu, H. 2013. Analytical solutions for bending and buckling of functionally graded nanobeams based on the nonlocal Timoshenko beam theory. *Composite Structures*, 97: 378-386.
- Toupin, R. 1962. Elastic materials with couple-stresses. *Archive for rational mechanics and analysis*, 11(1): 385-414.
- Toupin, R.A. 1964. Theory of elasticity with couple stresses. *Arch. Ration. Mech. Anal.*, 17: 85–112.
- Thai, H. T., Vo, T. P., Nguyen, T. K. and Kim, S. E. 2017. A review of continuum mechanics models for size-dependent analysis of beams and plates. *Composite Structures*, 177: 196-219.
- Voigt, W. 1887. Theoretical studies of the elastic behaviour of crystals. *Presented at the session of the Royal Society of Science on*.
- Wang, C.M., Wang, C.Y. and Reddy, J.N. 2005. *Exact Solutions for Buckling of Structural Members*, CRC Press, Florida.
- Wang. 2010. A micro scale Timoshenko beam model based on strain gradient elasticity theory. *European Journal of Mechanics- A/Solids*, 591-599.
- Wang, B., Liu, M., Zhao, J. and Zhou, S. 2014. A size-dependent Reddy–Levinson beam model based on a strain gradient elasticity theory. *Meccanica*, 49: 1427-1441.
- Wang, S., Hong, J., Wei, D. and Zhang, G. 2023. Bending and wave propagation analysis

- of axially functionally graded beams based on a reformulated strain gradient elasticity theory. *Applied Mathematics and Mechanics*, 44(10): 1803-1820.
- Xiang, Y. and Zhang, L. 2005. Free vibration analysis of stepped circular Mindlin plates. *Journal of Sound and Vibration*, 280(3-5): 633-655.
- Xia, W., Wang, L. and Yin, L. 2010. Nonlinear non-classical microscale beams: Static bending, postbuckling and free vibration. *International Journal of Engineering Science*, 48(12): 2044-2053.
- Yang, F. A. C. M., 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., Uzun, B. and Deliktaş, B. 2022. Buckling analysis of restrained nanobeams using strain gradient elasticity. *Waves in Random and Complex Media*, 32(6): 2960–2979.
- Yin, S., Xiao, Z., Deng, Y., Zhang, G., Liu, J. and Gu, S. 2021. Isogeometric analysis of size-dependent Bernoulli–Euler beam based on a reformulated strain gradient elasticity theory. *Computers & Structures*, 253: 106577.
- Yin, S., Xiao, Z., Zhang, G., Liu, J. and Gu, S. 2022.a Size-Dependent Buckling Analysis of Microbeams by an Analytical Solution and Isogeometric Analysis. *Crystals*, 12(9): 1282.
- Yin, S., Xiao, Z., Zhang, G., Bui, T. Q., Wang, X. and Liu, J. 2022.b Size-dependent postbuckling for microbeams: analytical solutions using a reformulated strain gradient elasticity theory. *Acta Mechanica*, 233(12): 5045-5060.
- Yin, S., Xiao, Z., Liu, J., Xia, Z. and Gu, S. 2022.c Variational formulations and isogeometric analysis of Timoshenko–Ehrenfest microbeam using a reformulated strain gradient elasticity theory. *Crystals*, 12(6): 752.
- Zhang, Y. Q., Liu, G. R. and Xie, X. Y. 2005. Free transverse vibrations of double-walled carbon nanotubes using a theory of nonlocal elasticity. *Physical Review B*, 71(19): 195404.
- Zhang, G. Y. and Gao, X. L. 2020. A new Bernoulli–Euler beam model based on a reformulated strain gradient elasticity theory. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 25(3): 630-643.
- Zhang, G., Zheng, C., Mi, C. and G, X. L. 2022. A microstructure-dependent Kirchhoff plate model based on a reformulated strain gradient elasticity theory. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(17): 2521-2530.
- Zhao, J., Zhou, S., Wang, B. and Wang, X. 2012. Nonlinear microbeam model based on strain gradient theory. *Applied Mathematical Modelling*, 36(6): 2674-2686.

ÖZGEÇMİŞ

ANIL YILDIRIM

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2021-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2016-2020	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya