

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



WINKLER ZEMİN ÜZERİNDEKİ MİKRO KİRİŞLERİN RAYLEIGH-
RİTZ YÖNTEMİ İLE STATİK ANALİZİ

Ali Yekta ALTIN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**WINKLER ZEMİN ÜZERİNDEKİ MİKRO KİRİŞLERİN RAYLEİGH-
RİTZ YÖNTEMİ İLE STATİK ANALİZİ**

Ali Yekta ALTIN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OCAK 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**

**WINKLER ZEMİN ÜZERİNDEKİ MİKRO KİRİŞLERİN RAYLEIGH-
RİTZ YÖNTEMİ İLE STATİK ANALİZİ**

Ali Yekta ALTIN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez / / 202..... tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Bekir AKGÖZ (Danışman)

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Doç. Dr. Mehmet AVCAR

ÖZET

WINKLER ZEMİN ÜZERİNDEKİ MİKRO KİRİŞLERİN RAYLEIGH-RITZ YÖNTEMİ İLE STATİK ANALİZİ

Ali Yekta ALTIN

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bekir AKGÖZ

Ocak 2023; 55 sayfa

Günümüzde her alanda yaşanan dijitalleşme ve bu dijitalleşme sonucu ortaya çıkan her türlü donanımın küçülmesi ve aynı zamanda hızlanmasına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu ihtiyaç ile beraber insanlar küçülen donanımları taşımaya ve günlük hayatlarının her alanında kullanmaya başlamışlardır. Her gün gelişen teknoloji sonucunda mikro ve nano yapılara sahip donanımlar ve yapıların kullanım alanı da genişlemiştir.

Mikro elemanlar hakkında yapılan çalışmalar hala başlangıç aşamasında olduğu için mikro yapıların mekanik davranışlarının belirlenmesi için çeşitli deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Fakat bu yöntem çok maliyetli ve çok uzun zaman almaktadır. Bu nedenle mikro yapılar üzerinde yapılan çalışmalarda genellikle matematiksel modellemenin yapıldığı sürekli ortam mekaniği yaklaşımı kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında, dört farklı mesnetleme durumu için Winkler zemin üzerindeki mikro kirişlerin Rayleigh-Ritz yöntemi ile boyut etkili eğilme davranışları incelenmiştir. Modellemede Bernoulli-Euler kiriş ve değiştirilmiş gerilme çifti teorileri kullanılmıştır. Elastik zemin ile mikro kiriş arasındaki etkileşimler, Winkler zemin modeli ile dikkate alınmıştır. Boyut ölçek parametresi, uygulanan yük, Winkler zemin parametresi ve sınır koşullarının mikro kirişin deplasman değerleri üzerindeki etkileri detaylı bir biçimde incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Bernoulli-Euler kiriş teorisi, Değiştirilmiş gerilme çifti teorisi, Mikro kirişler, Nanoteknoloji, Rayleigh-Ritz yöntemi, Winkler elastik zemin modeli.

JÜRİ: Doç. Dr. Bekir AKGÖZ

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Doç. Dr. Mehmet AVCAR

ABSTRACT

STATIC ANALYSIS OF MICRO BEAMS ON WINKLER FOUNDATION WITH RAYLEIGH-RITZ METHOD

Ali Yekta ALTIN

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

January 2023; 55 pages

Today, digitalization in every field and all kinds of hardware that emerge as a result of this digitalization need to be downsized and accelerated at the same time. As a result of these developments, people started to carry shrinking equipment and use them in every aspect of their daily lives, and as a result of developing technology every day, the usage area of nanotechnology has expanded among existing technologies.

Since studies in the field of nanotechnology are still in their infancy, various experimental studies have been carried out to determine the mechanical behavior of microstructures. However, these are very costly and take a long time. For this reason, continuum mechanics approach, in which mathematical modeling is made, is generally used in studies on microstructures.

Within the scope of this thesis, the size-dependent bending behavior of microbeams on elastic foundation is investigated using Rayleigh-Ritz method for four different support situations. Bernoulli-Euler beam theory and modified couple stress theory are used in the modeling. The interactions between the elastic foundation and the microbeam are considered with the Winkler elastic foundation model. The effects of length scale parameter, applied load, Winkler foundation parameter, and boundary conditions on the displacement values of the microbeam are investigated in detail.

KEYWORDS: Bernoulli-Euler beam theory, Microbeams, Modified couple stress theory, Nanotechnology, Rayleigh-Ritz method, Winkler elastic foundation model.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Assoc. Prof. Dr. Mehmet AVCAR

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, dijitalleşen dünyada gelişen bilgisayar teknolojileri ve nanoteknolojideki hızlı ilerleme ile birlikte küçülen donanımlardaki boyut etkisi problemleri sonucu son yıllarda mikro yapılar üzerinde çok daha fazla çalışma yapılmıştır. Teknolojinin hiçbir zaman geri adım atmadığı bilindiği üzere mikro ölçekli yapılar üzerinde yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir. Özellikle mikro ve nano yapılar ve bunların mekanik davranışları üzerine yoğun çalışmalar yapılmakta ve yapılmaya devam edileceği tahmin edilmektedir.

Mikro ve nano ölçekli elemanlar günümüzde birçok alanda (savunma, elektronik, uzay-uçak, tekstil, sağlık) kullanılmakta olup; önümüzdeki yıllarda kullanımı artarak devam edeceği öngörülmektedir. Bahse konu mikro ve nano elemanların verimli ve güvenli kullanılabilmesi amacıyla, elemanların mekanik ve statik özelliklerinin tasarımlarının yapılmadan önce tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Elemanlar üzerinde yapılan fiziksel deneyler çok zaman kaybına neden olmakla beraber maliyet açısından da çok uygulanabilir değildir.

Yüksek lisans tez çalışmasında kısaca farklı parametreler (kiriş mesnetleme çeşitleri, boyut ölçek parametresi, zemin parametresi ve yük değerleri) altında mikro kirişlerin statik eğilme davranışı özelliklerinin Rayleigh-Ritz yöntemi ile belirlenmesidir. Bu karşılaştırma sonucunda çıkan bulguların geçerliliği ve tutarlılığı hakkında sonuca varılmak istenmektedir.

Özellikle yüksek lisans eğitimi sürecim boyunca karşıma çıkan zorlukları aşmamda bana büyük yardımları olan danışman hocam sayın Doç. Dr. Bekir AKGÖZ'e içten teşekkürlerimi sunuyorum. Antalya Büyükşehir Belediyesi ASAT Genel Müdürlüğü'ndeki mesai arkadaşlarıma ve bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan aileme kalpten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Nanoteknolojinin tanımı.....	2
1.1.1. Nanoteknolojinin kronolojisi	2
1.2. Nanoteknolojinin kullanım alanlar.....	2
1.2.1. Nano Elektronik ve Bilgisayar Teknolojileri	6
1.2.2. Nanoteknoloji Havacılık ve Uzay	6
1.2.3. Nanoteknoloji Tıp ve Sağlık	7
1.2.4. Nanoteknoloji Çevre ve Enerji.....	8
1.2.5. Nanoteknoloji Biyoloji ve Tarım	8
1.2.6. Nanoteknoloji ve Savunma Sanayi	9
1.2.7. Nanoteknoloji Bilim ve Eğitim	10
1.2.8. Nanoteknoloji ve Ulaştırma Sektörü.....	10
1.2.9. Nanoteknoloji Kozmetik ve Malzemeler	11
1.2.10. Nanoteknoloji İnşaat ve Mimari.....	11
1.3. Nanomalzemeler	12
1.3.1. Grafen.....	12
1.3.2. Karbon Nanotüp	13
1.3.3. Borofen.....	14
1.4. Nikel Elementinin Genel Özellikleri.....	15
1.5. Uzay Asansörü	15
1.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi	17
1.7. Bernoulli-Euler Teorisi	17
2. KAYNAK TARAMASI	18
3. MATERYAL VE METOT	31

3.1. Çalışmada Kullanılan Formülasyonlar.....	31
3.2. Rayleigh-Ritz Yönteminin Uygulanması.....	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	34
5. SONUÇLAR	46
6. KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Winkler Zemin Üzerindeki Mikro Kirişlerin Rayleigh-Ritz Yöntemi İle Statik Analizi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

16/01/2023

Ali Yekta ALTIN



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- c_i : Şekil fonksiyonu sabiti
- ϕ_i : Polinom sayısı
- A : Kesit alanı
- E : Young modülü
- k_w : Winkler zemin parametresi
- L : Mikro kiriş uzunluğu
- σ_{ij} : Gerilme tansörü
- ν : Poisson oranı
- U : Şekil değiştirme enerjisi
- w_x : Deneme fonksiyonu
- V : Eksenel basınç kuvvetinin potansiyeli
- ε_{ij} : Şekil değiştirme tansörü
- λ : Lamé Sabiti
- Π : Minimum toplam potansiyel enerji
- I : Atalet momenti
- μ : Kayma modülü
- Cu : Bakır
- Ti : Titanyum

Kısaltmalar

VİM : Varyasyonel İterasyon Metodu

YMKT: Yüksek Mertebeden Kiriş Teorisi

DGÇT : Değiştirilmiş Gerilme Çifti Teorisi

KNT : Karbon Nanotüpler

DŞDD : Değiştirilmiş Şekil Değiştirme Değişimi

m : Metre

nm : Nanometre

NEMS : Nano Elektro Mekanik Sistem

MEMS: Mikro Elektro Mekanik Sistem

FDM: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme

MLSP: Malzeme Boyut Parametresi

Ark. :Arkadaşları

K: Konsol Kiriş

B: Basit Kiriş

AK: İki Ucu Ankastre Kiriş

AB: Bir Ucu Ankastre Bir Ucu Basit Mesnetli Kiriş

Bu tez kapsamındaki sayısal değerlerin ondalık ayıracı olarak virgöl (,) işareti kullanılmıştır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Örnek bir mikro-kiriş modeli (Suten vd. 2011).....	1
Şekil 1.2. Nanoteknoloji Ölçeklendirme Görseli (Anonim 1).....	4
Şekil 1.3. Uzay Teknolojisi Görseli (Anonim 2).....	5
Şekil 1.4. Nanoteknoloji ve Bilgisayar Teknolojisi Görseli (Anonim 3).....	6
Şekil 1.5. Dış Yüzeyi Grafen Kaplı Hava Aracı(Anonim 4).....	7
Şekil 1.6. Nanoteknoloji ve Tıp Görseli (Anonim 5).....	7
Şekil 1.7. KNT Teknolojisi Kullanılarak Yapılan Rüzgar Türbini (Anonim 6).....	8
Şekil 1.8. Tarım Alanında Kullanılan Nanojel Görseli (Anonim 7).....	9
Şekil 1.9. Nano Robot Görseli (Anonim 8).....	9
Şekil 1.10. Eğitim Alanında Nanoteknoloji Görseli (Anonim 9).....	10
Şekil 1.11. Nanoteknoloji ile Renk Değiştiren Araç Görseli (Anonim 10).....	11
Şekil 1.12. Nanoteknoloji ile Üretilen Boya Teknolojisi Görseli (Anonim 11).....	12
Şekil 1.13. Grafen Dizilim Örneği (Numanoğlu and Civalek 2019).....	13
Şekil 1.14. Karbon Element Dizilimleri ve İsimleri.....	14
Şekil 1.15. Borofen Görseli (Anonim 12).....	14
Şekil 1.16. Anonim Uzay Asansörü Görseli (Anonim 13).....	15
Şekil 1.17. Anonim Uzay Asansörü Görseli (Anonim 14).....	16
Şekil 1.18. Uzay Asansörü Çalışma Mantiğı Görseli (Anonim 15).....	16
Şekil 4. 1. Boyut parametresi ($l=0$) iken mikro basit kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi.....	34
Şekil 4. 2. Boyut parametresi ($l=0$) iken bir ucu ankastre bir ucu basit mesnetli mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi.....	35
Şekil 4. 3. Boyut parametresi ($l=0$) iken iki ucu ankastre mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi.....	35
Şekil 4. 4. Boyut parametresi ($l=0$) iken konsol mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi.....	36
Şekil 4. 5. Boyut parametresi ($l=1,553$) iken mikro basit kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi.....	37
Şekil 4. 6. Boyut parametresi ($l=1,553$) iken bir ucu ankastre bir ucu basit mesnetli mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi.....	38
Şekil 4. 7. Boyut parametresi ($l=1,553$) iken iki ucu ankastre mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi.....	39

Şekil 4. 8. Boyut parametresi ($l=1,553$) iken konsol mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi.....	40
Şekil 4. 9. Boyut parametresi ($l=0$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro konsol kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi.....	42
Şekil 4. 10. Boyut parametresi ($l=0$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro basit kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi.....	42
Şekil 4. 11. Boyut parametresi ($l=0$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro iki ucu ankastre kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi.....	43
Şekil 4. 12. Boyut parametresi ($l=1,553\mu\text{m}$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro konsol kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi.....	44
Şekil 4. 13. Boyut parametresi ($l=1,553\mu\text{m}$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro basit kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi.....	44
Şekil 4. 14. Boyut parametresi ($l=1,553\mu\text{m}$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro iki ucu ankastre kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi.....	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Bernoulli-Euler Teorisi ile Rayleigh-Ritz Teorisinin Maksimum Deplasmanlarının Karşılaştırılması.....	33
Çizelge 4.1. Çeşitli Mesnetle Koşullarındaki Mikro Kirişlerin Farklı Zemin Parametrelerindeki Maksimum Deplasman Değerleri ($l = 0$).....	41
Çizelge 4.2. Çeşitli mesnetle koşullarındaki mikro kirişlerin farklı zemin parametrelerindeki maksimum deplasman değerleri ($l = 1,553\mu\text{m}$).....	41



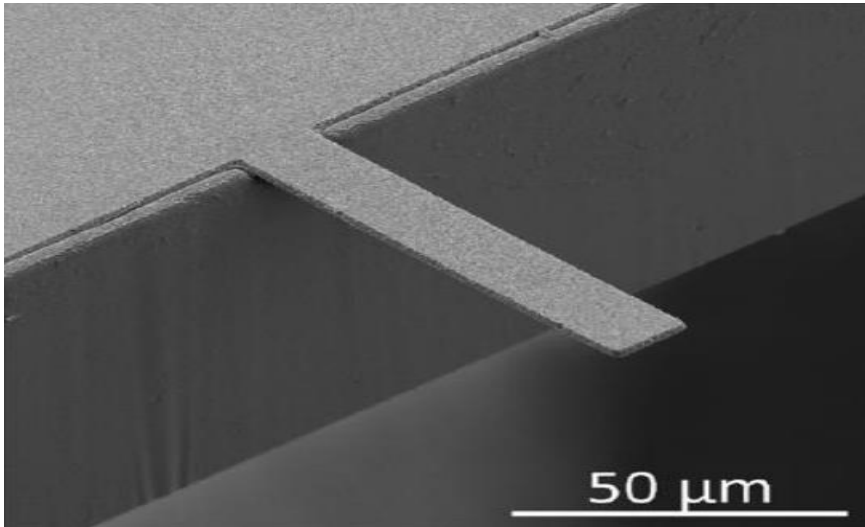
1. GİRİŞ

Günümüzde dijitalleşen birçok sektörde özellikle başta savunma, otomotiv, uçak-uzay teknolojilerinde ayrıca sağlık ve tekstil alanları olmak üzere mikro ve nano eleman ve yapılar yoğunlukla kullanılmaya başlanmıştır. Önümüzdeki yıllarda şu an kullanıldığı alanlardan çok daha fazla sanayi teknolojisi alanında kullanım bulacağı konusunda şüphe bulunmamaktadır.

20.yüzyılda özellikle savunma, uzay-uçak, robot, enerji teknolojileri Ulus devletler tarafından finanse ediliyor ve devletlere bağlı kurumlar tarafından çalışmalar yapıyordu. Günümüzde ise gelişen dünya ile birlikte küresel hale gelen ekonomi ve özel şirketlerin ekonomik olarak bağımsız ve güçlü hale gelmesiyle özel şirketler tarafından yukarıda saydığımız alanlara yatırım yapılmaya başlamıştır. Bu sayede bu alanlarda yapılan teknolojik çalışmalara daha fazla finans ve zaman harcanmaya başlanmış olup; teknolojik gelişmeler son 20 yılda hız kazanmıştır.

Nano ve mikro elemanların yoğun şekilde kullanıldığı yapılar nanoenerji toplayıcıları, nanomekanik, rezonatörler, osilatörler, nano yük detektörleri, nano ölçekli kütle sensörleri, biyolojik emülsiyon cihazları, elektromekanik nano aktüatörler ve diğer nano elemanlardır. Bu cihazlar yukarıda bahsettiğimiz gibi birçok bilim dalında son teknoloji ürünü olarak kullanılmaktadır.

Tez çalışmamızda nano ve mikro elemanlar üzerinde fiziksel deneylerin yapılmasının çok yüksek maliyetlerinin olması ve çok geniş imkanlarının olması gerekmektedir. Ayrıca deneyler çok uzun zaman almakta ve çok fazla iş gücü gerektirmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmalarda matematiksel yaklaşım yöntemleri kullanılmaktadır. Tezimiz kapsamında da değişken parametrelili mikro kirişlerin Rayleigh-Ritz yöntemi ile mekanik ve statik davranışları Bernoulli-Euler kiriş teorisi ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.1. Örnek bir mikro-kiriş modeli (Suten vd. 2011)

Kullanım alanı çok geniş olan nano boyuttaki elemanların mekaniksel davranışları üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Çalışma kapsamında değişken koşullara sahip mikro kirişler incelenmiştir. Bu değişkenler kirişlerin farklı mesnetleme koşulları, boyut parametresi ve zemin parametresidir

Çalışmada parametreler değiştirilmesinin yanında kullanılan hesaplama yönteminin değiştirilmiştir. Rayleigh-Ritz yöntemiyle mikro kirişler üzerinde farklı mekanik sonuçlar bulunmuştur. Bulunan sonuçlar aynı kirişlerde aynı parametreler kullanılarak Bernoulli-Euler kiriş teorisinde çıkan değerler ile karşılaştırılmıştır.

Çıkan sonuçların değerlendirilerek yapılacak diğer çalışmalar için bir altyapı ve referans olması amacıyla kullanılabilir.

1.1. Nanoteknolojinin tanımı

Nanoteknoloji, Latince kökeni olan bir kelimedir ve Türkçe'ye "cüce" olarak tercüme edilen "nano" ve genel olarak ürün veya her türlü hizmetin türetilmesinde ve üretilmesi ve gerçekleştirilmesine verilen isimdir.

1.1.1. Nanoteknolojinin kronolojisi

1959'da Richard Feynman, cihazların atomik boyutlarda üretilebilir hale gelmesiyle neler yapılabileceğini anlatmıştır. Feynman konuşmalarında minyatür hale getirilmiş cihazlar ile atomik boyutlu yapıların ölçülebileceğinin ve daha işlevsel biçimde kullanılabileceğinin altına çizilmiştir.

Nanoteknoloji Amerika'da 2001 yılında daha fazla kurumsal alana girdi. Başlangıç için Amerika'nın nanoteknoloji bütçesi 442 milyon dolar oldu. Clinton'dan sonra 3 yıl sonra; 2003 Aralık ayında Başkan Bush 21.yüzyıl nanoteknolojinin stratejik bir önemi olacağını anlayıp ayrılan bütçeyi 849 milyon dolara çıkarmıştır.

Birçok ülke bu hamlenin üzerine 2004 yılında başta Japonya, Almanya, Çin, Rusya, konusunda sürekli olarak çalışıyor. 2004 yılı boyunca özel şirketler ve üniversiteler 8,6 milyar dolar yatırım yapmıştır. Aralarında General Electric ve Intel gibi dev firmalar vardır.

2015 yılında ise nanoteknolojiye yapılan yatırım ve nanoteknoloji pazarı 1 trilyon doları aşarak. Bugünkü seviyelere geldi.

1.2. Nanoteknolojinin kullanım alanlar

Günümüzde teknolojinin her alanda hızlı gelişmesinin sonucu olarak oluşan ölçeklenebilme sorununun en iyi çözümü nanoteknoloji ve nanoteknoloji üzerinde yapılan çalışmalar ve bu çalışmaların günlük hayatta kullanıma sunulmuş olmasıdır.

Gelişen bu çağda kullandığımız akıllı cihazların çok daha küçük ve taşınabilir olması gerekmekte hatta giyilebilir ve ilerleyen aşamalarda vücudumuzda implant olarak yerleştirileceği yakın gelecekte tahmin edilmektedir.

Nano aslen Yunanca kökenli bir kelime olup, küçük anlamına gelmektedir. Nanometre metrenin 10^{-9} katına eşittir. Nanoteknoloji ise bu boyuttaki cihazların üzerinde mühendislik yapan bilim dalıdır.

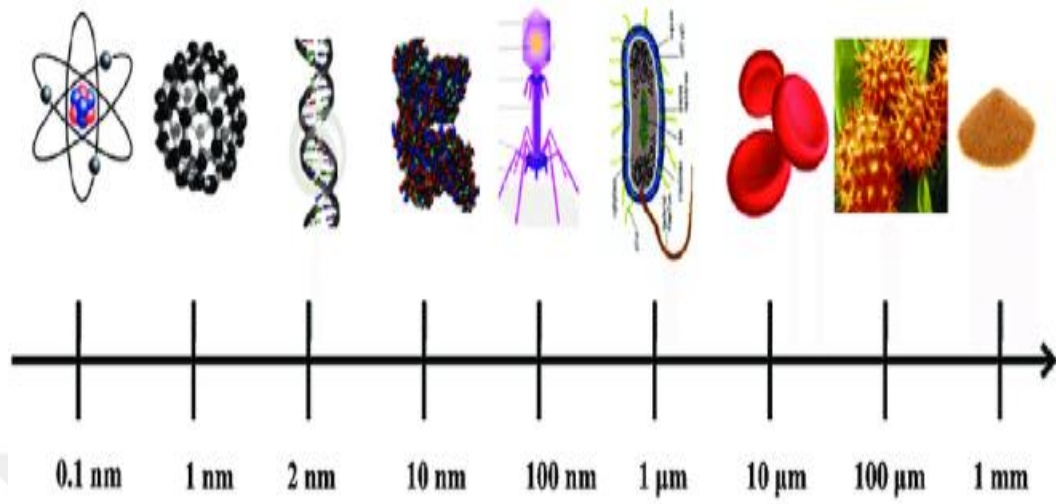
MEMS teknolojilerinin gelişmesi ile mikro ölçekte çeşitli cihazlar üretilmiştir. Üretilen bu mikro yapılara örnek aktüatörler ve rezonatörler vb. (Conell vd. 1997, Lin vd. 1997, Srikar ve Saturaia 2002, Vollmer vd. 2022, Fargas vd. 2007).

MEMS cihazlarının performanslarını ve güvenilirliklerini ölçmek için çeşitli deneyler ve modeller oluşturulmuş ve kapsamlı araştırmalar yapılmıştır (Li ve Bhushan 2002, Haque ve Saif 2003, Chuang vd. 2010, Shoaib vd 2016, Zhang ve Zhao 2016, Sriker ve Spearing 2003).

Geçtiğimiz on yıllarda içerisinde MEMS olduğu yapılarda deformasyon davranışları meydana gelmiştir. Deforme olan plastik ve metal parçalarda boyut etkisi gözlenmiştir (Stelmashenko vd. 1993, Fleck vd. 1994, Ma ve Clarke 1995, Poole vd. 1996, Stölken ve Evans 1998, Chong ve Lam 1999).

Boyut etkileri ile beraber bazı polimer ve metallerin mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak deforme ve elastikiyetleri gözlemlenmiştir (Leibold ve Müller 2016).

Nano metrenin ölçütünün anlaşılabilmesi için birtakım örnekler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 1.2. Nanoteknoloji Ölçeklendirme Görseli (Anonim 1)

Nanoteknolojilerin bu derece ilerlemesi ve bilim adamlarının bu konuyu çalışarak günlük hayata adapte etmesinin nedeni teknolojik cihazların taşınabilir duruma gelmesi istediğidir. Bir noktada sabit duran devasa bilgisayarlardan günümüzde cebimizde taşıdığımız süper bilgisayarlara evrimleşmiştir. Örneğin devasa plastik enjeksiyon makinelerinden bugün evlerde rahatlıkla kullanılabilen üç boyutlu yazıcılara dönüşmüştür. Yakın gelecekte nano ölçekli yazıcılar ile elektronik parçaların yapılabileceği düşünülmektedir.

Tabi ki nanoteknoloji hala yeni bir alan olduğu için daha önce makro ölçekle çalışan birçok eleman artık mikro ve nano boyuttan çalışıldığı için mekanik davranışlar çok farklı olmakla beraber elemanların dayanımları üzerinde büyük soru işaretleri oluşmaktadır.



Şekil 1.3. Uzay Teknolojisi Görseli (Anonim 2)

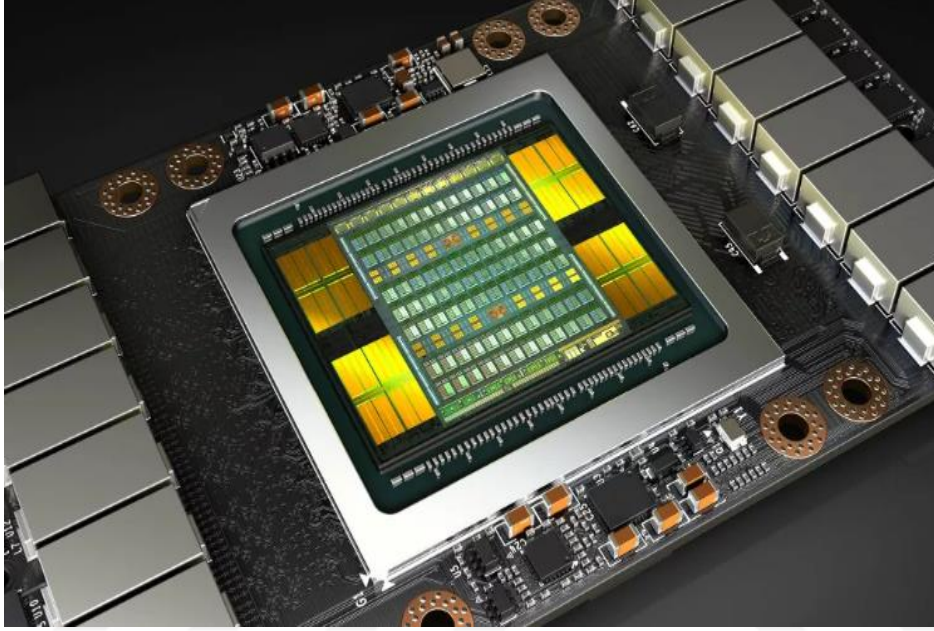
Günümüzde ekonomideki küreselleşme ve dünyanın kaynakların ulaşılabilirliği açısından gelişmesiyle beraber dünyadaki zenginliğin ulus devletlerden dünya devi firmalara ve internet teknolojileri ve bu gibi firmalara kaymasıyla beraber teknolojik çalışmalar hız kazanmıştır.

Özellikle internet teknolojileri ve streaming platformları ile beraber zenginleşen şirketler uzay-uçak teknolojilerinde elektrikli araç sektöründe ve bu elektrikli araçlardaki sensör ve otonom sürüş donanımları üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Devletler tarafından finanse edilen şirketlere özel sektörden rakip çıkması dolayısıyla çalışmalar çok daha verimli hale gelmiştir. Örneğin spaceX firması tarafından yapılmaya başlanmıştır. Bu sayede ulus devletler tarafından çok yüksek maliyetli projeler özel bir firma tarafından çok daha uygun fiyata ve tekrar tekrar kullanılabilen otonom iniş yapan roketler yapılmaya başlamıştır. Dolayısıyla streaming platformları örneğin netflix, spotify, geforce now gibi firmaların donanımsal alanda kendilerini geliştirerek daha küçük alanlarda daha güçlü sunucuların kurulması gerekmektedir.

Bu çerçevede 21. yüzyılda gelişen büyük firmaların bu alanda çalışması ve kullanılabilir teknolojilere nanoteknoloji ürünlerini getirmesiyle beraber nanoteknoloji hızla ilerlemeye devam etmektedir.

1.2.1. Nano Elektronik ve Bilgisayar Teknolojileri

Nanoelektronik devrelerle devre elemanlarının üretilmesiyle bilgisayarların donanımsal tasarımında da değişiklikler meydana gelmektedir. Nano ölçekteki devre elemanları daha az enerji tüketmekte ayrıca bu bilgisayarlar daha küçük fakat verimli olmaktadır. Sensörler, sinyal üretim cihazları, kuantum bilgisayarları gibi gelişmekte olan alanlarda geliştirilerek kullanılmaya devam edilmektedir.



Şekil 1.4. Nanoteknoloji ve Bilgisayar Teknolojisi Görseli (Anonim 3)

1.2.2. Nanoteknoloji Havacılık ve Uzay

Ekonomik yönden çok yüksek maliyeti olan bir alan olduğu için çok mikro ölçekte olan hafiflemeler ve son dönemde NASA, SPACEX, BOEİNG, AIRBUS gibi uzay-havacılık alanında çalışan firmalar son dönemde küresel ekonomik konjonktürün ve sermayenin farklılaşmasıyla teknolojik çalışmalar hızlandı ve daha sağlam, daha hafif ve ekonomik parçalar yapılmaya başlanmıştır.



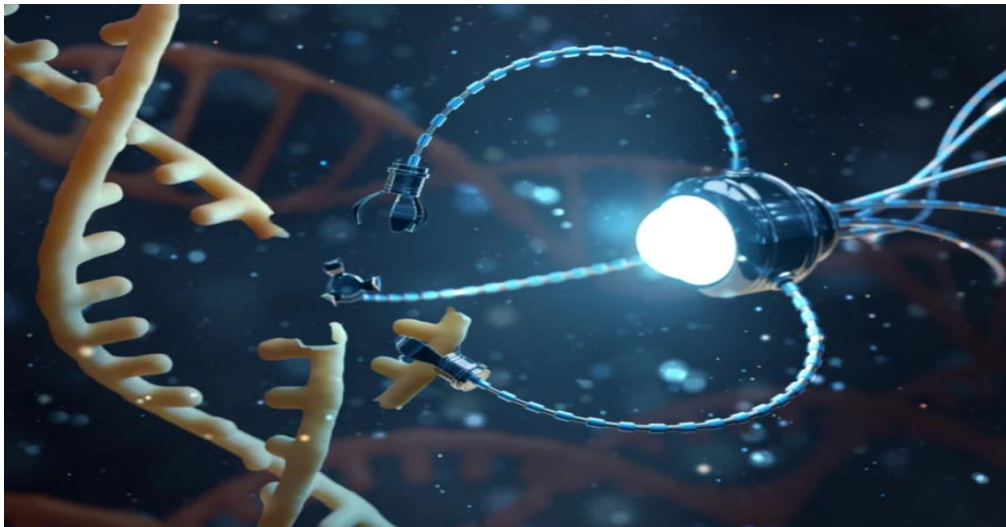
Şekil 1.5. Dış Yüzeyi Grafen Kaplı Hava Aracı(Anonim 4)

1.2.3. Nanoteknoloji Tıp ve Sağlık

Tıp alanındaki nano parçacıklara proteinler, protein kompleksleri, dokular, kromozomlar, lipitler, karbonhidratlar örnek gösterilebilir. Nano ölçekteki aygıtlar sayesinde hastalıkların teşhisinde ve tedavisinde yeni yöntemler geliştirilebilir.

Ayrıca hasar görmüş nano ölçekli vücut birleşenleri düzenlenebilir. Hasar görmüş sinir uçlarının onarılması kanser hücrelerinin tespiti ve iyileştirilmesi amacıyla kullanılabilir.

Tıp alanında özellikle uzvunu kaybetmiş engelli insanlarda nano elektronik dalı ile beraber yapay uzuvlar yapılarak düşünce yoluyla yapay uzuvları kontrol etmesi mümkün ve bu teknolojinin ilerleyen zamanda çok daha fazla ve yaygın şekilde kullanılacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 1.6. Nanoteknoloji ve Tıp Görseli (Anonim 5)

1.2.4. Nanoteknoloji Çevre ve Enerji

Özellikle son yıllarda ve gelecek yıllarda en büyük sorun dünyada enerji sorunu olacağı göz önüne alınacak olursa yenilenebilir enerji konusunda çalışmalar en hızlı şekilde sürmektedir. Güneş panellerinde kullanılan ve enerji depolama işi için kullanılan pil ve akü sistemleri için kullanılabilir. Bu şekilde yenilenebilir enerjinin en büyük sıkıntısı olan depolanabilme sorunlarına çözümler üretilebilir.

Günümüzde elektrikli araçların yoğun şekilde kullanımı başlanmış olup birçok otomotiv devi bu alana yatırım yapmaya başlamıştır. Örnek olarak Tesla şirketi başta olmak üzere Volvo, Volkswagen, Mercedes gibi dünya devi firmalar pil teknolojileri üzerine çalışıyorlar ayrıca sadece pilin güç hacmi değil aynı zamanda pilin hızlı şarj olması ve boyutunun küçültülmesi ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır.

Nanoteknolojinin bize sunduğu gelişmeler sayesinde daha az yer kaplayan daha verimli ve daha hızlı şarj olan piller yapılabilir ve önümüzde duran enerji krizi atlatılabilir. Ayrıca güneş panelleri ile ilgili gelişmeler çok ümit verici olmaktadır panellerdeki hücreler nano boyutlara düşürülerek daha az yer kaplayan panellerle daha çok enerji üretilmesi sağlanabilir.



Şekil 1.7. KNT Teknolojisi Kullanılarak Yapılan Rüzgar Türbini (Anonim 6)

1.2.5. Nanoteknoloji Biyoloji ve Tarım

Biyolojik sentezleme ve biyolojik işleme konularında yeni kimyasal maddelerin ve ecza malzemelerin üretiminde kullanılarak biyolojik yapı taşların, biyolojik malzemelerin ve aygıtların içine yerleştirilmesi ve bu teknolojilerin geliştirilerek yeni teknolojilerin ortaya çıkmasına vesile olabilecek çok fazla çalışma alanı bulunmaktadır.



Şekil 1.8. Tarım Alanında Kullanılan Nanojel Görseli (Anonim 7)

1.2.6. Nanoteknoloji ve Savunma Sanayi

Dünya üzerinde en çok paranın ve zamanın harcandığı sanayilerden biri olan savunma sanayisinin nanoteknolojiye uyum sağlamaması düşünülemez. Birçok alanda kullanılabileceği gibi nano teknolojiden faydalanılarak kimyasal, biyolojik, nükleer silah tehditlerine karşı erken uyarı sistemleri oluşturularak bu tehditlerden korunmak mümkün hale geleceği düşünülmektedir.

Ayrıca giyilebilir nano zırhlar ve yelekler kullanılarak askeri alandaki zayıt azaltılabilir. Biyrobotlar, nanorobotlar ve benzeri araçlar kullanılarak yine askeri strateji ve istihbarat alanda büyük ilerlemeler kaydedilebilir.



Şekil 1.9. Nano Robot Görseli (Anonim 8)

1.2.7. Nanoteknoloji Bilim ve Eğitim

Nanoteknolojinin ortaya atılması doğası gereği bilimin daima ilerleme isteğinin bir getirisiidir. Bu sebeple nanoteknolojinin bilimin her alanına nüfuz etmesi gayet olasıdır. Nanoteknoloji bugün bilim insanları tarafından kimya, biyoloji, fizik, bilgisayar teknolojileri, uzay teknolojileri, savunma teknolojileri gibi daha birçok alanda ve bilim dalında çalışılmaya ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Eğitim ve bilim et ve tırnak gibi birbirinden ayrılmaz bir ikili olup eğitim özellikle ilerleyen dönemde sanal gerçeklik alanındaki ilerlemeler ile günümüzde hali hazırda verilen eğitime boyut atlatarak insanlık çok daha kısa sürede belki tecrübe ederek daha verimli ve hızlı bir şekilde eğitim alabileceği düşünülmektedir.



Şekil 1.10. Eğitim Alanında Nanoteknoloji Görseli (Anonim 9)

1.2.8. Nanoteknoloji ve Ulaştırma Sektörü

Nanoteknoloji konusunda her alanda kullanıldığı gibi ulaştırma alanında da kullanılmaktadır. Araçların yakıt sistemleri, içten yanmalı araçların yağ teknolojilerinde ve yine içten yanmalı araçların enjeksiyon sistemlerinde kullanılarak verimin yükseltilmesi konusunda gelişmeler sağlanabilir. Elektrikli araçların ise pil teknolojilerinde özellikle grafen ve borofen gibi yeni malzemelerinin kullanımı yine bu alandaki teknolojinin ilerlemesinde önemli katkıya sahip olabilir.

Araçların dış etkenlerden korunması ve daha hafif ve verimli araçların üretilmesinde yine nanoteknolojiden faydalanılabilir. Boya teknolojilerinde uzun süreden beri kullanılan nanoteknoloji günümüzde ilerleterek BMW gibi dev otomotiv firmaları

tarafından kullanılmaya bağlamıştır. Son dönemde BMW tarafından üretilen renk değiştiren araç ve darbelere karşı kendi kendini ısıyla tamir edebilen ön ızgaraya sahip BMW modeli bu konuya örnek gösterilebilir.



Şekil 1.11. Nanoteknoloji ile Renk Değiştiren Araç Görseli (Anonim 10)

1.2.9. Nanoteknoloji Kozmetik ve Malzemeler

Nanoteknoloji özellikle günümüzde ön plana çıkan sosyal medya ve sosyal medya ile gelişen yeni iş kollarıyla beraber insanlar dış görünüşe ve güzelliğe önem vermesiyle beraber kozmetik alanında çok büyük yatırımlar ve teknolojik gelişmeler olmaktadır. Nano teknolojinin kimya alanındaki gelişmeleri doğal olarak bu alanda kullanılmaya başlanmış ve çalışmalara devam edilmektedir. Özellikle cilt bakım ürünleri, saç bakım ürünleri, kremler, solüsyonlar, yaşlanma karşıtı ürünler gibi daha birçok üründe nanoteknolojiden faydalanılmaktadır.

Aynı zamanda kozmetik alanı insan vücudunu doğrudan ilgilendirdiği için insan vücudundaki etkileri zararlarının veya faydalarının araştırılması ve literatüre katkı sağlaması açısından önemlidir.

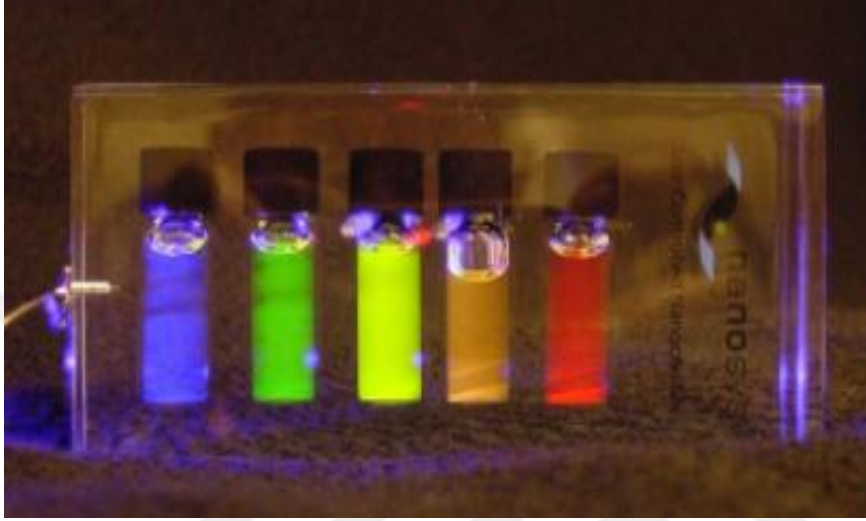
1.2.10. Nanoteknoloji İnşaat ve Mimari

İnşaat ve mimarlık sektörü alanında çok fazla iş kalemi olması dolayısı ile aslında nanoteknolojinin faydalanılması konusunda herhangi bir sınır yoktur. Fakat şu anda hali hazırda kullanılan veya kullanılması konusunda çalışmalar bulunan başlıca kalemlere örnek yalıtım ve malzeme teknolojileri cephe kaplama ve boya teknolojileri seramik veya cam cepheler başlıca örnek verilebilir.

Özellikle statik konuda taşıyıcı elemanların mukavemetlerinin geliştirilmesi konusu ve bu alanda yeni malzemelerin kullanılması konusunda sınır bulunmamaktadır.

Depreme ve ani yüklemelere dayanıklı yapıların yapılması daha geniş açıklıkların geçilmesi daha yüksek yapıların yapılması konusunda belki de yeni ufuklar açabilir.

Mimari alanda ise ince işçilik konusunda sınır olmayacağı gibi yapıdaki statik kesitlerdeki ölçüklerin üzerindeki değişkenliğin artması ile mimarların daha cesur ve farklı dizaynlar yaratmasına olanak sağlayabilir.



Şekil 1.12. Nanoteknoloji ile Üretilen Boya Teknolojisi Görseli (Anonim 11)

1.3. Nanomalzemeler

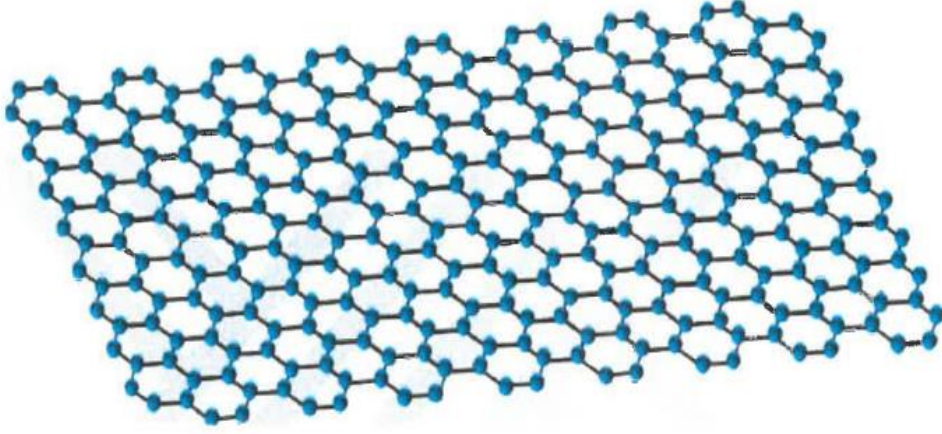
Tek boyutlu olan nanotüp, nanotel, nanoçubuk gibi yapılarının dışında iki boyutlu grafen, silisen borofen, altın nanoplak gibi malzemeler nanoteknoloji alanında sürekli kullanılmaktadır. Tez içeriğimiz nedeni ile bu malzemelerin özelliklerinden ve kullanım alanlarından aşağıda kısaca verilmektedir.

1.3.1. Grafen

Nanoteknoloji üzerinde yapılan çalışmalar sırasında karbon atomlarının “bal peteği” örtüsü formunun bir araya getirilmesi çalışmaları ile 2004 yılında grafen isimli malzeme üretilmiştir.

Grafenin üretimi daha sonrasında ABD şirketleri tarafından endüstrileştirilmiştir. Şu anda ise dünyanın birçok noktasında üretilmeye başlamıştır. Kullanım alanının bolluğu ve özellikleri nedeniyle grafen üretimi her geçen yıl artmaktadır.

Grafenin başlıca özelliklerinden bazıları fiziksel mukavemetinin çok yüksek olması, çok hafif ve dayanıklı olması, çok iyi bir ısı ve elektrik iletkeni olması, enerjinin depolanması ve saklanması konusunda çok iyi bir malzeme olması özelliklerinden bazılarıdır.



Şekil 1.13. Grafen Dizilim Örneği (Numanoğlu ve Civalek 2019)

Grafen saydığımız bu özellikleri nedeniyle birçok alanda popüler bir malzeme olmuştur. Bunlardan bazıları uzay ve uçak sektörü alanıdır. Bu alanda kullanılmasının en büyük nedeni hafifliği ve bu hafifliğe rağmen aşırı mukavemetli olmasıdır.

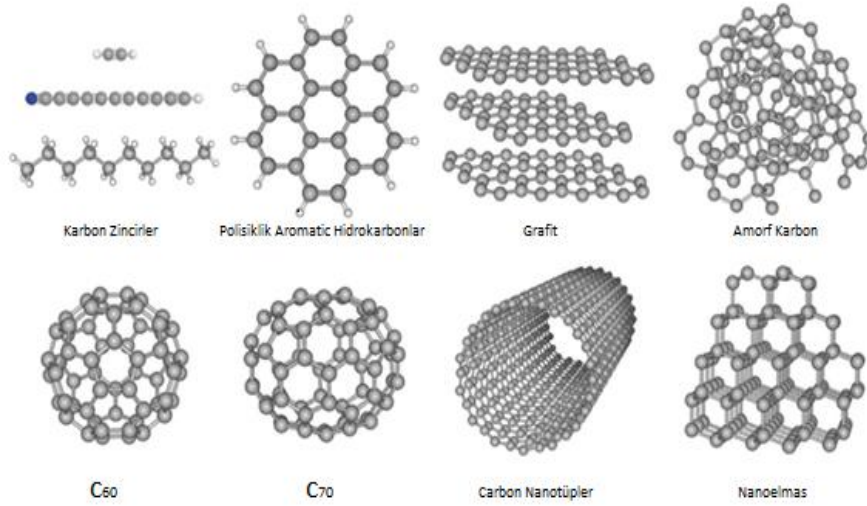
Ayrıca grafen suyun filtrelenmesi, sensör teknolojileri, giyilebilir savunma aletleri, batarya teknolojileri, kompozit malzeme teknolojileri ve daha birçok teknolojik alanda kullanılmaya başlanmış olup kullanım alanı sürekli genişlemektedir.

1.3.2. Karbon Nanotüp

Karbon atomu 4A grubu ve 2. periyodundaki bulunan bir ametal elementidir. Elektron sayısı altıdır. Karbon elementinin kendi atomları birbiri ile üç farklı geometri gösteren şekillerde hibritleşirler (bağlanırlar) ve bu özelliği gösteren tek elementtir. Hibritleşme türü karbon atomlarından oluşan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkiler.

Karbon nanotüpler, grafenin bükülmesiyle elde edilen silindirik moleküllerdir. Tek dizilim veya çift katmanlı olabilirler. Bu tüplerin boyutları birkaç mikrometreye olabilir. (Aqel, Abou El-Nour et al. 2012).

Yapıtaşları grafen gibi olan karbon nanotüpler hibritleşmiş kimyasal bağlarla bağlıdır. Bu özellikleri sayesinde yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe ve ayrıca yüksek mukavemetli ve düşük ağırlıklıdır.



Şekil 1.14. Karbon Element Dizilimleri ve İsimleri

1991 yılında Iijima tarafından keşfedilen karbon nanotüpler geniş bir uygulama alanına sahip olup, biyosensör, aktüatörler, uzay-uçak teknolojileri, çelik yelekler gibi birçok endüstride kendine yer bulmuştur.

1.3.3. Borofen

İlk olarak 1990 yıllarının ortalarında sadece bir teori olarak öne sürülen borofen, 2015 yılına gelindiğinde farklı borofen yapıları deneysel olarak doğrulanmıştır.

Borofen, bor madeninin, tek sıra tabaka halidir. Yani borun iki boyutlu bir allotroptur ayrıca bor tabakası olarak bilinir. Kristal yapıya sahip olan borofen, grafen maddesinden daha güçlü ve daha esnek ve aynı zamanda ısı ve elektriği daha iyi ileten bir materyaldir. Borofen aynı zamanda çok reaktif ve çok hafiftir, aynı zamanda yüksek mukavemetli, klasik kovalent bağları dışında metalik benzeri çok merkezli bağları olan kristal yapıdadır ve pil teknolojilerinde çok iyi bir anot malzeme olarak düşünülmektedir.



Şekil 1.15. Borofen Görseli (Anonim 12)

Sonuç olarak borofen pek çok alanda kullanılabilen ve üstün malzeme özelliklerine sahip bir malzemedir.

1.4. Nikel Elementinin Genel Özellikleri

Nikel elementi yeryüzünde nadir olarak bulunan bir elementtir. Teknolojinin ilerlemesiyle beraber çok fazla kullanım alanı oluşmuştur. Günümüzün en önemli malzemesi olan paslanmaz çeliğin imalatında ana alışı elementidir. Nikel ile beraber krom çeliğin paslanmazlık özelliğini sağlar.

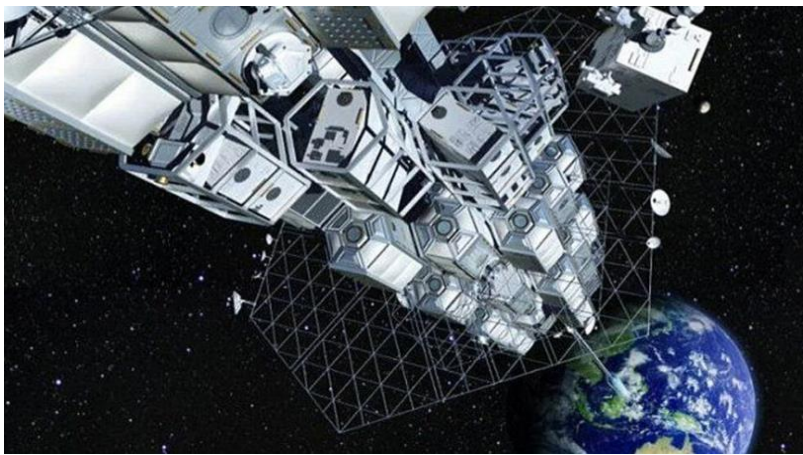
Oksijene dayanıklı olmasından dolayı saf nikel çelik üretiminde kullanıldığında da çelik paslanmaya karşı dayanım kazanmış olur. Ayrıca nikelin paslanmaz çelik dışında en fazla kullanım alanı kaplama uygulamalarıdır.

İnşaat sektöründe is nikel elementi incelediğinde sert bir metal olduğu görülmektedir. Erime sıcaklığı 1455 °C Elastisite modülü 207 Gpa dır. Boyut ölçek parametresi ise (Lei vd. 2016)'a ait $l= 1.553\mu\text{m}$ dir.

1.5. Uzay Asansörü

Uzay asansörü ilk kez Rus bilim insanı Konstantin Tsikovsky tarafından dile getirilmiştir. Sonrasında bir bilimkurgu yazarı olan Artur C. Clarke kitabında uzay asansörü ele alınca bu kitap sayesinde uzay asansörü fikri yayılmıştır.

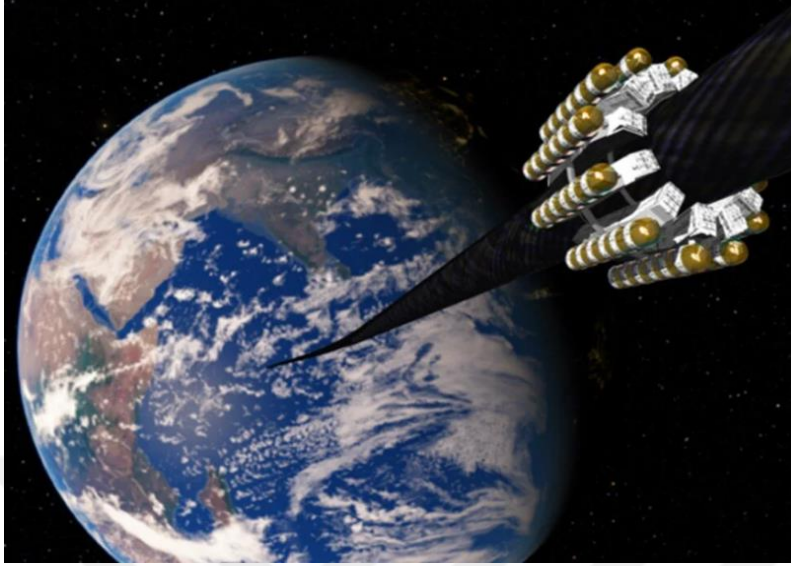
Peki, uzay asansörü nedir ve hangi mantıkla çalışmaktadır sorusu günümüzde pek çok kişi tarafından merak edilmektedir. Aslında uzay asansörü görselliği insanlar tarafından gerek filmlerden ve bilim kurgu kitaplarından aşına olursa da çalışma mantığının ne olduğu bilinmemektedir.



Şekil 1.16. Anonim Uzay Asansörü Görseli (Anonim 13)

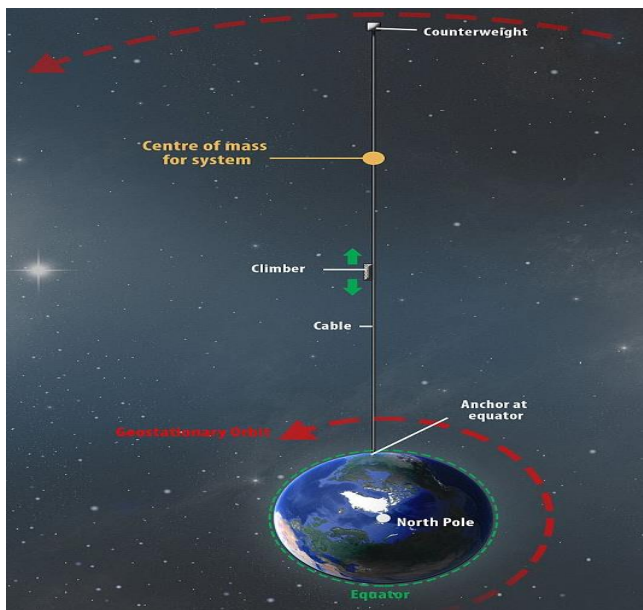
Çalışma mantığı prensipte şu şekildedir, dünyada ekvator üzerine sabitlenmiş bir kablunun uzaya doğru uzatılarak kablunun dünya tarafından yerçekimine maruz kalacak kısmına eşit olacak şekilde dünyanın dönmesinden kaynaklı merkez kaç kuvvetinin

birbirine eşit olması ve kablunun gergin bir şekilde bu iki zıt kuvvetin dengesinde durmasıdır.



Şekil 1.17. Anonim Uzay Asansörü Görseli (Anonim 14)

Tabi ki düşünüldüğü zaman insana imkansız ve hayalî gelmesinin yanında bu basit iki kuvvetin dengesi üzerine kurulan bu fikir altında çok büyük bir teknolojiyi barındırmak zorunda. Çünkü bahsettiğimiz bu iki devasa kuvvete dayanabilecek bir malzeme ne yazık ki dünya üzerinde bulunmuyor tabi ki bu halat malzemesine günümüzde tavsiyeler var fakat halat malzemesinin bulunması belki de bu tarz bir teknolojinin en basit kısmının oluşturmaktadır. Halatın yanında böyle bir yapının uzaya inşası zaten başlı başına insan hayal gücünü delip geçen devasa soruları beraberinde getirmektedir.



Şekil 1.18. Uzay Asansörü Çalışma Mantığı Görseli (Anonim 15)

Ayrıca urgan malzemesi olarak kullanılabilen grafen, diamond nanothread veya günümüz teknolojisine sahip herhangi bir materyal böyle bir gerilmeyi kaldıramayacağından şimdilik bu projenin hayalden ileri gitmesi mümkün görünmemektedir.

1.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Mühendislik alanında var olan fiziksel problemlerin, türetilen uygun sınır koşullarıyla birlikte diferansiyel hareket denklemleri yardımıyla çözümlenerek elde edilebilir. Birçok pratik durumda, geometrik veya malzeme özellikleri değişiklik gösterir veya sınırların şekli bilinen fonksiyonlar ile edilebilir. Ayrıca pratik yapılar kirişler, plakalar, levhalar ve katılar gibi farklı tipteki birleşenlerin bir araya getirilmesinden oluşur. Bu durumlarda sınır koşullarını sağlayan hareket denklemleri için analitik çözümler elde etme imkanı bulunmamaktadır.

Çeşitli sebeplerle analitik yöntemlerin çözümde yetersiz kaldığı durumlarda sayısal yöntemler kullanılarak çözüme ulaşılabilmektedir. Analitik yöntemler problemin kesin sonucunu sunarken sonlu elemanlar yöntemi yaklaşık (yakınsak) veriler sağlamaktadır. Sayısal yöntemin doğruluğu, bu yakınsaklığın oldukça yüksek hassasiyete sahip olması ile alakalıdır. Yüksek bir yakınsaklık metodolojinin doğruluğu hakkında güven verir. Sonuç olarak problemin çözümü için bir alternatif elde edilebilmekte ve böylece mühendisliğin işlevi olan tasarıma giden süreçteki sorunlar da azaltılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak. Titreşim ve dönme üzerine çalışmışlardır (Semnani 2016).

1.7. Bernoulli-Euler Teorisi

Birçok kiriş teorisi geliştirilmiş olup, bunlardan en basit ve kullanışlı olanı Euler-Bernoulli kiriş teorisi olarak bilinen orijinal bilinen Euler ve Bernoulli tarafından ilk olarak 1750 yılında ortaya atılmıştır. Fakat kiriş teorilerinde kullanılabilecek ve bu alandaki gelişimi 19. Yüzyılda Eiffel kulesi ve Ferris dönme dolabı yapılarının yapıldığı dönemde ön plana çıkmıştır.

18. yüzyılın en büyük matematikçilerden Leonhard Euler, Johann Bernoulli' den matematik eğimi almıştır. İlk makalesini 19 yaşında yayımlanmış ve 20 yaşında gemi direklerinin dengeli düzenlenmesine ilişkin bir çalışma yapmıştır ve bu çalışmasıyla Paris Bilimler Akademisinde derece almıştır.

Euler-Bernoulli kiriş teorisi, izotropik bir kirişin elastikliğini basitleştirilmiş bir ifadesidir. Bu teori ile kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve çökme değerleri hesaplanır.

2. KAYNAK TARAMASI

Tez çalışmamız kapsamında elastik zemin üzerinde yapacağımız ve bu sırada analitik metot olarak kullanacağımız Bernoulli-Euler Kiriş Teorisi ve Rayleigh-Ritz Yöntemi kullanarak mikro kirişler üzerinde eğilme analizler yapılmıştır. Tabii ki tezimiz kapsamında kullanılan metotlar ve bazı yöntemler ve daha önce elastik zemin üzerinde yapılmış diğer çalışmalar ve mikro-nano elemanlar üzerinde yapılmış çalışmalardan bazıları tarafımızca incelenmiştir.

Elastisite teorisinin gelişmesinde önemli katkıları bulunan bilim insanları ve matematikçiler oldukça fazla sayıdadır. Fakat başlıca saymak gerekirse Bernoulliler, Lord Kelvin, Betti, Kirchhoff, Lord Rayleigh, Timoshenko ve daha birçok bilim insanı örnek olarak gösterilebilir.

1950 yıllarından sonra yaklaşık 30 sene içerisinde mühendislik alanının özel problemlerine analitik çözümler büyük ölçüde üretilmiş ve kullanılmıştır. Günümüzde ise Elastisite teorisi inşaat mühendisliğinde birçok elemanın analizinde kullanılmaktadır.

Akgöz ve Civalek (2013a) değiştirilmiş şekil değiştirmesi teorisiyle yüksek mertebeden kiriş teorisi (YMKT) ile statik ve mikro kirişin serbest titreşimi üzerine çalışmışlardır. Hamilton prensibiyle basit mesnetli kirişin sınır şartları elde edilmiş. Yükleme koşulları değiştirilerek tekil yükleme ve yayılı yükleme olarak analizi için Navier yaklaşımı kullanılmış.

Abu-Salih ve Elata (2004), elastik yatak üzerine yerleştirilmiş ön gerilmeli mikro kiriş analiz etmişlerdir. Elastik yatağın sistemin ön burkulma davranışı üzerine etkisini tartışmışlardır. Hu vd. (2004), elektrostatik olarak aktivite olan ankastre bağlı mikro kirişin rezonanslarını incelenmişlerdir. Rhoads vd. (2006) elektrostatik olarak aktive olan mikro kirişlerin doğrusal olmayan titreşimlerini teorik olarak incelemişlerdir. Mikro kirişe parametrik zorlama uygulanarak frekans tepki grafikleri elde edilmiştir.

Younis vd. (2003), analitik bir yaklaşım ile elektriksel yük ile aktivite olan mikro kirişin dinamik davranışını incelemişlerdir. Çalışmaların sonucunda içe çekme (pull-in) voltajının eğer düğüm bifurkasyonunda karşılık geldiğini tespit etmişlerdir.

Quiu vd. (2004), MEMS mekanizmasının gelişmesinde önemli rol oynayan çift karar durum mekanizmasını incelemişlerdir. Eğri mikro kirişin titreşim analizi ve sonlu elemanlar analiz edilerek çift kararlı davranışın etkileri sunmuşlardır.

Casals-Terre ve Shkel (2005), çalışmalarında mikro kirişlerin kararlı buldukları durumlardan diğer kararlı duruma geçebilmesi için mekanik rezonanstan faydalanılması ile ilgili teorik ve deneysel bir çalışma yapmışlardır.

Ebrahimi ve Salari (2015), Eringen elastik teorisinden faydalanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş mikro kirişlerin Bernoulli-Euler kiriş teorisi kullanılarak serbest titreşim üzerine çalışmalar yapmışlardır. Sınır şartlarının türetilmesi için Hamilton

ilkesinden faydalanılmış bu sınır koşullarıyla mikro kirişin denklemini çözmek için Navier çözümünü kullanmışlardır. Malzeme özelliklerinin değişimini düzgün bir şekilde elde etmek için Mori-Tanaka Homojenizasyon kuralı kullanılmıştır. Birçok parametre değiştirilmiş (yerel olmayan parametreler, kalınlık uzunluk oranı, mod sayısı ve diğerleri) her açıdan inceleme yapılmış ve sunulmuşlardır.

Akgöz ve Civalek (2012), DŞDD teorisine dayandırılarak mikro kirişlerin eğilme analizleri etkili bir şekilde incelemiştir. Sınır şartları ve yönetici denklemleri varyasyonel ilke kullanılarak türetilmiştir. Modellemeler yapılırken Bernoulli-Euler kiriş teorisi kullanılmıştır ve ayrıca Poisson etkisi göz önüne alınmıştır. Sınır şartlarına bağlı olarak dört farklı durumdaki eğilme ve dönme problemleri analitik olarak çözümlenmiştir. Poisson etkisinin Bernoulli-Euler kirişi için farklı karakteristik etkileri olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Papargyri-Beskou ve Tsepoura (2003), basit şekil değiştirme değişimi elastisite teorisine göre Bernoulli-Euler kiriş modeline göre eğilme ve burkulma analizleri üzerinde çalışma yapmışlardır. Yönetici denklemler ve sınır koşullarının belirlenmesinde varyasyonel bağıntı ve temel denklemlerden faydalanmışlardır. Bir ucu ankastre mesnetli diğer ucu serbest kirişin eğilme davranışını ve her iki ucu basit mesnetli kirişin burkulma davranışını incelemiştir. İlave değişim katsayılarını artırdıkça kirişin deplasman değerlerinin düşüş gösterdiğini fakat bu değer artmasıyla kritik burkulma yükü değerinin artış gösterdiği sonucuna varmışlardır.

Yang vd. (2002), çalışmalarında mikro ölçekteki yapıların deformasyon davranışının boyuta bağlı olduğunu göstermişlerdir. Silindirik bir çubuğun ve sonsuz genişlikte düz bir levhanın burkulması değiştirilmiş gerilme çifti teorisi ile analiz etmişlerdir. Gerilme çifti teorisini geliştirmişlerdir. Üzerinde çalışılan yapı bir tane boyut ölçek parametresi içerir. Bu nedenden dolayı kullanışlı bir yapıya sahiptir.

Reddy (2011), Bernoulli-Euler ile Timoshenko kiriş teorilerine ve DGÇ teorisine dayalı olarak homojen olmayan mikro kirişin mekanik davranışını incelemiştir.

Zhang vd. (2007), elektro statik kuvvet ile yüklenen yay şeklindeki mikro kirişlerin kararlı durumdan, birdenbire diğer kararlı duruma geçmesi durumunu teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada statik analiz yapılmıştır ve yay konfigürasyonunun sistemin kararsızlığı üzerine etkilerinin olduğunu göstermişlerdir.

Eltaher ve Emam (2012), Eringen elastik teorisini kullanmışlardır. Fonksiyonel derecelendirilmiş nano kirişlerin Bernoulli-Euler teorisi kullanılarak serbest titreşim analizi incelenmiştir. Bu fonksiyonel derecelendirilmiş nano kirişin malzeme özellikleri kalınlık boyumca düzgün bir şekilde değişir. Hamilton prensibi kullanılarak sınır koşulları belirlenmiş ve denklemin çözümü için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

Şimşek ve Reddy (2013a, b), DGÇ teorisi kullanılarak fonksiyonel değişimli malzemeden yapılmış mikro kirişlerin burkulma, eğilme ve serbest titreşim analizini gerçekleştirmişlerdir. Modellemede ise farklı kiriş teorilerinde faydalanmışlardır.

Eringen (1983) tarafından önerilmiş olan lokal olmayan elastisite teorisi, mikro ve nano boyuttaki yapıların analizinde çokça kullanılmaktadır. Bu teoride elemanda bir x noktasının gerilme halinin, sadece frekans alınan noktada şekil değiştirme olmadığı eleman üzerindeki tüm noktalarda şekil değişikliğinin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Mikro parçaların dayanımı, eğilme ve burulma değerlerini bulabilmek amacıyla yüksek mertebeden süreklilik teorileri kullanılmışlardır (Gao vd. 1999; Cheg ve Wang 2000; Huang vd. 2000; Fleck ve Hutchinson 2001; Niordson ve Hutchinson 2003; Wang vd. 2003; Gudmundson 2004; Lou vd. 2006).

Mikro bükme deneylerinde bulunan epoksi polimerik kirişlerin normalleştirilmiş bükülme rijitlik değeri konsol kirişin kalınlığına bağlı olduğu gözlemlenmiştir (Lam vd. 2003).

Polipropelin mikro kirişlerin eğilme sertliğinin klasik boyuttaki testlerin eğilme değerlerinden yüksek olduğunu göstermişlerdir (McFarland ve Colton 2005).

Cu ve Ti elementleri kullanılarak elementleri kullanılarak yapılan konsol kiriş deneylerinde kalınlığının azalması doğal frekansı arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu deneylerden sonra MEMS mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve klasik sonuçların mikro parçalar için geçerli olmadığı görmüşlerdir (Li vd. 2018).

Şu anda bu alanda kullanılan yüksek mertebeden süreklilik teorilerine örnek olarak değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi teorisi (Lam vd. 2003), klasik gerilme çifti teorisi, yerel olmayan elastisite teorisi (Mindlin ve Tiersten 1962, Toupin 1962, Mindlin 1964), Yerel olmayan elastisite teorisi (Eringen 1972; Eringen 1992), yerel olmayan şekil değiştirme değişimi teorisi (Lim vd. 2015; Ma vd. 2018) ve geliştirilmiş gerilme çifti teorisini incelemişlerdir (Yang vd. 2002).

Ma vd. (2008), Timoshenko mikro kirişleriyle eğilme, eksenel deformasyonlarda Poisson efektini göz önüne almışlardır. Timoshenko çubuklarının şekil değiştirmesinin kirişin kalınlığına oranını incelemişlerdir. Poisson oranının büyümesi mikro kirişlerin deplasman değerini klasik boyuttakilere yaklaştığı gözlemlenmiştir.

Asghari vd. (2011), fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapılmış Timoshenko mikro kirişlerin eğilme ve serbest titreşim davranışlarını DGÇ teorisine dayalı olarak incelemişlerdir.

Kahrobaiyan vd. (2014) ve Dehrouyeh vd. (2014), Timoshenko mikro kirişleri ile farklı darbe terimlerine dayalı deneyler yapmışlardır.

Çentikli mikro kirişlerin mekanik özellikler ile ilgili çalışmışlardır (Sherafatnia vd. 2014), Timoshenko kirişlerinin orta bölgesindeki gerilmeler üzerine çalışılmışlardır (Asghari vd. 2010), mekanik ve termal kuvvetler altında kusurlu Timoshenko mikro kirişlerin davranışları incelenmiştir (Farokhi ve Chayesh 2015), Timoshenko kirişlerinde yüzey etkisi incelenmiştir (Gao 2014). Fourier olmayan ısı iletimiyle incelemişlerdir (Taati vd. 2014).

Poisson etkisiyle eğilme ve eksenel deformasyon incelemişlerdir (Liu ve Reddy 2011), Lamine kompozit kirişleri incelemişlerdir (Roque vd. 2013).

Timoshenko ana çözüm yöntemleri ve statik eğilme modellerini analitik/ Fourier serisi açılımı üzerine çalışmışlardır (Gao 2014; Taati vd. 2014; Liu ve Reddy 2011). Timoshenko mikro kirişler için farklı titreşim modelleri üzerine çalışmışlardır (Dehrouyeh vd. 2016; İlkhani ve Hosseini 2016; Arani vd. 2015). Timoshenko mikro kirişlerde sıvı aktarımı ve ısı değişimleri üzerinde çalışmışlardır (Xia ve Wang 2010; Ke ve Wang 2011; Ke vd. 2011). Boylamsal yer değiştirme ve dönme üzerine çalışmışlardır (Ghayesh vd. 2013). Eksenel hareket eden Timoshenko kirişleriyle çalışmışlardır (Dehrouyeh vd. 2015). Harmonik eksenel yüklü Timoshenko kirişleri üzerinde çalışmışlardır (Farokhi ve Ghayesh 2017). Eksenel manyetik alanda kompozit eğimli Timoshenko kirişleri ile çalışmışlardır (Allahkarami ve Nikkhah 2018).

Kong (2022), kavisli mikro kirişlerin analizi için hesaplama konusunda yapılan çalışmada. Kesin olarak, değiştirilmiş çift gerilim teorisi ve Euler-Bernoulli kiriş modeli kullanılarak statik analiz için bir formülasyon geliştirmişlerdir. İnce, üç boyutlu sürekli bir cismin geometrik ve kinematik tanımları sürekli olarak kiriş eksenine indirgenir. Gerilim ölçülerinin hassas bir şekilde belirlenmesi amacıyla sistematik bir çerçevede sunulmuştur. Daha sonrasında yönetici denklemleri ve sınır koşullarını türetmek için kullanılmıştır. İzogeometrik yaklaşım ile sayısal uygulamaya yönelik bazı açıklamalar yapılmıştır. Ek olarak, değiştirilmiş çift gerilme teorisinin iki boyutlu problemlere izogeometrik yaklaşım da uygulanmış ve türetmenin doğrulanmasını kolaylaştırmak için uygulama detaylandırılmıştır. Kavisli mikro kirişlerin boyuta bağlı davranışını araştırmak için iki kapsamlı örnek kullanılır. Türetilmiş kiriş formülasyonunun doğruluğunu ve Euler-Bernoulli kiriş modelinin kinematik varsayımlarının geçerliliğini incelemek için birkaç titiz test tasarlanmıştır. Son olarak, önerilen kiriş formülasyonu için izogeometrik uygulamanın sağlamlığı ve etkinliği doğrulanmıştır.

Vo vd. (2022), kavisli mikro kirişlerin analizinde değiştirilmiş çift gerilme teorisinin uygulanması üzerinde çalışmışlardır. Timoshenko kiriş teorisinin kinematik varsayımlarını kullanarak kartezyen koordinat sistemi oluşturmuşlardır. Kiriş ekseninin yer değiştirmeleri ve yerel koordinat sistemindeki enine kesitsel dönüşler, kinematik tanımlamalarda bilinmeyenler olarak ele alınmış ve hareket denklemlerini türetmek için kullanılır. Deformasyon ölçüleri, kurucu ilişkiler, enine kesit gerilimi bileşkeleri, hareket denklemleri ve sınır koşulları dahil olmak üzere, kinematik bilinmeyenler cinsinden açıkça ifade etmişlerdir. Yerleşik genel formülasyon, literatürde bulunamayan düzlemsel

kavisli mikro kirişler durumuna göre uzmanlaştırılmışlardır. Türetilmiş hareket denklemlerinin doğruluğu, düzlemsel dairesel ve düz mikro kirişlerin mevcut çalışmaları ile karşılaştırılarak test etmişlerdir. Bu, kavisli mikro kirişlerin ayarında değiştirilmiş çift gerilme teorisinin kullanımına yönelik ilk çalışma olduğundan, mevcut çalışmanın çıktıları bu yapıları anlamak için daha derinlemesine analizler sağlamışlardır.

Al-Shewailiah ve Al-Shujairi (2022), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş üç mikro kiriş modelinin sapma davranışını incelemeye odaklanmışlardır: malzeme, gözenekli malzeme ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş tek duvarlı karbon nanotüp takviyeli kompozit mikro kiriş. Klasik olmayan kiriş modelinin mikro boyut etkilerini hesaplamak için, değiştirilmiş çift gerilim teorisi sadece uzunluk malzeme ölçeği parametrelerini kullanılmıştır. Statik sapma denkleminin sayısal çözümü, incelenen özellikler arasında uzunluk, malzeme parametre oranı, malzemenin hacim oranı, gözeneklilik ve karbon nanotüp tipleri, sınır koşulları ve en boy oranı (uzunluk/kalınlık) kullanmışlardır. Mikro kirişlerin statik davranışının çözümünde modifiye çift gerilim teorisinin, klasik kirişlerden daha doğru sonuçlar verdiğini gösterilmişlerdir.

Tang vd. (2022), boyuta bağlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme ince levha burkulması ve burkulma sonrası problemler, Modifiye Çift Gerilme Teorisi çerçevesi kullanılarak ele alınmıştır. Değiştirilmiş çift gerilme teorisi ve güç yasasına dayalı olarak, basit bir şekilde desteklenen fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme ince levhanın burkulma sonrası sapsması ve kritik burkulma yükü, Hamilton'un minimum potansiyel enerji ilkesi kullanılarak çözülmüştür. Analiz, doğrusal burkulma ve doğrusal olmayan burkulmanın simülasyon sonuçlarını karşılaştırır. Yenilikçi bir şekilde, ölçek etkilerine sahip bir kuvvet yasası dağılımı ele alınmıştır. Levhaların burkulma yer değiştirmesi, yükü ve şekil değiştirme enerjisi üzerindeki ölçek etkisi parametreleri ve kuvvet kanunu indeksi parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Bu makalede, kritik burkulma yer değiştirmesi, kritik burkulma yükü ve burkulma gerinim enerjisinin, kuvvet kanunu indeksi parametrelerindeki artışlarla arttığı bulunmuştur. Ölçek etkisi parametresi arttıkça kritik burkulma yükü enerjisi ve burkulma gerinim enerjisi arttığını gözlemlemişlerdir.

Priyanka ve Pitchaimani (2022), değiştirilmiş çift gerilim teorisi kullanılarak, keyfi sınır koşulları ve yerleştirmelerle değişen eksenel yüklere maruz kalan mikro lamine kompozit kirişlerin burkulma ve serbest titreşim davranışlarını araştırılmıştır. Boyut etkisi, malzeme uzunluk ölçeği parametreleri dikkate alınarak çalışılmıştır. Eksenel yönde, uygulanan yük sabit, doğrusal veya parabolik varyasyonlara ile çalışılmıştır. Denge denklemleri sırasıyla Hamilton ilkesi ve Ritz yöntemi kullanılarak türetilip çözümlenmiştir. Boyut etkisinin, kiriş kalınlığı malzeme uzunluğu ölçek parametresine benzer olduğunda daha belirgin olduğu ve kiriş kalınlığı arttıkça neredeyse yok olduğu görülmektedir. Boyut etkisi değişimi, farklı sınır koşulları için farklı alınmış ve parabolik olarak artan yükleme durumu için uygulanan yük yoğunluğunun artmasıyla temel frekansın azalma oranı diğer yüklemelere göre daha fazla tespit etmişlerdir

Ke ve Wang (2011), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerden yapılan mikro kirişlerin dinamik kararlılığı, değiştirilmiş çift gerilme teorisi ve Timoshenko kiriş teorisine dayalı olarak incelenmiştir. Bu klasik olmayan Timoshenko kiriş modeli, bir malzeme uzunluk ölçeği parametresi içerir ve boyut etkisini yorumlamışlardır. Mikro kirişlerin malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde değiştirilmiş homojenleştirme tekniği ile yaklaşımlar yapılmıştır. Yüksek mertebeden yönetici denklemlerinin ve sınır koşullarının, Hamilton prensibi kullanılarak üretilmiştir. Sonuç olarak dinamik kararlılık özellikleri üzerindeki boyut etkisinin, yalnızca kirişin kalınlığı malzeme uzunluğu ölçek parametresinin önemli olduğunu gösterilmiştir.

Akbaş ve Dynamics (2017), fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedan oluşan kenarları çatlamış konsol mikro ölçekli kirişlerin serbest titreşim analizi, değiştirilmiş çift gerilme teorisine dayalı olarak incelemiştir. Kirişin malzeme özelliklerinin üstel dağılıma göre yükseklik yönünde değiştiği varsayılmıştır. Çatlak kiriş, kütsüz elastik döner yay ile birbirine bağlanan iki alt kirişten oluşan klasik kırık kiriş teorisinin bir modifikasyonu olarak modellenmiştir. Ek bir malzeme parametresinin dahil edilmesi, yeni kiriş modelinin boyut etkisini yakalamasını sağlar. Yeni klasik olmayan kiriş modeli, uzunluk ölçeği parametresi sıfır olduğunda klasik olana indirgenir. Ele alınan problem, sonlu elemanlar yöntemiyle Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak araştırılır. Hareket denklemleri sistemi Lagrange denklemlerinden türetmişlerdir. Mevcut formülasyonun ve sonuçların doğruluğunu doğrulamak için, elde edilen frekanslar, iyi bir uyumun gözlemlendiği literatürde mevcut olan sonuçlarla karşılaştırılmışlardır. Çatlak konumu, kiriş uzunluğu, uzunluk ölçeği parametresi, çatlak derinliği ve malzeme dağılımının kenarı çatlamış mikro kirişinin doğal frekansları üzerindeki etkisini araştırmak için sayısal sonuçlar elde etmişlerdir.

Arshid vd. (2021), farklı sayıda katman içerir ve geleneksel sandviç yapılara kıyasla daha yüksek mukavemet, ağırlık oranı değerleri gösterme özelliğine sahiptir. Mevcut çalışmada Lorentz manyetik yükü altında üç katmanlı kavisli bir mikro kirişin serbest titreşim ve mekanik burkulma tepkileri incelemiştir. Bir viskoelastik substrat düşünüldü ve termal ortamın mekanik özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirmişlerdir. Yüz levhaları, karbon nanotüp takviyeli kompozitlerdi ve yerleştirilmesinin yüzlerin davranışı üzerindeki etkisi değerlendirmişlerdir. Ayrıca genişletilmiş karışım kuralı kullanılarak, etkili özellikleri belirlendi. Mikro boyuttaki sonuçları tahmin etmek için değiştirilmiş çift stres teorisi kullanmışlardır. Yönetici denklemler, yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisi ve enerji yöntemine dayalı olarak türetilmiş ve Navier yöntemiyle matematiksel olarak çözülmüştür. Sonuçlar, çeşitli parametrelerin etkileri dikkate alınarak daha önce yayınlanmış çalışmalarla doğrulanmıştır. Sonuçlar bölümünde kapsamlı bir şekilde açıklandığı gibi, merkezi açılma açısı iyileştirilerek doğal frekanslar ve kritik burkulma yükleri azaltılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, bu tür akıllı yapıları kullanan çeşitli ekipmanların tasarımına ve imalatına yardımcı olarak yüksek sertlik/ağırlık oranlarını daha erişilebilir hale getirebilir sonucuna ulaşmışlardır.

Kumar ve Mukhopadhyay (2021), değiştirilmiş çift gerilim teorisi ve çift faz gecikmeli ısı iletim modelinin etkilerini göz önünde bulundurarak Timoshenko mikro kırıların titreşim analizine odaklanmaktadır. Mikro kırı hareket denklemleri ve karşılık gelen sınır koşulları için açık ifadeler, Hamilton prensibi ve ısı iletimi teorisi kullanılarak oluşturulmuştur. Basitçe mesnetlenmiş mikro kırı için sapma ve termal moment, birim uzunluk başına sabit bir itme kuvvetine tabi tutularak elde edilir. Modeli altında klasik teori ile arasındaki sonuçların karşılaştırılması özel olarak dikkate alınır. Elde edilen sonuçlar ayrıca Lord-Shulman ve Fourier ısı iletimi modelleri için var olan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, uzunluğun kalınlığa en-boy oranları ve malzeme uzunluk-ölçek parametresi-kalınlık gibi bazı parametrelerin mikro kırıların sapma ve termal moment üzerindeki etkileri ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Isı iletimi modeliyle ilişkili faz gecikmesi parametrelerinin sapma ve termal moment üzerindeki etkileri de tartışılmaktadır. Kısa bir zaman aralığı için, mevcut sonuçlar LS ve Fourier ısı iletimi modelleri altında karşılık gelen sonuçlarla iyi bir uyum göstermektedir. Ancak geniş bir zaman aralığı için mevcut sonuçlar, Lord-Shulman ve Fourier ısı iletimi modellerine kıyasla daha düşük bir enerji dağılımı oranı göstermektedir. Ek olarak, sapma ve termal momentin tepkisi üzerinde önemli bir rol oynayan DPL modeli altındaki mikro kırı boyut bağımlılığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, faz gecikmelerinin, mikro kırı sapması ve termal momentinin değişimi üzerinde önemli bir etkisi olduğu da ortaya koymuşlardır.

Ghayesh vd. (2013), mikro ölçekli bir kırı doğrusal olmayan rezonans dinamikleri sayısal olarak incelemişlerdir. Sistemin hareketini yöneten doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklem, Hamilton ilkesini kullanan, değiştirilmiş çift gerilme teorisine dayalı olarak türetilmiştir. Mevcut sayısal tekniklerin avantajlarından yararlanmak için, uygun fonksiyon ile birlikte Galerkin yöntemi, doğrusal olmayan kısmi diferansiyel hareket denklemini birleştirilmiş terimlerle bir dizi doğrusal olmayan diferansiyel denkleme ayırmak için kullanılır. Bu denklem seti, farklı türlerin belirlemenin yanı sıra hem kararlı hem de kararsız çözüm kollarını devam ettirebilen yalancı yay uzunluğu devam tekniği aracılığıyla sayısal olarak çözülür. Sistemin frekans-yanıt eğrileri oluşturulur. Ayrıca, farklı sistem parametrelerinin sistemin rezonans dinamik tepkisi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Akbarzadeh Khorshidi, (2021), çift katmanlı bir viskoelastik temele gömülmüş bir viskoelastik mikro kırı burkulma sonrası analizini incelemişlerdir. Bu viskoelastik mikro kırı, Kelvin-Voigt modeli ve değiştirilmiş çift gerilme teorisi kullanılarak modellenmişlerdir. Viskoelastik mikro kırı boyuta bağlı davranışını açıklamak için bir malzeme uzunluğu ölçeği parametresinden faydalanmışlardır. Bu çalışmada kullanılan visko-Pasternak temeli, viskoelastik bir ortam ve bir kayma tabakası içerir. Bu mikro kırı, kırı uçlarında zamanın bir fonksiyonu olarak değişebilen aksel bir sıkıştırma yüküne tabi tutulur. Euler-Bernoulli kırı teorisine ve von-Karman doğrusal olmama durumuna göre, zamana bağlı hareket denklemleri Hamilton prensibi ile türetilmiştir. Doğrusal olmayan hareket denklemleri, basit mesnetli sınır koşulu altında doğrudan çözülmüştür. Hem zamana bağlı sapma hem de viskoelastik burkulma yükü incelenmiştir. Son olarak, malzeme uzunluğu ölçeği parametresinin, visko-Pasternak temelinin

parametrelerinin ve malzeme viskozite katsayısının burkulma sonrası dinamik tepki üzerindeki etkileri incelemiştir.

Hassannejad vd. (2021), havacılık endüstrisindeki birçok mikro sensör ve mikro rezonatörün temel bileşenleridir, ancak literatürde önerilen modeller genellikle bir sınırlama olabilen dairesel kesite sahiptir. Dairesel olmayan kesit şekline sahip mikro yapıların burulma titreşimlerinde yer değiştirme alanları ve yönetici denklemler tamamen yapının kesit şekline bağlıdır ve bu da analiz prosedürünü daha karmaşık hale getirmiştir. çalışmada, mikro çubuğun geometrik parametrelerinin, özellikle enine kesit şeklinin, ortamın türünün ve manyetik alan gibi dış alanların varlığının mikro çubuğun burulma titreşim davranışındaki etkisini gösterilmiştir. Bu amaçla, Hamilton prensibi kullanılarak, bir manyetik alanın varlığında elastik ortam üzerine gömülmüş dairesel olmayan kesitli mikro çubuğun burulma titreşiminin yönetici denklemi türetilmiştir. Mikro çubuğun boyut bağımlılığının etkilerini göstermek için değiştirilmiş çift stres teorisi kullanılmıştır. Örneğin bir mikro çubuk için aynı alana sahip eliptik ve dikdörtgen kesitli şekiller seçilmiştir. Galerkin yöntemi ile mikro çubuğun doğal frekansı hesaplandıktan sonra, kesit şeklinin mikro çubuğun boyutsuz doğal frekansı üzerindeki etkisi, kesitin en boy oranındaki değişimler için incelenmiştir. Ek olarak, uzunluk ölçeği parametresinin, burulma ortamının sertliğinin ve manyetik alan geçirgenliğinin mikro çubuğun doğal frekansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mikro çubuğun doğal frekansının kesitin şekli ve en-boy oranından tamamen etkilendiğini göstermektedir. Bu sonuçlar mikro yapı tasarım aşamasında faydalı olabilir. Ayrıca elde edilen analitik sonuçlar ile yarı analitik diferansiyel dönüşüm yöntemi arasında bir karşılaştırma yapmışlardır.

