

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**NANO ÖLÇEKLİ KİRİŞLERİN STATİK YÜKLER ALTINDA YEREL
OLMAYAN ELASTİSİTE İLE OPTİMUM TASARIMI**

Serçil SOLMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KASIM 2017

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**

**NANO ÖLÇEKLİ KİRİŞLERİN STATİK YÜKLER ALTINDA YEREL
OLMAYAN ELASTİSİTE İLE OPTİMUM TASARIMI**

Serçil SOLMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KASIM 2017

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANO ÖLÇEKLİ KİRİŞLERİN STATİK YÜKLER ALTINDA YEREL
OLMAYAN ELASTİSİTE İLE OPTİMUM TASARIMI**

Serçil SOLMAZ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KASIM 2017

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANO ÖLÇEKLİ KİRİŞLERİN STATİK YÜKLER ALTINDA YEREL
OLMAYAN ELASTİSİTE İLE OPTİMUM TASARIMI**

Serçil SOLMAZ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez / / 201..... tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ömer CİVALEK (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Bekir AKGÖZ

Yrd. Doç. Dr. Mehmet AVCAR

ÖZET

NANO ÖLÇEKLİ KİRİŞLERİN STATİK YÜKLER ALTINDA YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE İLE OPTİMUM TASARIMI

Serçil SOLMAZ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Kasım 2017, 47 sayfa

Bu çalışmada Euler – Bernoulli varsayımı kullanılarak çeşitli sınır şartlardaki nanokirişlerin statik yükler altında optimum tasarımı yapılmıştır. Nanokirişler, karbon nanotüp (CNT) ve boron nitrit nanotüp (BNNT) gibi nanoteknoloji biliminde yüksek öneme sahip malzemelerden modellenmiştir. Gerilme ve deplasman kısıtları altında tanımlanan optimum tasarım problemi, bir evrimsel optimizasyon metodu olan Sosyal Örümcek Optimizasyonu (SSO) algoritması kullanılarak çözüme kavuşturulmuştur. Optimum kesit alan sonuçları üzerinde nanomalzeme tipinin, eleman uzunluğunun, dış yüklerin türünün ve büyüklüğünün etkisi incelenmiştir. Nanoyapının atomik yapısından kaynaklanan yerel olmayan parametrenin sonuçlara nasıl etki ettiği üzerinde durulmuştur.

Sonuçlara bakıldığında zaman uzunluk ve yükleme gibi parametrelerin değeri arttıkça optimum kesit alanının da arttığı görülmüştür. Küçük uzunluklarda dairesel kesitin, yüksek uzunluklarda dikdörtgensel kesitin daha optimum olduğu görülmüştür. Ayrıca, maksimum eğilme etkisi eşit olacak şekilde şiddetleri seçilmiş düzgün yayılı yük ve tekil yükler altındaki bir kirişin optimum kesit alanları arasında fark bulunmaktadır. Nanomalzemelerin etkisine bakıldığında zaman BNNT ile bulunan kesit alan değerleri CNT ile bulunan değerlerden daha azdır. Ayrıca, yerel olmayan teori kullanıldığında optimum kesit alan değerleri artış göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Boron nitrit nanotüp, eğilme, karbon nanotüp, nanokiriş, nanoteknoloji, optimizasyon, yerel olmayan elastisite.

JÜRİ: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Yrd. Doç. Dr. Bekir AKGÖZ

Yrd. Doç. Dr. Mehmet AVCAR

ABSTRACT

OPTIMAL DESIGN BASED ON NONLOCAL ELASTICITY OF STATIC LOADED NANOBEAMS

Serçil SOLMAZ

MSc. Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

November 2017, 47 pages

In this thesis, optimal design of nanobeams under difference boundary conditions and static loads have been investigated by Euler – Bernoulli bending hypotesis. Nanobeams have been modeled such carbon nanotube (CNT) and boron nitride nanotube (BNNT) that are important for nanotechnology. The optimal design problem that has been defined under stress and displacement conditions is solved by using the Social Spider Optimization (SSO) algorithm that is evolutionary optimization method. Optimal cross – section area results have been examined according to effects of material type, beam length, type and magnitude of external loads. How affects the optimal cross-section area results of nonlocal parameter has been investigated.

When the optimal design results of bending elements are investigated, optimal cross – section area has increased as value of length and loading are increasing. It has been understood circular section for small lengths and rectangular section for large lengths are optimum. Furthermore, optimal cross – section area values of beam are different under the uniform and point load that are its maximum bending effect is equal. Optimal cross – section area values for CNT are less than calculated values for BNT. On the other hand, optimal cross – section area values have increased for nonlocal elasticity theory.

KEYWORDS: Bending, boron nitride nanotube, carbon nanotube, nanobeam, nanotechnology, nonlocal elasticity, optimization

COMMITTEE: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Asst. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

Asst. Prof. Dr. Mehmet AVCAR

ÖNSÖZ

Günümüzün teknolojisi ile üretilmiş olan ürünlere bakıldığında bu ürünler, öncekilerine göre daha dayanıklı, daha az yer kaplayan ve daha hafif bir konuma gelmiştir. Bu durumun arkasında nanoteknoloji biliminin uygulamaları bulunmaktadır. Nanoteknoloji, atomik ve atomik altı seviyedeki birimleri ifade etmek ve bu boyutlarda maddenin kontrolünü yapmak için kullanılan bir bilim dalıdır ve 1 – 100 nanometre (nm) arasındaki ölçülerle ilgilenmektedir.