Shanab vd. (2021), iki boyutlu fonksiyonel derecelendirilmiş konik mikro/nano kirişlerin statik eğilme, burkulma ve serbest titreşim davranışları modellenmiş ve analiz edilmiştir. İlk kez, klasik olmayan hareket denklemleri ve kirişin karşılık gelen sınır koşulları, Timoshenko kiriş teorisi ile bağlantılı olarak değiştirilmiş çift gerilme ve Gurtin-Murdoch yüzey elastikiyet teorileri çerçevesinde eş zamanlı olarak türetilmiştir. Burada, kirişin tüm malzeme özellikleri kuvvet yasasına göre kalınlık ve uzunluk yönleri boyunca derecelendirilmiştir. Kirişin hem kalınlığının hem de genişliğinin uzunluk yönü boyunca doğrusal olarak değiştiği kabul etmişlerdir. Mevcut Timoshenko kiriş modellerinden farklı olarak, mevcut formülasyon aksenal ve eğilme deformasyonlarını, Poisson etkisini ve fiziksel nötr düzlemin tam konumunu açıklar. Türetilen denklemlerin değişken katsayılarını tahmin etmek için diferansiyel kareleme yöntemi kullanılmıştır. Basitçe desteklenen Timoshenko nano kirişinin bükülme sapması, kritik burkulma yükü ve serbest titreşim frekansı, Navier'in yöntemi kullanılarak elde etmişlerdir. Farklı malzeme ve geometrik parametrelerin mikro/nano kirişlerin mekaniği üzerindeki etkilerini araştırmak için parametrik bir çalışma eşlik ediyor. mikro/nano kirişlerin statik ve dinamik tepkilerinin araştırılmasında bu parametrelerin çok önemli olduğu göstermişlerdir.

Sedighi vd. (2021), değiştirilmiş çift gerilme teorisi ile ilgili literatürde mevcut olan çok sayıda katkı göz önüne alındığında, nano-yapısal özelliklere sahip devamlılığın malzeme tepkisinin kesin olarak tanımlanmasındaki eksikliği araştırmışlardır. Değiştirilmiş çift gerilme teorisi çerçevesinde nano ölçekli kirişlerin eğilme mekaniği, tutarlı bir varyasyonel şema uygulanarak yeniden değerlendirilir. Modifiye çift gerilim kirişi ile ilişkili gerilim bileşke alanlarının, eğilme momentinin ve kesme kuvvetinin fiziksel olarak motive edilmiş kurucu yasaları tanıtılır. Yüksek mertebeden sınır koşullarının uygun matematiksel formuyla donatılmış iyi kurulmuş diferansiyel denge koşulları eski durumuna getirilmiştir. Nano-boyutlu kirişin kinematik alanlarının kesin analitik çözümleri, yöneten birleştirilmiş diferansiyel denklemlerin doğrudan çözülmesiyle elde edilir. Modifiye edilmiş çift gerilim kirişinin eğilme tepkisi, enine kayma deformasyonu ile birlikte simetrik dönme gradyanlarının etkilerinin incelendiği sayısal olarak gösterilmektedir. Karbon Nanotüplerin elastik modülünün kapalı biçimli analitik formülleri saptanır ve etraflıca tartışılır. Karbon nanotüplerin elastik modülünün titiz bir şekilde incelenmesiyle kanıtlandığı gibi, nano malzemelerdeki boyut etkilerini doğru bir şekilde yakalamada değiştirilmiş çift stres kiriş modelinin uygulanabilirliğine ilişkin ciddi şüpheler ortaya koymuşlardır.

Banerjee vd. (2023), mikro kirişlerin serbest titreşim problemini çözmek için yıllar boyunca sürekli ortam mekaniği çerçevesinde çeşitli modeller önerilmiştir. Bunların başında yerel olmayan elastikiyet, klasik çift gerilme, gradyan elastikliği ve değiştirilmiş çift gerilme teorilerine dayananlar gelmektedir. Bu modellerin çoğu, Bernoulli-Euler veya Timoshenko-Ehrenfest teorilerinin temel özelliklerini korur, ancak sorunun üstesinden gelmek için bir veya daha fazla malzeme ölçek uzunluğu parametresi sunmuşlardır. Bu yazıda açıklanan çalışma, Timoshenko-Ehrenfest teorisi ile bağlantılı olarak değiştirilmiş çift gerilme teorisinin uygulanması yoluyla dinamik sertlik yöntemine dayalı mikro kirişlerin serbest titreşim problemlerini ele alınmıştır. Değiştirilmiş çift gerilme teorisinin ana avantajı, diğer modellerden farklı olarak, yapının küçüklüğünü hesaba katmak için sadece bir malzeme uzunluk ölçeği parametresi kullanılmıştır. Mevcut araştırma, ilk olarak bir Timoshenko-Ehrenfest mikro kirişinin serbest titreşimdeki yönetici diferansiyel hareket denklemlerini kapalı analitik formda çözerek gerçekleştirmişlerdir. Kirişin dinamik rijitlik matrisi daha sonra, kuvvetlerin genlikleri ile kiriş uçlarındaki karşılık gelen yer değiştirmelerin genlikleri ilişkilendirilerek formüle edilir. Teori, Timoshenko-Ehrenfest mikro kirişlerinin serbest titreşim özelliklerini araştırmak için çözüm tekniği olarak Wittrick-Williams algoritması kullanılarak uygulanmıştır. Çeşitli örneklerin doğal frekansları ve mod şekilleri sunulmakta ve uzunluk ölçeği parametresinin Timoshenko-Ehrenfest mikro kirişlerinin serbest titreşim özellikleri üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

Dehrouyeh-Semnani ve Bahrami (2016), küçük ölçekli yapıların geometrisinin karmaşıklığı ve bu ölçekte boyut etkisi nedeniyle, boyuta bağlı sonlu elemanlar yöntemi, bu tür yapıların mekanik davranışını araştırmak için güçlü bir sayısal teknik olarak kullanılabilir. Son zamanlarda, değiştirilmiş çift gerilme teorisine dayalı olarak boyuta bağlı iki farklı Timoshenko kiriş elemanı önerilmiştir. İlk kiriş elemanı, her düğümde 3

serbestlik derecesi sahip iki düğümlü bir öğedir. İkinci kiriş elemanı da iki düğümlü bir elemandır, ancak her düğümde 2 serbestlik derecesi sahiptir. Önerilen kiriş elemanları üzerinde yeterli doğrulama ve yakınsama çalışması yapılmadığı için, bu çalışma bahsedilen kiriş elemanlarının statik eğilmedeki doğruluğunu, güvenilirliğini ve kararlılığını incelemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, dirsekli, basit mesnetli ve çift kenetlenmiş Timoshenko kirişleri vaka çalışmaları olarak seçilmiştir. 6 serbestlik derecesi kiriş elemanı ile elde edilen sonuçların, üç vaka çalışması için diğer çözümlerle elde edilen sonuçlarla mükemmel bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, boyut-bağımlılığın etkisi arttıkça yakınsama oranının arttığı bulunmuştur. 4 serbestlik derecesi kiriş elemanı kararlı çözümler sunsa da, elde edilen sonuçlar, 4 serbestlik derecesi kiriş elemanının üç durum çalışması için diğer çözümlere dayalı olarak elde edilen sonuçları doğrulamadığını ortaya koyulmuştur. Ayrıca, 4 serbestlik dereceli kiriş elemanı hatasının, boyuta bağlı kayma deformasyonuna göre artan bir eğilime sahip olduğu bulunmuştur. Son olarak, 4 serbestlik derecesi kiriş elemanının yanlış olmasının nedenini tartışmışlardır.

Hu vd. (2020), Fonksiyonel dereceli kavisli mikro kiriş yapıları üzerine çalışmalar literatürde oldukça nadirdir ve bu nedenle, bu tür mekanik davranış analizi için izogeometrik analiz ve değiştirilmiş çift gerilme teorisinin temel kombinasyonu hakkında etkili bir hesaplama yaklaşımı sunmuşlardır. Kavisli mikro kirişler, önerilen yöntem, kavisli mikro kirişlerin malzeme özellikleri ve geometrilerindeki eşzamanlı karmaşıklıklarla başa çıkılmıştır. Mikro kirişlerin malzeme özellikleri kalınlık yönü boyunca sürekli değişir. Düzgün olmayan rasyonel temel fonksiyonları, kavisli kirişlerin geometrilerini ve yer değiştirme yaklaşımını tam olarak tanımlamak için kullanılmıştır. Değiştirilmiş çift gerilme teorisi, küçük ölçekli etkileri yakalamak için benimsenmişlerdir. Geliştirilen yöntemin etkinliğini ve doğruluğunu göstermek için çeşitli statik eğilme ve serbest titreşim davranışları örnekleri sunmuşlardır. Bazı faktörlerin (örneğin, kirişlerin malzeme gradyanı, boyut etkisi, sınır koşulları, eğriliği ve en boy oranı) kavisli mikro kirişlerin mekanik davranışları üzerindeki etkileri araştırmışlardır.

Sobhy vd. (2020), değiştirilmiş çift gerilme teorisi, yeni bir kayma ve normal deformasyon kiriş teorisine dayanan visko-Pasternak elastik temeller üzerine döşenen viskoelastik nano kirişlerin bükülmesini araştırmak için kullanılır. Bu model, küçük ölçekli kirişler üzerindeki boyut etkisini yakalayan malzeme uzunluğu ölçek katsayısından oluşmuştur. Basit mesnetli kiriş, zamana uyumlu enine yüke maruz kalan visko-elastik malzemedan yapılmıştır. Nano kiriş, çift katlı temeller üzerine döşeniyor. İlk katman Kelvin-Voigt visko-elastik model olarak modellenmiştir ve ikincisi kayma katmanı olarak alınmıştır. Önerilen kiriş teorisine ve değiştirilmiş çift gerilme teorisi dayanarak, diferansiyel hareket denklemleri Hamilton prensibi kullanılarak çıkarılır. Elde edilen formülasyonların geçerliliğini kontrol etmek için, tahmin edilen sonuçlar açık literatürde mevcut olanlarla karşılaştırılır. Ek olarak, malzeme uzunluğu ölçek parametresi, uzunluk-derinlik oranı, visko-elastik sönümlenme yapısı, visko-elastik alt

tabakanın rijitlik ve sönümlenme katsayıları ve kayma ve normal şekil değiştirmeler gibi çeşitli parametrelerin sapma ve gerilmeler üzerindeki etkileri göstermişlerdir.

Thanh vd. (2019), kompozit laminat mikropolanın boyuta bağlı fenomenini simüle etmek için değiştirilmiş çift gerilme teorisinin kullanımı, genellikle basit sınır koşulları ve mekanik eğilme yükü ile sınırlanmıştır. Termal ortamda karmaşık sınır koşulları altında kompozit laminat mikropolaka üzerindeki bükülme ve burkulma üzerindeki küçük ölçekli etkiler literatürde tam olarak anlaşılmamıştır. Bu nedenle, bu araştırma, ilk kez, yeni bir değiştirilmiş çift gerilme teorisi ve izogeometrik analizin kombinasyonu yoluyla yukarıdaki sınırlamanın üstesinden gelmek için bir model geliştirmişlerdir. Yönetim denklemini kullanarak çözerek, çeşitli malzeme uzunluk ölçeği parametreleri için termal yer değiştirme, stres ve termal burkulma yükü elde edilir. Katman arayüzlerinde sürekli kayma gerilimi koşulunu sağlamak için, kalınlık üzerinden entegre düzlem içi gerilim türevleri olarak denge denklemleri uygulanmıştır. Ek olarak, düzgün olmayan rasyonel denge denklemini kullanarak şekil fonksiyonunun yüksek dereceli türevini karşılanmıştır. Ayrıca, çok katlı laminat mikropolanın termal bükülmesi ve termal burkulması üzerindeki boyut etkisinin yakalanmasında sunulan modelin etkinliğini göstermek için, fiber oryantasyonu, kalınlık oranı, sınır koşulu ve malzeme uzunluğu ölçek parametresindeki değişimin etkileri araştırılmıştır.

Lata vd. (2019), mikro ve nano ölçekte boyut etkilerini tahmin edebilen bir süreklilik teorisi olan yeni değiştirilmiş çift gerilme teorisini kullanarak zaman harmonik kaynaklarına bağlı enerji dağılımı olmadan enine izotropik termoelastik ortamdaki iki boyutlu deformasyonu incelemişleridir. Eğrilik tensörünün asimetric ve çift gerilim momenti tensörünün simetric olduğu enine izotropik termoelastik ortam için çift gerilme oluşturucu ilişkiler sunulmuştur. Yönetici denklemlerin çözümlerini elde etmek için Fourier dönüşümü tekniği uygulanır. Deformasyonun harmonik olarak zamana bağlı olduğu varsayılarak, dönüştürülmüş çözüm frekans alanında elde edilir. Zaman harmoniği yoğunlaştırılmış ve dağıtılmış kaynakların uygulanmasının, elde edilen çözümün faydasını gösterdiği düşünülmüştür. Dönüştürülmüş bölgede yer değiştirme bileşenleri, gerilim bileşenleri, sıcaklık değişimi ve çift gerilimi elde edilir. Fiziksel alanda çözümleri elde etmek için sayısal ters çözüm tekniği kullanılmıştır. Açık frekansın etkileri, elde edilen büyüklükler üzerinde grafiksel olarak çalışılmışlardır.

Ma vd. (2020), mikro ölçekli açılı katlı lamine Reddy levhanın serbest titreşim analizi için yeni değiştirilmiş çift gerilme teorisine dayalı olarak rafine edilmiş üçgen uygun olmayan elemanın bir kombinasyonu olan doğrulayıcı olmayan bir eleman geliştirmişlerdir. Yeni değiştirilmiş çift gerilim teorisine dayanan mikro ölçekli kompozit lamine Reddy plakalarının gerilim ve eğrilik bileşenleri, enine yer değiştirmenin birinci ve ikinci dereceden türevlerini kullanılmıştır. Mevcut eleman tarafından elde edilen basit bir şekilde desteklenen çapraz katlı mikro ölçekli kompozit lamine levha için sonuçların analitik Fourier serisi çözümlerinin çözümleriyle iyi bir şekilde örtüştüğü sayısal örnekler verilmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemini kullanarak mikro ölçekli bir kompozit

lamine levhanın doğal frekansları üzerindeki kat oryantasyonu, sınır koşulları ve uzunluk-kalınlık oranının etkilerini araştırmışlardır.

Attia ve Emam (2018), elektrikle çalıştırılan visko-elastik kenetlenmiş-kenetli mikro kırıların bükülmesi, burkulması ve serbest titreşimleri için boyuta bağlı, doğrusal olmayan bir kırış modeli sunmaktadır. Boyut etkisini modellemek için değiştirilmiş çift stres teorisi kullanılır. Von Karman geometrik doğrusal olmama ve moleküller arası van der Waals ve Casimir kuvvetlerini içeren Euler-Bernoulli kırış modeli benimsemişlerdir. Boltzmann süperpozisyon visko-elastik modeli, visko-elastik malzemenin doğrusal davranışını simüle etmek için kullanılır. Yönetici integral-diferansiyel denklem ve karşılık gelen sınır koşulları, Hamilton prensibi kullanılarak elde edilmiştir. Galerkin'in ayrıklaştırması, problemin indirgenmiş mertebeli bir modelini elde etmek için kullanılır. Yarı elastik yöntem, visko-elastik davranışa yaklaşmak için kullanılır. Model, bazı sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmasıyla doğrulanmış ve iyi bir uyum elde edilmiştir. Küçük boyutun, sürünme modülünün, gevşeme süresinin ve moleküller arası kuvvetlerin elektrostatik eğilme, burkulma ve serbest titreşimler üzerindeki etkisi araştırılmış ve önemli bulmuşlardır.

Jafari-Talookolaei vd. (2018), değiştirilmiş çift gerilme teorisini kullanarak tek bir delaminasyon ile Bernoulli-Euler mikro-kırılerinin statik eğilme ve serbest titreşim davranışını incelenmiştir. Delaminasyonlu kırış, delaminasyon bölgesini sınırları olarak kullanan birbirine bağlı dört alt-kırış tarafından modellenmiştir. Hasarlı alandaki delaminasyon yüzeylerinin etkileşimini modellemek için serbest ve kısıtlı mod teorilerinden yararlanılmıştır. Komşu alt kırışlar arasında süreklilik ve uyumluluk koşulları sağlanır. Mevcut çözümlerle bazı vaka çalışmaları için sonuçların doğrulanmasından sonra, delaminasyonun açıklık ve kalınlık konumları, malzeme uzunluğu ölçek parametresi ve sınır koşulları gibi çeşitli parametrelerin boyuta bağlı mikronun statik bükülme ve serbest titreşim özellikleri üzerindeki etkisi -kırış ayrıntılı olarak incelemiştir.

Choi vd. (2022), çift gerilme ve gerinim gradyan teorisi gibi daha yüksek dereceli deformasyon teorileri, mikro ve nano ölçekli yapıların mekanik davranışını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yazıda, çift gerilme teorisinde tanımlanan ek uzunluk ölçeği parametresi, toplu ölçekli çekme ve mikro ölçekli konsol bükme deneyleri gerçekleştirilerek ölçülmüştür. Toplu ölçekli karakterizasyon, mikroskobik mekanik özelliklerin yanı sıra çok kristalli bakır levhanın mikro yapısal bilgilerini sağladı. 1.6 um ila 8.6 um arasında değişen kalınlıklara sahip mikro ölçekli konsollar, femtosaniye lazer işleme ve ardından odaklanmış iyon ışını frezeleme kullanılarak bakır levha içinde üretmişlerdir. Bir nanoindenter kullanılarak bu numunelere hat yükü uygulandı. Substrat deformasyonunun etkisini dışlamak için sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Ölçülen etkin elastik modül, kalınlık azaldıkça 94 GPa'dan 215 GPa'ya yükselir. Eğilme sertliğindeki artış çift gerilim teorisine göre analiz edilmiş ve uzunluk ölçeği parametresi 0,78 μm olarak ölçülmüştür. Uzunluk ölçeği parametresinin fiziksel kökeni, yüklenme

sırasında serbest yüzeylerden kaçan hareketli dislokasyonlar dikkate alarak tartışmışlardır.

Roque vd. (2013), enine yüklere maruz kalan basit mesnetli lamine kompozit kirişlerin bükülmesini incelemek için değiştirilmiş bir çift gerilme teorisi ve ağırsız bir yöntem kullanmışlardır. Timoshenko kiriş kinematiği, kirişi modifiye edilmiş bir çift gerilme teorisi ile modellemek için kullanılmıştır. Timoshenko kirişi için geçerli denklemler, radyal tabanlı fonksiyonlara dayalı ağırsız bir yöntem kullanılarak sayısal olarak çözülür. Sayısal yöntemin uygulanması kolaydır ve analitik çözümlerle mükemmel uyum içinde olan doğru sonuçlar sağlar. Ayrıca, sonuçlar mevcut modelin mikro yapının etkilerini yakalayabildiğini göstermişlerdir.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Çalışmada Kullanılan Formülasyonlar

Tez kapsamında kullanılan değiştirilmiş gerilmiş çifti elastisite teorisi kullanılarak doğrusal, elastik ve izotropik malzemeler için U aşağıdaki gibi olduğu bilinmektedir (Park ve Gao 2006).

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

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

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

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

Yukarıdaki formüllerde u yer değiştirme vektörü, θ dönme vektörü, ε şekil değiştirme tansörü, x_{ij}^s simetrik dönme eğilme tensörünü, e_{ijk} ise permütasyon simgesi olarak formüllerde gösterilmiştir. δ

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

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

Yukarıdaki (3.5) ve (3.6) da bulunan gösterimlerde δ_{ij} simgesi kronecker deltası, l malzemenin boyut parametresi, λ lame sabiti ve μ ise zemin kayma sabiti olarak formüle edilmiştir.

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+v).(1-2v)} \quad (3.7)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+2v)} \quad (3.8)$$

Yukarıda belirtilen (3.7) ve (3.8) şeklinde numaralandırılan E young modülü, v ise poisson oranını simgelemektedir.

$$u_1(x, z) = -z \frac{dw(x)}{dx} \quad (3.9)$$

$$u_3(x, z) = w(x) \quad (3.10)$$

(3.9) ve (3.10) ile gösterilen denklemler (3.2) denkleminde yerine yazılırsa sıfırdan farklı bir gerilme değişeni elde edilmiş olur.

$$\varepsilon_{11} = z \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (3.11)$$

(3.11) deki denklemin (3.3), (3.4) te bulunan yerine konulmasıyla aşağıdaki (3.12) denklemi elde edilir.

$$x_{12}^s = x_{12}^s = \frac{1}{2} \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.12)$$

(3.11), (3.12) denklemlerini (3.5), (3.6) da yerine yazılırsa. (Poisson etkisi yok sayılacaktır.)

$$\sigma_{11} = -E_z \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.13)$$

$$M_{12}^s = M_{12}^s = \mu I_2^2 \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3.14)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L (EI + \mu AI^2) \left[\frac{d^2 w}{dx^2} \right]^2 dx \quad (3.15)$$

3.2. Rayleigh-Ritz Yönteminin Uygulanması

Kirişlerdeki toplam minimum potansiyel enerji Π olarak aşağıda formüle edilmiştir.

$$\Pi = U - W \quad (3.19)$$

(3.19) no.lu denklemde U şekil değiştirme enerjisi ve W ise dış kuvvetin yaptığı iş olup aşağıdaki gibi gösterilebilir.

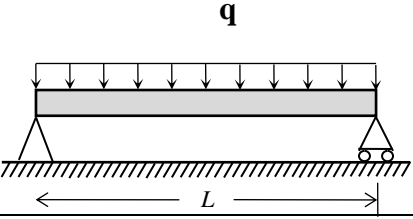
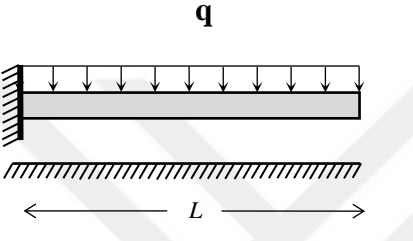
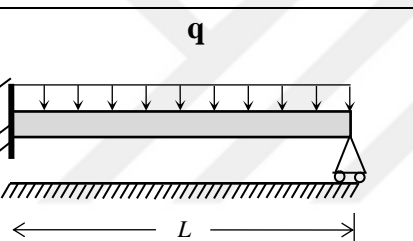
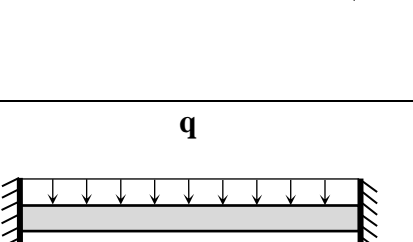
$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L \left((EI + GA I^2) \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 + k_w w^2 \right) dx - \int_0^L q w dx \quad (3.20)$$

Yukarıdaki (3.21) ile gösterilen denklemde elastik zemin üzerinde ve düzgün yayılı yük etkisi altındaki mikro kirişlerin değiştirilmiş gerilme çifti elastisite teorisine ve Bernoulli-Euler kiriş teorisine göre toplam şekil değiştirme enerjileri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$w(x) = \sum_{i=1}^N c_i \phi_i(x) \quad (3.21)$$

Buradaki (3.20) olarak gösterilen denklemde c_i keyfi katsayılar olup $\phi_i(x)$ ise sadece geometrik sınır koşullarını (çökme ve dönme) sağlaması yeterli olan kabul edilebilir fonksiyon ve N bu fonksiyonda bulunan polinom sayısıdır.

Çizelge 3.1. Bernoulli-Euler Teorisi ile Rayleigh-Ritz Teorisinin Maksimum Deplasmanlarının Karşılaştırılması

Mesnetleme durumu	Maksimum Deplasman (Kesin sonuç)	Maksimum Deplasman (Bu çalışma)
	$\frac{5qL^4}{384EI}$	$\frac{5qL^4}{384EI}$
	$\frac{qL^4}{8EI}$	$\frac{qL^4}{8EI}$
	$\frac{qL^4}{185EI}$	$\frac{qL^4}{184,634029EI}$
	$\frac{qL^4}{384EI}$	$\frac{qL^4}{384EI}$

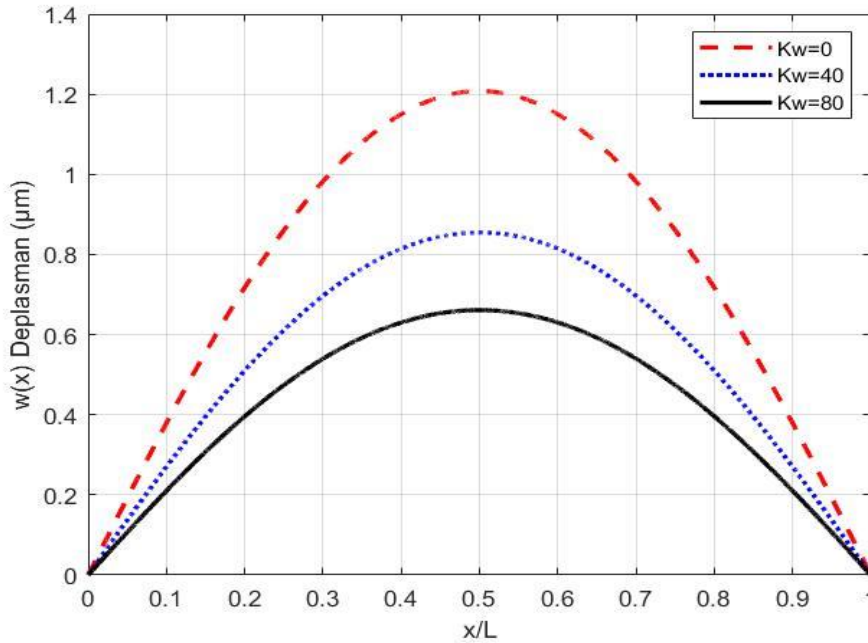
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında farklı mesnetleme koşullarına sahip yayılı yük etkisindeki bulunan, sabit kesitli mikro kirişlerin farklı parametreler etkisindeki deplasman değerleri incelenmiştir.

Bu çalışmada mesnetleme olarak 4 farklı mesnetleme şekli kullanılmış olup; mesnetleme şekli farklı olan bu mikro kirişlerin üzerine 3 farklı değerde düzgün yayılı yük ile yüklenmiştir. Bu yüklemelerin yanı sıra her yükleme değeri için zemin parametresi olan K_w değerleri değiştirilmiş ve oluşan maksimum deplasman değerleri kayıt altına alınmıştır.

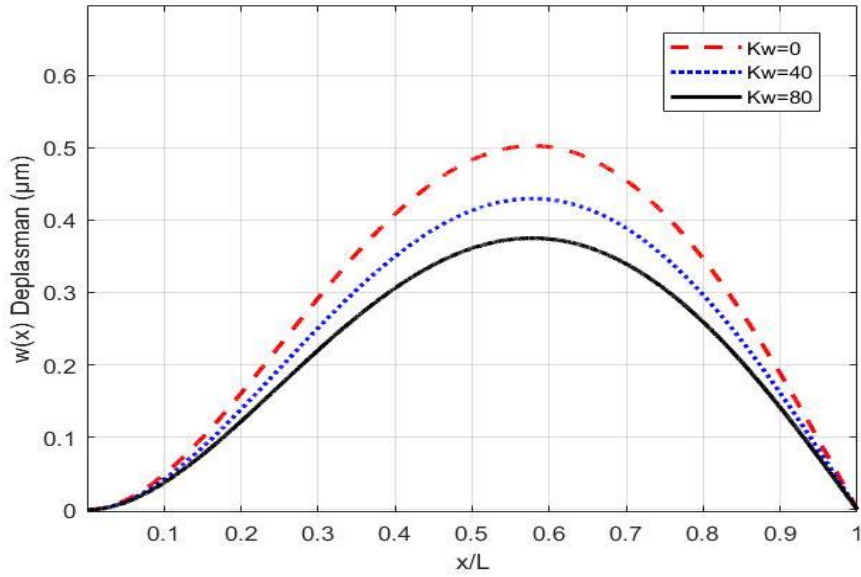
Ayrıca farklı mesnetleme koşullarına sahip bu kirişler $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük ile yüklenerek kiriş doğrultusu boyunca (x/L), deplasman miktarları ölçülmüş ve grafik haline getirilmiştir.

Kiriş doğrultusu boyunca ölçülen deplasmanlarda boyut parametresi değiştirilerek deplasman değerlerinin değişimi görülmüş ve boyut parametresinin deplasmana olan etkisi ortaya koyulmuştur. Bununla beraber zemin parametresi olan K_w nin artması ile deplasmanlarında kiriş doğrultusunda azaldığı gözlemlenmiştir.



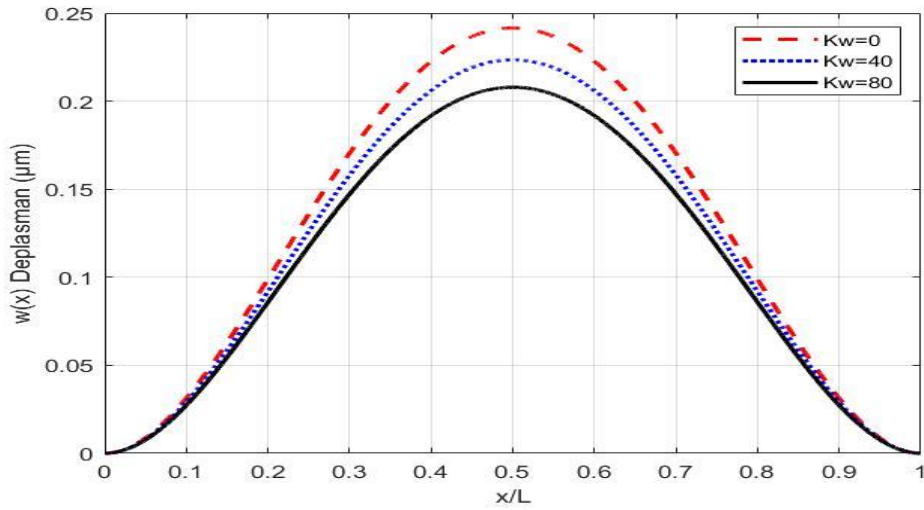
Şekil 4. 1. Boyut parametresi ($l=0$) iken mikro basit kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman değerlerinin değişimi

Yukarıdaki grafikte görüleceği üzere maksimum deplasman beklendiği üzere kirişin orta noktasında oluşmuştur ve mesnetlere doğru deplasmanın azaldığı açıkça gözlemlenmiştir.



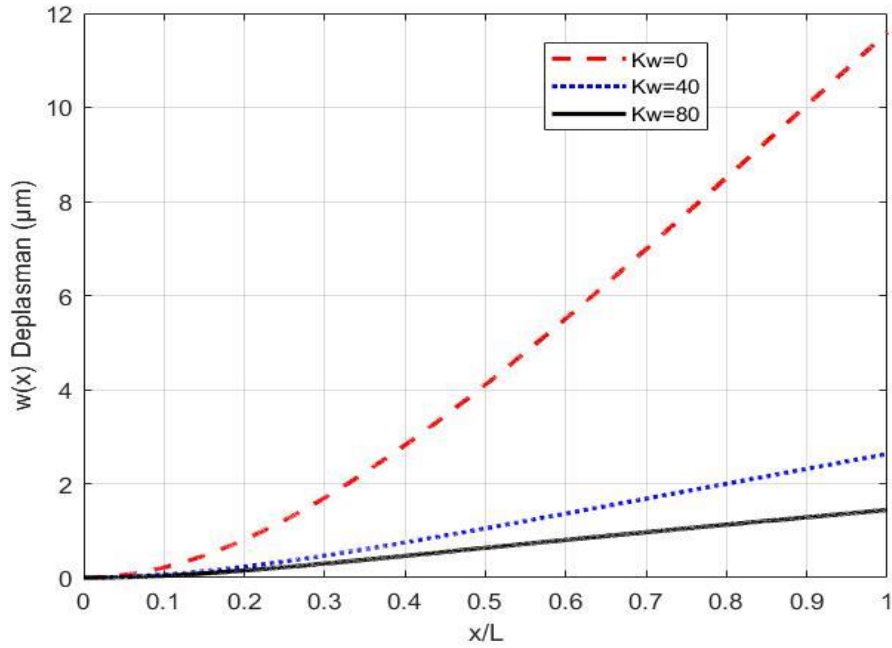
Şekil 4. 2. Boyut parametresi ($l=0$) iken bir ucu ankastre bir ucu basit mesnetli mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman değerlerinin değişimi

Yukarıdaki mesnetleme durumuna sahip mikro kiriş için deplasmanın Şekil 4.1.'den farklı olarak maksimum deplasman $0,5(x/L) < w(x)_{\text{max}} < 0,6(x/L)$ arasındadır.



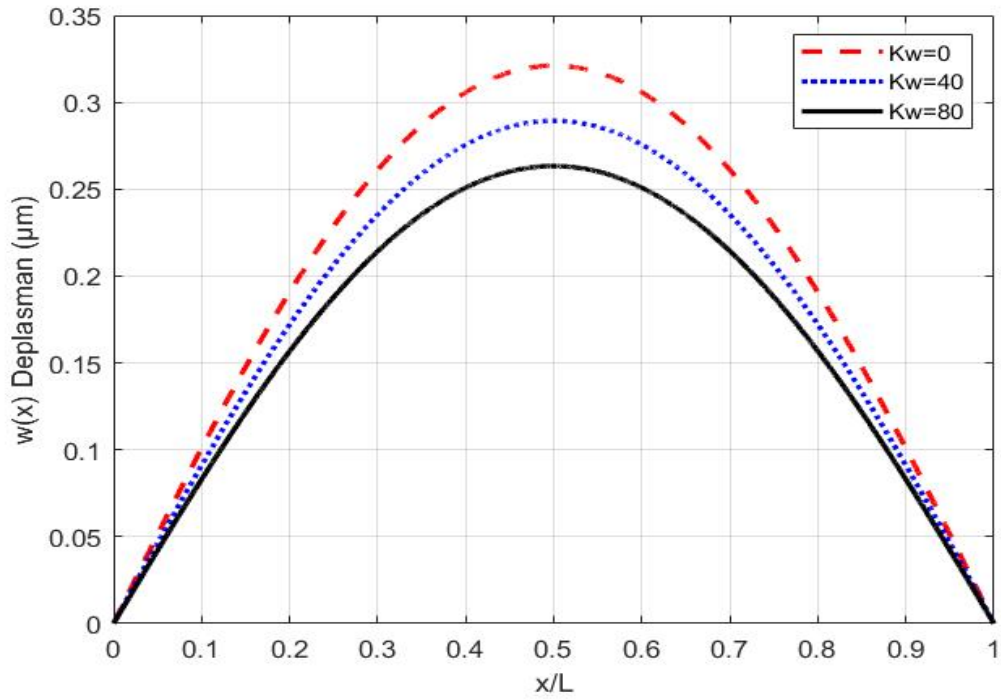
Şekil 4. 3. Boyut parametresi ($l=0$) iken iki ucu ankastre mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman değerlerinin değişimi

Yukarıdaki grafikte ise diğer mesnetleme durumlarına göre deplasman miktarlarının en az olduğu mesnetleme şeklinin olduğu görülmüştür. Deplasman miktarlarının orta noktada maksimum mesnetlere yaklaştıkça sifira indiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 4. Boyut parametresi ($l=0$) iken konsol kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi

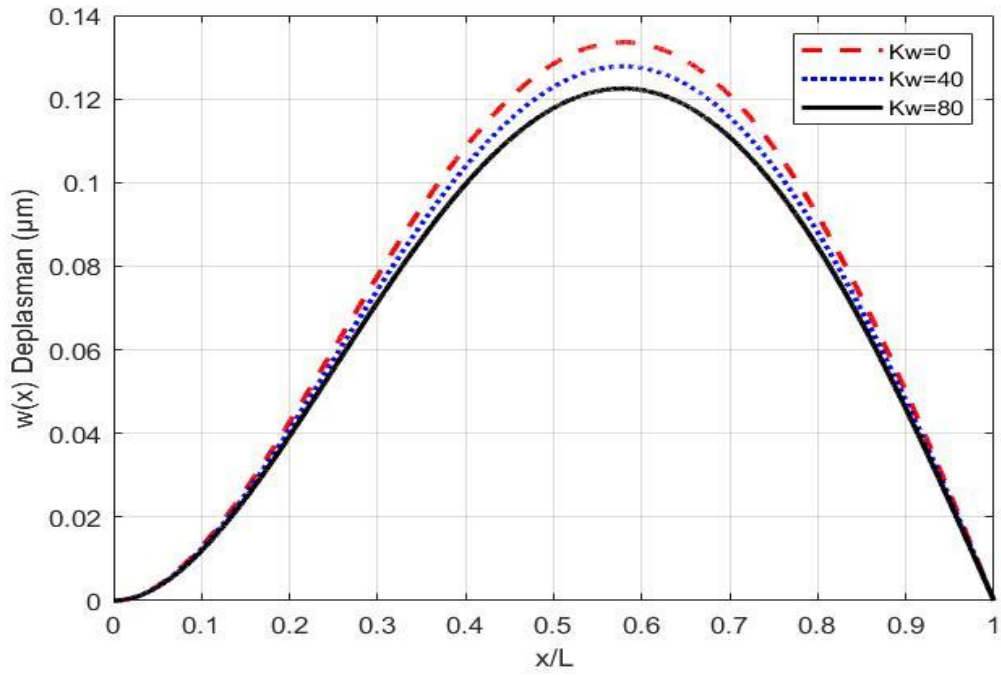
Yukarıdaki grafikte görüleceği üzere mikro konsol kirişte deplasman miktarın diğer mesnetlerden çok daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum deplasmanın ise $x/L=1$ noktasında olduğu görülmektedir. Bütün mesnetleme koşullarında ise K_w (Boyutsuz Zemin Parametresinin) artışı ile deplasman miktarlarının azaldığı açıkça gözlemlenmektedir.



Şekil 4. 5. Boyut parametresi ($l=1,553$) iken mikro basit kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi

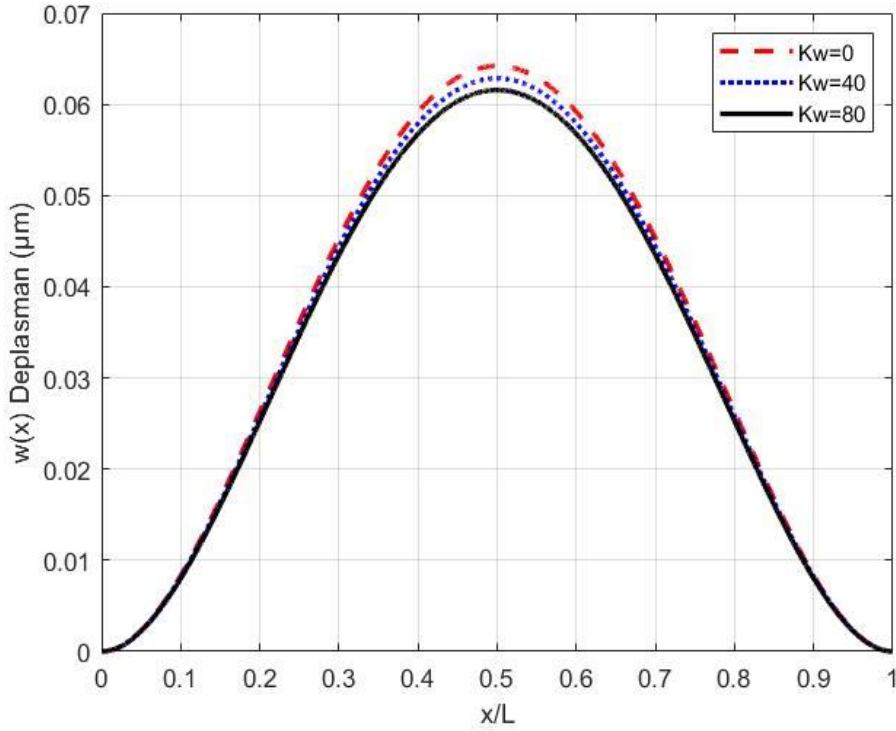
Yukarıdaki mikro kiriş doğrultusunda maksimum deplasmanın kirişin tam orta noktasında olduğu ve K_w değerinin artışıyla kiriş doğrultusunda deplasmanın azaldığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca boyut parametresi l değerinin artması deplasman değerinin azalmasına sebep olmuştur değişimi aynı mesnetleme koşulu için şekil 4.1.'de gözlemlenebilmektedir.



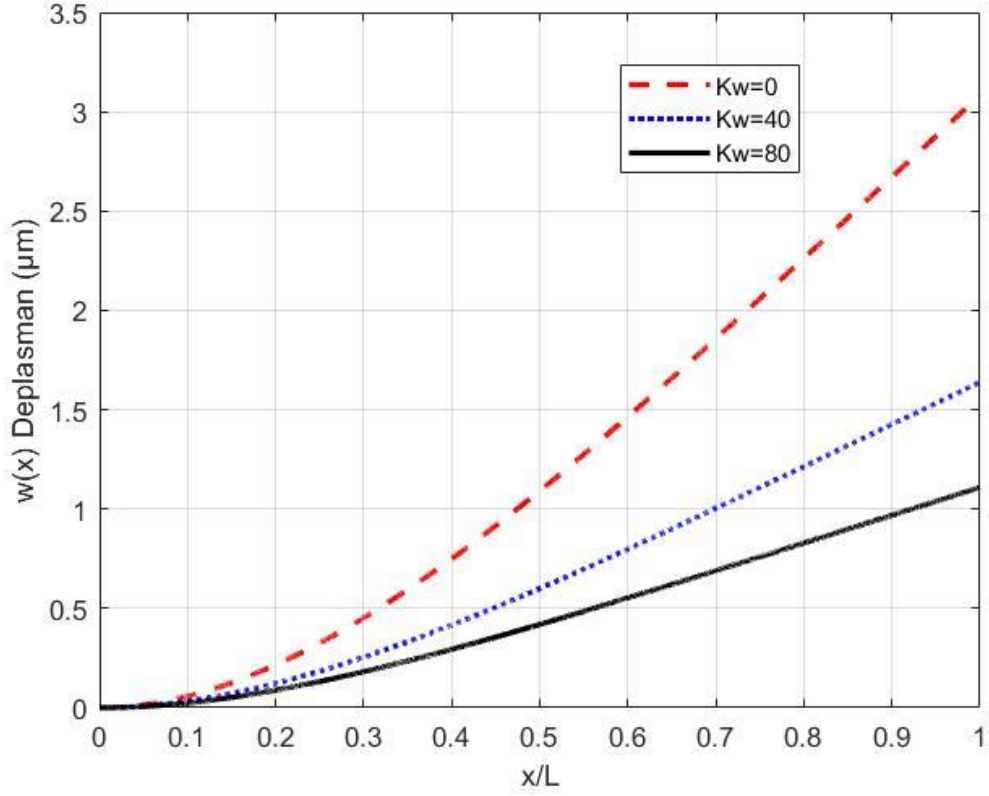
Şekil 4. 6. Boyut parametresi ($l=1,553$) iken bir ucu ankastre bir ucu basit mesnetli mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi

Yukarıdaki mesnetleme durumuna sahip mikro kiriş için maksimum deplasmanın Şekil 4.2. ile aynı noktada yani $0,5(x/L) < w(x)_{\text{max}} < 0,6(x/L)$ arasında olmakla beraber l boyut parametresinin artışı ile deplasman değerleri azalmıştır.



Şekil 4. 7. Boyut parametresi ($l=1,553$) iken iki ucu ankastre mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yayılı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi

Yukarıdaki grafikte iki ucu ankastre mesnette deplasman değerin diğer mesnetleme durumlarından çok daha düşük olduğu gözlemlenmiş ayrıca l değerinin etkisinin aynı mesnetleme koşuluna sahip şekil 4.3.'dan çok daha düşük deplasman değerlerine sahip olduğu net şekilde gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 8. Boyut parametresi ($l=1,553$) iken konsol mikro kirişin $q=10\mu\text{N}$ yaylı yük altında x/L kiriş boyunca deplasman deplasmanın değerlerinin değişimi

Yukarıdaki grafikte görüleceği üzere konsol mikro kirişin en yüksek deplasman değerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca l değerinin değişmesi etkisinin aynı mesnetleme koşuluna sahip şekil 4.4.'den çok daha düşük deplasman değerlerine sahip olduğu gözlemlenmektedir.

Farklı mesnetleme çeşitleri ve elastik zemin parametresi değerleri için düzgün yayılı yük(q) altında maksimum deplasman değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. ($q=40\mu\text{N}$, $h=2\mu\text{m}$, $L=20h$, $b=h$, $l=0$)

Çizelge 4.1. Çeşitli Mesnetle Koşullarındaki Mikro Kirişlerin Farklı Zemin Parametrelerindeki Maksimum Deplasman Değerleri ($l=0$)

	$K_w=0$	$K_w=50$	$K_w=100$
K	46,3768	8,7570	4,6620
B	4,8309	3,1861	2,3746
AK	0,9662	0,8774	0,8034
AB	2,0095	1,6576	1,4099

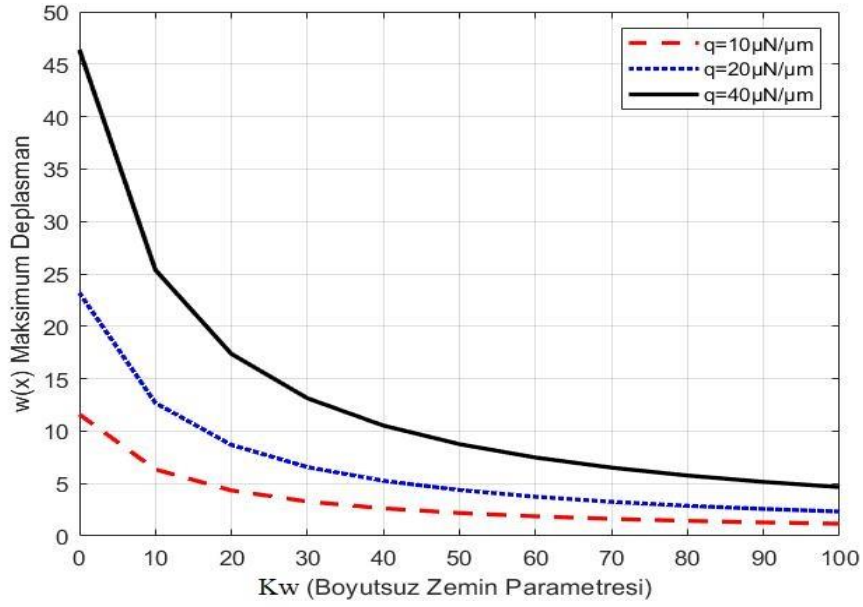
Tabloda görüldüğü üzere aynı mesnetleme ve aynı yükleme koşulları altında zemin parametresinin artması ile deplasman değerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Yukarıdaki Çizelge 4.1'de verilen mesnetleme çeşitleri ve elastik zemin parametresi değerleri birebir aynı tutulmuş fakat boyut parametresi l değeri değiştirilmiştir ve $l=1,553\mu\text{m}$ yapılarak oluşan deplasman değerleri çizelge 4.2 de sunulmuştur. ($q=40\mu\text{N}$, $h=2\mu\text{m}$, $L=20h$, $b=h$, $l=1,553\mu\text{m}$)

Çizelge 4.2. Çeşitli mesnetle koşullarındaki mikro kirişlerin farklı zemin parametrelerindeki maksimum deplasman değerleri ($l=1,553\mu\text{m}$)

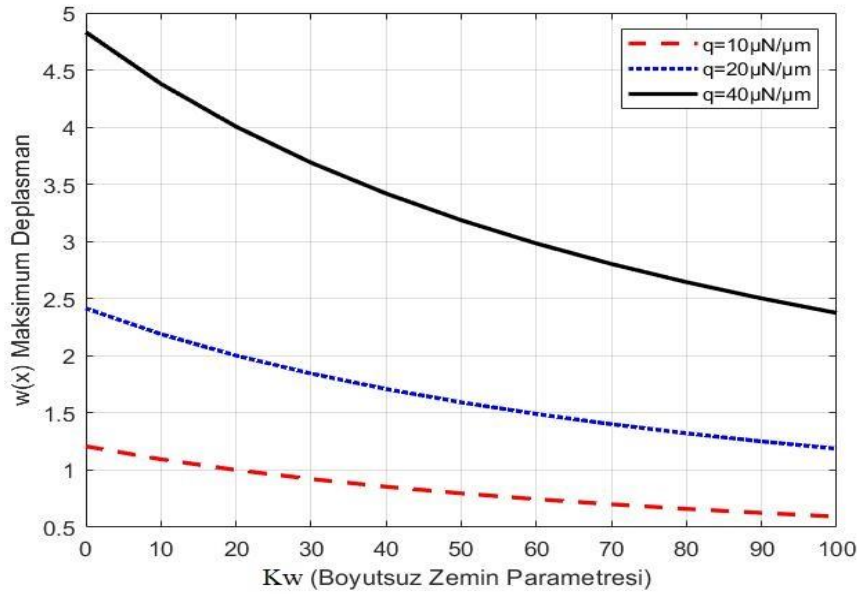
	$K_w=0$	$K_w=50$	$K_w=100$
K	12,329	5,8602	3,8098
B	1,2843	1,1295	1,0079
AK	0,2569	0,2501	0,2437
AB	0,5342	0,5057	0,4801

Çizelge 4.1 ve 4.2'de görüldüğü gibi artan zemin parametresiyle beraber azalan deplasman değerleri aynı zamanda artan boyut parametresi ile beraberde azaldığı gözlemlenmiştir.



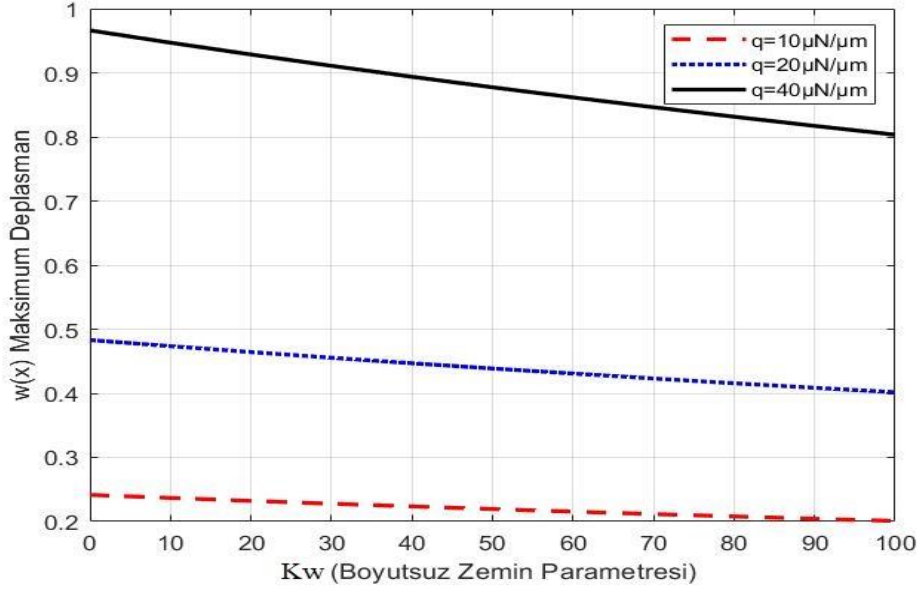
Şekil 4.9. Boyut parametresi ($l=0$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro konsol kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi

Şekil 4.9’da boyut parametresi ($l=0$) iken artan zemin parametresi etkisinde farklı yayılı yük etkisinde mikro konsol kirişin gösterdiği maksimum deplasmanlar gösterilmiştir. Görüleceği üzere konsol kirişte yayılı yükün artırılması ile beklendiği gibi deplasmanların arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca zemin parametresinin artması ise her yayılı yük koşulunda konsol kirişte deplasmanın parabolik bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir.



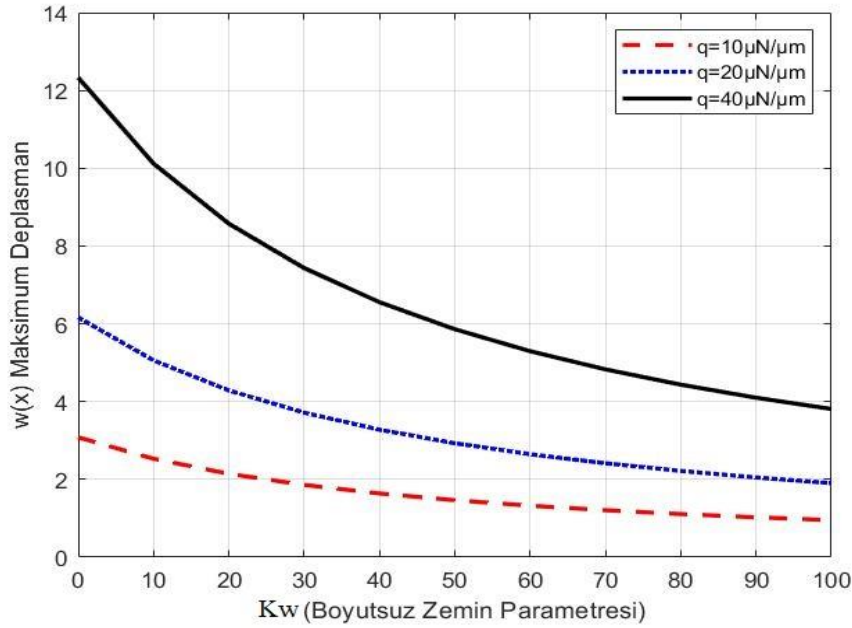
Şekil 4.10. Boyut parametresi ($l=0$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro basit kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi

Şekil 4.10’da farklı yayılı yüklerle yüklenen basit mesnetli kirişin aynı şekilde yayılı yüklenen konsol kirişten bekleneceği üzere daha az deplasman yaptığı görülmüştür. Fakat yükün artması deplasman değerini arttırmak olup; boyut parametresi K_w nin artması ise deplasman değerinin parabolik azalmasını sağladığı görülmektedir.



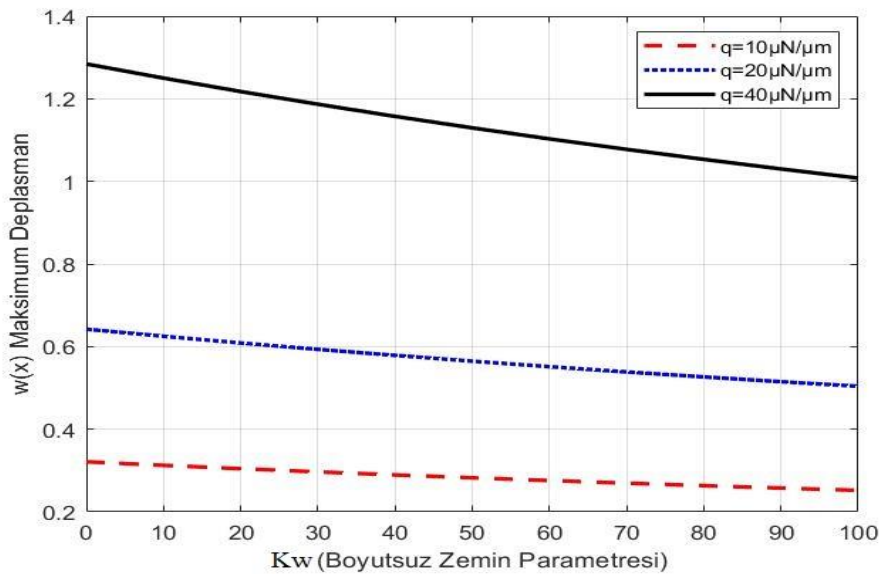
Şekil 4. 11. Boyut parametresi ($l=0$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro iki ucu ankastre kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi

Şekil 4.11’de görüleceği üzere aynı yayılı yük değerleri ile yüklenen ve $l=0$ yani boyut parametresi etkisi olmaksızın en düşük deplasman değerini beklendiği şekilde iki ucu ankastre mesnetli olan mikro kirişin verdiği gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra iki ucu ankastre mesnet için deplasman değerleri boyut parametresi arttıkça azalmakta olduğu görülmektedir fakat diğer mesnetleme şekli olan konsol kiriş ve basit kirişin aksine buradaki deplasman azalışları parabolik olarak değil lineere yakın olarak azaldığı görülmektedir.



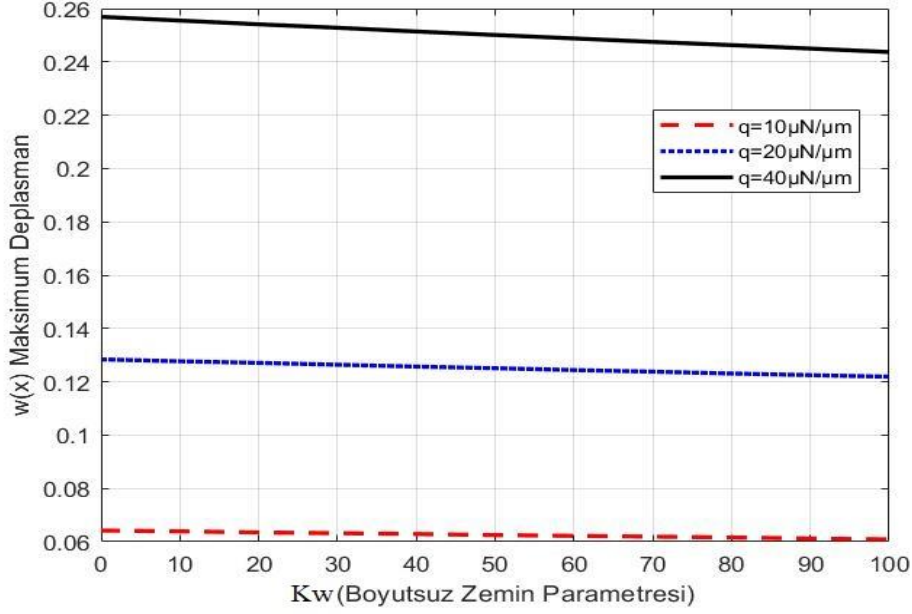
Şekil 4.12. Boyut parametresi ($l=1,553\mu\text{m}$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro konsol kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi

Şekil 4.12’de verilen mikro konsol kiriş ile Şekil 4.9’da verilen mikro konsol kiriş aynı yayılı yük ile yüklenmiş olup, boyut parametresinin ise $l=0$ dan $l=1,553\mu\text{m}$ e yükseltilmiştir. Boyut parametresinin bu şekilde yükseltilmesi deplasman değerlerinde kayda değer düşme sağlamıştır. Ayrıca yine aynı şekilde zemin parametresinin lineer şekilde artırılması ise Şekil 4.12’deki deplasman değerlerini parabolik bir şekilde azalttığı görülmektedir.



Şekil 4.13. Boyut parametresi ($l=1,553\mu\text{m}$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro basit kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi

Şekil 4.13'te görüleceği gibi yukarıda görülen ve aynı sınır koşullarına sahip olan Şekil 4.10'dan farkının boyut parametresi olan l 'nin sıfır olması olduğu görülmektedir. Deplasman değerlerinin ise aynı koşullar altında karşılaştırıldığı zaman dramatik olarak düştüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 4. 14. Boyut parametresi ($l=1,553\mu\text{m}$) iken farklı yayılı yük değerleri ile yüklü mikro iki ucu ankastre kirişin artan zemin parametresi etkisiyle maksimum deplasmanın değerlerinin değişimi.

Şekil 4.14'de görüleceği üzere iki ucu ankastre mikro kirişte beklendiği gibi en düşük deplasman değerleri gözlemlenmiştir. Yukarıda bulunan Şekil 4.11'dekinin aksine Şekil 4.14'da boyut parametresi $l=1,553\mu\text{m}$ olarak değiştirilmiş olup, deplasman değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber zemin parametresinin lineer artışı deplasman değerlerinin azalmasını sağlamış olup sıfıra doğru yakınsadığı görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Günümüz koşulları göz önüne alındığında nano ve mikro yapıdaki malzemeler, teknoloji alanında yüksek teknoloji ürünleri ve hizmetleri olarak kullanım alanına sahiptir. Karbon nanotüpler, nanotel, grafen, borofen gibi boyutları atomik düzeyde olan malzemelerin kullanılarak üretilen diğer aletlerin nanoteknolojideki yeri çok önemlidir.

Üretilen nanoteknoloji ürünlerinin dışardan etki edebilecek fiziksel etkilere dayanacak yapıda ve tasarımı olması oldukça önemlidir. Bu tasarımların doğru şekilde yapılabilmesi amacı ile malzemeler üzerinde çeşitli deneylerin yapılması ve mekanik davranışlarının tayin edilmesi gerekmektedir. Kısacası nanoteknoloji de modellemelerin tayini için aynı gerçek boyutta olduğu gibi öncelikle mekanik özelliklerin tam anlamıyla bilinmesi gerekmektedir.

Tez kapsamında elde edilen sayısal sonuçlar ve bulunan sonuçlar değerlendirilerek önemli olduğu görülen sonuçlar elde edilmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Farklı mesnetleme koşullarına sahip mikro yapıdaki kirişlerin yayılı yük altındaki deplasmanlarının değerleri mesnetleme koşuluna göre değiştiği gözlemlenmiştir.
2. Sonuçların elde edilmesinde kullanılan Rayleigh-Ritz yöntemi kesin sonuçlarla neredeyse eşit değerler verdiği görülmektedir.
3. Mikro kirişlerdeki yayılı yük değerinin artışı yapılan deplasman değerleri arttırdığı gözlenmiştir.
4. Mesnetleme çeşitleri arasında en yüksek deplasman değeri mikro konsol kirişte görülürken en az deplasman değerleri ise iki ucu ankastre olan mikro kirişte kaydedildiği görülmektedir.
5. Farklı mesnetleme koşulları altındaki yayılı yüklü mikro kirişlerde boyutsuz zemin parametresi k_w nin artması deplasman değerlerini her mesnetleme koşulunda arttırmakta olup, belli bir k_w değerinden sonra deplasman değerlerinin sifira yakınsadığı sonucuna ulaşılmıştır.
6. Winkler zemin parametresinin artması belli bir değerden sonra ortaya çıkan deplasman değerlerinin anlamsızlaşmasına neden olmaktadır. Bu anlamsızlaşmanın nedeni diğer mesnetleme koşullarının deplasman değerlerinin de sifira yakınsaması ve karşılaştırmanın yapılamamasıdır.

7. Mikro kirişlerin hangi mesnetleme koşuluna sahip olduğu önemli olmakla beraber malzemenin boyut parametresi olan l değerinin de yayılı yük altındaki deplasman değerlerine etkisi olduğu görülmektedir. Ayrıca Boyut parametresinin (l) değerinin artışı deplasman değerlerini düşürmekte olduğu bariz bir şekilde gözlemlenmiştir.
8. Mesnetleme koşulları ve yayılı yük değerleri göz önüne alındığında yapılan tasarımların zemin parametresi yüksek olacak şekilde desteklenerek tasarlanması mikro yapıların deplasman değerlerini azaltmakta dolayısı ile üretilen bu yapının kullanım süresini ve dayanıklılığını arttıracak tahmin edilmektedir.
9. Üretilen malzemelerde kullanılacak mesnetleme çeşitleri ile beraber malzemenin boyut parametresini etkileyen kısacası kirişin hangi malzemedan üretildiği de kirişin deplasman değerini etkilemektedir bu neden ile malzemenin rijit olması üretilen malzemenin kullanım süresini arttıracak düşünülmemtedir

Tez kapsamında ulaşılan sonuçların, daha sonra yapılacak tez ve yayın çalışmalarında temel olası amacıyla kısaca zemin parametresi değerinin artması her mesnetleme koşulu için deplasman değerinin azalmasını sağladığı ve yine aynı şekilde boyut parametresi olan l değerinin de artması ile deplasman değerinin azaldığı açıkça gözlemlenmektedir.

Elde edilen bu sonuçların daha sonrasında yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abu-Salih, and S., Elata D., 2004. Electromechanical buckling of a pre-stressed layer bonded to an elastic foundation, Nano Science and Technology Institute-nanotech, Vol. 2, pp. 223-226, 2004.
- Akbarzadeh Khorshidi, M. J. M. o. T.-D. M. (2021). "Postbuckling of viscoelastic micro/nanobeams embedded in visco-Pasternak foundations based on the modified couple stress theory." 25(2): 265-278.
- Akbaş, Ş. D. J. I. J. o. S. S. and Dynamics (2017). "Free vibration of edge cracked functionally graded microscale beams based on the modified couple stress theory." 17(03): 1750033.
- Akgöz, B. and Civalek Ö. 2012. Analysis of micro-sized beams for various boundary conditions based on the strain gradient elasticity theory. Arch. Appl. Mech., 82 (3): 423–443.
- 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. 2013a. Free Vibration analysis of axially functionally Graded tapered Bernoulli-Euler microbeams based on the modified couple stress theory. Composite structures, 98: 314-322.
- Allahkarami F, Nikkiah-Bahrami M 2018. The effects of agglomerated CNTs as reinforcement on the size-dependent vibration of embedded curved microbeams based on modified couple stress theory. Mech Adv Mater Struct 25(12):995–1008.
- Al-Shewailiah, D. M. R. and M. A. J. M. T. P. Al-Shujairi (2022). "Static bending of functionally graded single-walled carbon nanotube conjunction with modified couple stress theory." 61: 1023-1037.
- Anonim 1:https://www.researchgate.net/figure/A-basic-concept-on-length-scale-that-is-showing-size-of-nanomaterials-and-their_fig1_315750248 [Son erişim tarihi: 21.12.2022].
- Anonim 10: <https://www.bmw.com/> [Son erişim tarihi: 13.12.2022].
- Anonim 11: <https://www.nano.gov/> [Son erişim tarihi: 17.12.2022].
- Anonim 12: <https://www.chemistryworld.com/podcasts/diborane/2500136.article> [Son erişim tarihi: 15.12.2022].
- Anonim 13:<https://edition.cnn.com/2014/10/10/tech/innovation/space-elevator/> [Son erişim tarihi: 16.12.2022].
- Anonim 14: <https://www.ibelieveinsci.com/> [Son erişim tarihi: 18.12.2022].

- Anonim 15: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2641884/How-gothic-cathedrals-helping-build-stairway-heavens-Elevators-inspired-Victorian-towers-space-2050.html> [Son erişim tarihi: 19.12.2022].
- Anonim 2: <https://www.spacex.com> [Son erişim tarihi: 14.12.2022].
- Anonim 3: <https://www.nvidia.com> [Son erişim tarihi: 16.12.2022].
- Anonim 4: <https://www.uclan.ac.uk> [Son erişim tarihi: 22.12.2022].
- Anonim 5: <https://www.medicaldevice-network.com> [Son erişim tarihi: 08.12.2022].
- Anonim 6: <http://t3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS4qRDyJqT1Cgr7BxM9WH5hC> [Son erişim tarihi: 10.12.2022].
- Anonim 7: <https://blueberriesconsulting.com> [Son erişim tarihi: 09.12.2022].
- Anonim 8: <https://www.defensemedianetwork.com/> [Son erişim tarihi: 10.12.2022].
- Anonim 9: <https://www.nanowerk.com/> [Son erişim tarihi: 12.12.2022].
- Aqel, A., K. M. Abou El-Nour, R. A. Ammar and A. J. A. J. o. C. Al-Warthan 2012. "Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation." 5(1): 1-23.
- Arani AG, Abdollahian M, Kolahchi R 2015. Nonlinear vibration of embedded smart composite microtube conveying fluid based on modified couple stress theory. *Polym Compos* 36(7):1314–1324.
- Arshid, E., H. Arshid, S. Amir, S. B. J. A. o. C. Mousavi and M. Engineering (2021). "Free vibration and buckling analyses of FG porous sandwich curved microbeams in thermal environment under magnetic field based on modified couple stress theory." 21(1): 1-23.
- Asghari M, Kahrobaiyan MH, Ahmadian MT 2010. A nonlinear Timoshenko beam formulation based on the modified couple stress theory. *Int J Eng Sci* 48(12):1749–1761.
- Asghari M, Rahaeifard M, Kahrobaiyan MH, Ahmadian MT 2011. The modified couple stress functionally graded Timoshenko beam formulation. *Mater Des* 32(3):1435–1443.
- Attia, M. A. and S. A. J. A. M. Emam (2018). "Electrostatic nonlinear bending, buckling and free vibrations of viscoelastic microbeams based on the modified couple stress theory." 229(8): 3235-3255.
- Banerjee, J. R., S. O. Papkov, T. P. Vo, I. J. J. o. V. Elishakoff and Control (2023). "Dynamic stiffness formulation for a micro beam using Timoshenko–Ehrenfest and modified couple stress theories with applications." 29(1-2): 428-439.
- Casals-Terre, J. and Shkel, A. , 2005. Snap-Action bistable micromechanism actuated by nonlinear resonance, *IEEE sensors*, Irvine, CA, USA, 2005.

- Choi, J.-H., H. Kim, J.-Y. Kim, K.-H. Lim, B.-C. Lee, G.-D. J. M. Sim and Design (2022). "Micro-cantilever bending tests for understanding size effect in gradient elasticity." 214: 110398.
- Chong ACM, Lam DCC 1999. Strain gradient plasticity effect in indentation hardness of polymers. *J Mater Res* 14(10):4103–4110.
- Chuang W-C, Lee H-L, Chang P-Z, Hu Y-C 2010. Review on the modeling of electrostatic MEMS. *Sensors* 10(6):6149–6171.
- Cornell BA, Braach-Maksvytis VLB, King LG, Osman PDJ, Raguse B, Wieczorek L, Pace RJ 1997. A biosensor that uses ion-channel switches. *Nature* 387(5):580–583
- Dehrouyeh-Semnani AM, Bahrami A. 2016. On size-dependent Timoshenko beam element based on modified couple stress theory. *Int J Eng Sci* 107:134–148.
- Dehrouyeh-Semnani AM, BehboodiJouybari M, Dehrouyeh M 2016. On size-dependent lead-lag vibration of rotating micro cantilevers. *Int J Eng Sci* 101:50–63.
- Dehrouyeh-Semnani AM, Dehrouyeh M, Zafari-Koloukhi H, Ghamami M 2015. Size-dependent frequency and stability characteristics of axially moving microbeams based on modified couple stress theory. *Int J Eng Sci* 97:98–112.
- Dehrouyeh-Semnani, A. M. and A. J. I. J. o. E. S. Bahrami (2016). "On size-dependent Timoshenko beam element based on modified couple stress theory." 107: 134-148.
- Ebrahimi, F. and E. J. C. S. Salari 2015. "Thermal buckling and free vibration analysis of size dependent Timoshenko FG nanobeams in thermal environments." 128: 363-380.
- Eltaher, M., S. A. Emam, F. J. A. M. Mahmoud and Computation 2012. "Free vibration analysis of functionally graded size-dependent nanobeams." 218(14): 7406-7420.
- Eringen AC 1972. Linear-theory-of-nonlocal-elasticity-and dispersion-of-plane-waves. *Int J Eng Sci* 10:425–435.
- Eringen AC 1992 Vistas of nonlocal continuum physics. *Int J Eng Sci* 30(10):1551–1565.
- 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.
- Evcan, N. 2012. Pasternak Zemine Oturan Sonsuz Bir Kirişin Hareketli Tekil Yük Altındaki Dinamik Davranışının İncelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 36s.
- Fargas-Marques A, Casals-Terre J, Shkel AM 2007. Resonant pull-in condition in parallel-plate electrostatic actuators. *J Microelectromech Syst* 16(5):1044–1053.
- Farokhi H, Ghayesh MH 2015. Thermo-mechanical dynamics of perfect and imperfect Timoshenko microbeams. *Int J Eng Sci* 91:12–33.

- Farokhi H, Ghayesh MH 2017. Nonlinear resonant response of imperfect extensible Timoshenko microbeams. *Int J Mech Mater Des* 13(1):43–55.
- Fleck NA, Hutchinson JW 2001. A reformulation of strain gradient plasticity. *J Mech Phys Solids* 49:2245–2271.
- Fleck NA, Muller GM, Ashby MF, Hutchinson JW 1994. Strain gradient plasticity: theory and experiment. *Acta Metall Mater* 42(2):475–487.
- Gao H, Huang Y, Nix WD, Hutchinson JW 1999. Mechanismbased strain gradient plasticity–theory. *J Mech Phys Solids* 47:1239–1263.
- Gao XL 2014. A new Timoshenko beam model incorporating microstructure and surface energy effects. *Acta Mech* 226(2):457–474.
- Ghayesh MH, Amabili M, Farokhi H 2013. Three-dimensional nonlinear size-dependent behaviour of Timoshenko microbeams. A Review on the Size-Dependent Models of Micro-beam and Micro-plate Based on the Modified Couple...1 *3Int J Eng Sci* 71:1–14.
- Ghayesh, M. H., H. Farokhi and M. J. C. P. B. E. Amabili (2013). "Nonlinear dynamics of a microscale beam based on the modified couple stress theory." 50: 318-324.
- Gudmundson P 2004. A unified treatment of strain gradient plasticity. *J Mech Phys Solids* 52(6):1379–1406.
- Haque MA, Saif MTA 2003. A review of mems-based microscale and nanoscale tensile and bending testing. *Exp Mech* 43(3):248–255.
- Hassannejad, R., S. A. Hosseini and B. J. A. A. Alizadeh-Hamidi (2021). "Influence of non-circular cross section shapes on torsional vibration of a micro-rod based on modified couple stress theory." 178: 805-812.
- Hu, H., T. Yu and T. Q. J. C. S. Bui (2020). "Functionally graded curved Timoshenko microbeams: A numerical study using IGA and modified couple stress theory." 254: 112841.
- Huang Y, Gao H, Nix WD, Hutchinson JW 2000. Mechanismbased strain gradient plasticity–analysis. *J Mech Phys Solids* 48:99–128.
- Ilkhani MR, Hosseini-Hashemi SH 2016. Size dependent vibrobuckling of rotating beam based on modified couple stress theory. *Compos Struct* 143:75–83.
- Jafari-Talookolaei, R.-A., N. Ebrahimzade, S. Rashidi-Juybari and K. J. S. I. Teimoori (2018). "Bending and vibration analysis of delaminated Bernoulli–Euler microbeams using the modified couple stress theory." 25(2): 675-688.
- Kahrobaiyan MH, Asghari M, Ahmadian MT 2014. A Timoshenko beam element based on the modified couple stress theory. *Int J Mech Sci* 79:75–83.
- Karakaş, K.T. 2020. Değişken parametrelili pasternak zemine oturan sürekli kirişlerin sabit ve hareketli yükler için sap2000 yazılımı ile hesabı. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 59s.

- Ke LL, Wang YS 2011. Flow-induced vibration and instability of embedded double-walled carbon nanotubes based on a modified couple stress theory. *Physica E* 43(5):1031–1039.
- Ke LL, Wang YS, Wang ZD 2011. Thermal effect on free vibration and buckling of size-dependent microbeams. *Physica E* 43(7):1387–1393.
- Ke, L.-L. and Y.-S. J. C. S. Wang (2011). "Size effect on dynamic stability of functionally graded microbeams based on a modified couple stress theory." 93(2): 342-350.
- Kong, S. J. A. o. C. M. i. E. (2022). "A review on the size-dependent models of micro-beam and micro-plate based on the modified couple stress theory." 29(1): 1-31.
- Kong, S., Zhou, S., Nie, Z. and Wang, K. 2008. The size-dependent natural frequency of Bernoulli-Euler micro-beams. *Int. J. Eng. Sci.*, 46 (5): 427–437.
- Kumar, H. and S. J. C. S. Mukhopadhyay (2021). "Response of deflection and thermal moment of Timoshenko microbeams considering modified couple stress theory and dual-phase-lag heat conduction model." 263: 113620.
- Lam DCC, Yang F, Chong ACM, Wang J, Tong P 2003. Experiments and theory in strain gradient elasticity. *J Mech Phys Solids* 51(8):1477–1508.
- Lata, P., H. J. G. Kaur and Engineering (2019). "Deformation in transversely isotropic thermoelastic medium using new modified couple stress theory in frequency domain." 19(5): 369-381.
- Liebold C, Müller WH 2016. Comparison of gradient elasticity models for the bending of micromaterials. *Comput Mater Sci* 116:52–61.
- Lim CW, Zhang G, Reddy JN 2015. A higher-order nonlocal elasticity and strain gradient theory and its applications in wave propagation. *J Mech Phys Solids* 78:298–313.
- Liu YP, Reddy JN 2011. A nonlocal curved beam model based on a modified couple stress theory. *Int J Struct Stab Dyn* 11(3):495–512.
- Ma HM, Gao XL, Reddy JN 2008. A microstructure-dependent Timoshenko beam model based on a modified couple stress theory. *J Mech Phys Solids* 56(12):3379–3391.
- Ma LH, Ke LL, Reddy JN, Yang J, Kitipornchai S, Wang YS 2018. Wave propagation characteristics in magneto-electro elastic nanoshells using nonlocal strain gradient theory. *Compos Struct* 199:1023.
- Ma Q, Clarke DR 1995. Size dependent hardness of silver single crystals. *J Mater Res* 10(4):853–863.
- Ma, Y., Y. Gao, W. Yang and D. J. R. i. P. He (2020). "Free vibration of a micro-scale composite laminated Reddy plate using a finite element method based on the new modified couple stress theory." 16: 102903.
- McFarland AW, Colton JS 2005. Role of material microstructure in plate stiffness with relevance to microcantilever sensors. *J Micromech Microeng* 15(5):1060–1067.

- Mindlin RD 1964. Micro-structure in linear elasticity. *Arch Ration Mech Anal* 16(1):51–78.
- Mindlin RD, Tiersten HF 1962. Effects of couple-stresses in linear elasticity. *Arch Ration Mech Anal* 11(1):415–448.
- Niordson CF, Hutchinson JW 2003. On lower order strain gradient plasticity theories. *Eur J Mech A Solids* 22(6):771–778.
- Numanoğlu, H. M., Civalek, Ö. 2019. "On the dynamics of small-sized structures." 145: 103164.
- Papargyri-Beskou, S., K. Tsepoura, D. Polyzos, D. J. I. J. o. s. Beskos and structures 2003. "Bending and stability analysis of gradient elastic beams." 40(2): 385-400.
- Park, S., X. J. J. o. M. Gao and Microengineering 2006. "Bernoulli–Euler beam model based on a modified couple stress theory." 16(11): 2355.
- Poole WJ, Ashby MF, Fleck NA 1996. Micro-hardness of annealed and work-hardened copper polycrystals. *Scripta Mater* 34(4):559–564.
- Priyanka, R. and J. J. C. S. Pitchaimani (2022). "Static stability and free vibration characteristics of a micro laminated beam under varying axial load using modified couple stress theory and Ritz method." 281: 115028.
- Qui, J., Lang, J.H. and Slocum, A.H., 2004. A curved-beam bistable mechanism, *journal of microelectronic Systems*, Vol. 12 No.2, pp. 137-146, 2004.
- Rayleigh, L. 1877. *The Theory of Sound*, vol 1, The Macmillan Company.
- Reddy, J.N. 2011. Microstructure-dependent couples stress theories of functionally graded beams. *J. Mech. Phys. Solids*, 59: 2382–2399.
- Ritz, W. 1909. Theorie der transversalschwingungen einer quadratische Platte mit freien Randern, *Annalen der Physik*, 28: 737-786.
- Roque CMC, Fidalgo DS, Ferreira AJM, Reddy JN 2013 A study of a microstructure-dependent composite laminated Timoshenko beam using a modified couple stress theory and a meshless method. *Compos Struct* 96:532–537.
- Roque, C., D. Fidalgo, A. Ferreira and J. J. C. S. Reddy (2013). "A study of a microstructure-dependent composite laminated Timoshenko beam using a modified couple stress theory and a meshless method." 96: 532-537.
- Sedighi, H. M., A. E. Abouelregal and S. A. J. P. S. Faghidian (2021). "Modified couple stress flexure mechanics of nanobeams." 96(11): 115402.
- Shanab, R. A., M. A. J. W. i. R. Attia and C. Media (2021). "On bending, buckling and free vibration analysis of 2D-FG tapered Timoshenko nanobeams based on modified couple stress and surface energy theories." 1-47.
- Shoaib M, Hamid NH, Malik AF, Zain Ali NB, Tariq Jan M 2016 A review on key issues and challenges in devices level MEMS testing. *J Sens* 2016:1–14.

- Sobhy, M., A. M. J. M. o. A. M. Zenkour and Structures (2020). "The modified couple stress model for bending of normal deformable viscoelastic nanobeams resting on visco-Pasternak foundations." 27(7): 525-538.
- Srikar VT, Senturia SD 2002. The reliability of microelectromechanical systems (MEMS) in shock environments. *J Microelectromech Syst* 11(3):206–214.
- Srikar VT, Spearing SM 2003. A critical review of microscale mechanical testing methods used in the design of microelectromechanical systems. *Exp Mech* 43(3):238–247
- Stelmashenko NA, Walls MG, Brown LM, Milman YuV 1993. Microindentations on W and Mo oriented single crystals: An STM study. *Acta Metall Mater* 41(10):2855–2865.
- Stölken JS, Evans AG 1998. A microbend test method for measuring the plasticity length scale. *Acta Mater* 46(14):5109–5115
- Sulem, J. and I. Vardoulakis 1995. *Bifurcation analysis in geomechanics*, CRC Press.
- Suter, M., Ergeneman, O., Zürcher, J., Schmid, S., Camenzind, A., Nelson, B. J., Hierold, C., "Superparamagnetic photocurable nanocomposite for the fabrication of microcantilever", *J. Micromech. Microeng.*, 21, (2011).
- Şimşek, M. and Yurtcu, H.H. 2013. Analytical solutions for bending and buckling of functionally graded nanobeams based on the nonlocal Timoshenko beam theory. *Compos. Struct.*, 97: 378–386.
- Taati E, Molaei Najafabadi M, Basirat Tabrizi H 2014. Sizedependent generalized thermoelasticity model for Timoshenko microbeams. *Acta Mech* 225(7):1823–1842.
- Tang, F., F. Dong, Y. Guo, S. Shi, J. Jiang and S. J. N. Liu (2022). "Size-Dependent Buckling and Post-Buckling Analysis of the Functionally Graded Thin Plate Al–Cu Material Based on a Modified Couple Stress Theory." 12(19): 3502.
- Thanh, C.-L., L. V. Tran, T. Vu-Huu, M. J. C. M. i. A. M. Abdel-Wahab and Engineering (2019). "The size-dependent thermal bending and buckling analyses of composite laminate microplate based on new modified couple stress theory and isogeometric analysis." 350: 337-361.
- Timoshenko, S.P., and Goodier, J.N., 1970. *Theory of Elasticity*, third ed. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
- Toupin RA 1962. Elastic materials with couple-stresses. *Arch Ration Mech Anal* 11(1):385–414
- Vo, D., K. Zhou, J. Rungamornrat and T. Q. J. E. J. o. M.-A. S. Bui (2022). "Spatial arbitrarily curved microbeams with the modified couple stress theory: Formulation of equations of motion." 92: 104475.

- Vollmer F, Braun D, Libchaber A, Khoshshima M, Teraoka I, Arnold S 2002. Protein detection by optical shift of a resonant microcavity. *Appl Phys Lett* 80(21):4057–4059.
- Wang W, Huang Y, Hsia KJ, Hu KX, Chandra A 2003. A study of microbend test by strain gradient plasticity. *Int J Plast* 19:365–382.
- Xia W, Wang L 2010. Microfluid-induced vibration and stability of structures modeled as microscale pipes conveying fluid based on non-classical Timoshenko beam theory. *Microfluid Nanofluid* 9(4–5):955–962.
- Yang, F., Chong, A.C.M., L.A.M., D.C.C., Tong, P. 2002. Couple stress based strain gradient theory for elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 39: 2731-2743.
- Younis, M. I., Abdel-Rahman, E.M., and Nayfeh, A., 2003. A reduced-Order Model for Electromechanical Systems, Vol. 12, pp. 672-680, 2003.
- Zhang Y., Zhao Y.P. 2016. Measuring the nonlocal effects of a micro/nanobeam by the shifts of resonant frequencies. *Int J Solids Struct* 102:259–266.
- Zhang, Y., Wang, Y., Li, Z., Huang, Y., and Li. D., 2007. Snap-trough and pull-in instabilities of an arch-shaped beam under an electrostatic loading, *Journal of microelectromechanical Systems*, Vol. 16, pp. 684-693. 2007.

ÖZGEÇMİŞ

ALİ YEKTA ALTIN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2020-Devam ediyor.	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2013-2018	Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

İnşaat Mühendisliği 2021-devam ediyor	ASAT Genel Müdürlüğü ASAT Genel Müdürlüğü Kontrol Mühendisliği
İnşaat Mühendisi 2019-2021	Kemer Belediyesi İmar ve Şehircilik Müdürlüğü