Nanoteknolojiye ilginin artmasından dolayı bilimsel çalışmalar da hızla artmıştır. Bu durum mekanik bilimini de yakından ilgilendirmektedir ve bu iki bilim dalını sentezleyen çalışmalar literatürde yerini almıştır.

Nanocihazların tasarımında karşılaşılan nano yapının maruz kaldığı mekanik zorlamalar iyi analiz edilmelidir. Bu tez çalışması ile nano-elektro-mekanik sistemler (NEMS) teknolojisi ürünlerinin tasarımına etki eden eğilme mevzusunun kavranması ve eğilme elemanlarının (kirişlerin) optimum tasarımı sağlanacaktır. Optimum tasarıma yerel olmayan elastisitenin etkisinden söz edilecektir. Nano ölçekteki eğilme elemanlarının modellenmesinde ve analizinde ahşap, çelik veya betonarme gibi geleneksel yapı malzemelerine göre kat be kat güçlü olan karbon nanotüp (CNT) ve boron nitrit nanotüp (BNNT) malzemeleri kullanılmıştır.

Bu tezin tamamen erdirilmesine kadarki süreçte her türlü desteği gösteren danışman hocam sayın Prof. Dr. Ömer CİVALEK başta olmak üzere, Hayri Metin NUMANOĞLU'na, Arş. Gör. Çiğdem IŞIK'a ve Arş. Gör. Kadir MERCAN'a, en içten teşekkürlerimi sunar, ayrıca her daim yanımda olan aile üyelerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	2
2.1. Naonteknoloji Bilimi.....	2
2.2. Nanomalzemeler.....	4
2.2.1. Karbon nanotüpler (CNT)	4
2.2.2. Boron nitrit nanotüpler (BNNT).....	7
2.3. Optimizasyon Kavramı.....	9
3. MATERYAL VE METOT	10
3.1. Eğilme Elemanlarında Diferansiyel Denge Denklemleri	10
3.2. Euler – Bernoulli Eğilme Varsayımları	11
3.3. Kirişlerin Elastik Eğrisi	14
3.4. Uygulamalar	16
3.5. Optimizasyon Problemi	23
3.5.1. Amaç ve sınır fonksiyonlar.....	23
3.5.2. Sosyal örümcek optimizasyonu (SSO) algoritması	24
3.6. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi	25
3.6.1. Euler – Bernoulli kirişinin yerel olmayan eğilmesi.....	26
4. BULGULAR.....	29
5. TARTIŞMA	42
6. SONUÇLAR	43
7. KAYNAKLAR	44
8. EKLER.....	47
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Nanoölçekli kirişlerin statik yükler altında yerel olmayan elastisite ile optimum tasarımı” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak bulunduğunu belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

01/11/2017

Serçil SOLMAZ



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	: Malzeme iç karakteristik uzunluğu
b	: Dikdörtgen kesitin eni
c_i	: İntegral sabitleri ($i = 1,2,3,4$)
C_{klmn}	: Dördüncü mertebeden elastisite tansörü
d	: Diferansiyel operatörü
D	: Dairesel kesitin çapı
e_0	: Malzeme sabiti
E	: Elastisite modülü
ε_{ij}	: Yerel olmayan gerilme
ε_z	: Eğilme şekil değiştirmesi
f_j	: Kütlesel kuvvet
ϕ	: Malzeme iç ve dış uzunlukları oranı
h	: Dikdörtgen kesitin yüksekliği
I_x	: Atalet momenti
κ	: Eğrilik
L	: Çubuğun uzunluğu
L_0	: Doğrusal diferansiyel operatörü
λ, μ	: Lamé sabitleri
M_x	: Eğilme momenti
M_{xx}	: Yerel olmayan moment iç tesiri
M^c	: Klasik eğilme momenti
μ	: Yerel olmayan parametre
P	: Tekil yük
ρ	: Eğrilik yarıçapı, cismin kütleli yoğunluğu

S_v : Deplasman sınır fonksiyonu

S_σ : Gerilme sınır fonksiyonu

σ : Eğilme gerilmesi

σ_{ij} : Yerel olmayan gerilme

σ_{ij}^c : Klasik gerilme

σ_{mak} : Maksimum gerilme

σ_{limit} : Gerilme sınırı

u_{ij} : Yer değiştirme vektörü

v : Çökme

v_{mak} : Maksimum çökme

v_{limit} : Çökme sınırı

q : Yayılı yük

V : Cismin hacmi

V_y : Kesme kuvveti

x : x – Koordinatı

y : y – Koordinatı

z : z – Koordinatı

Bu tez çalışmasında sayıların ondalık kısmı nokta (.) ile ayrılmıştır.

Kısaltmalar

ABC	: Artificial bee colony (Yapay arı kolonisi)
AC	: Ant colony (Karıncı kolonisi)
AKM	: Atomik kuvvet mikroskobu
BNNT	: Boron nitrit nanotüp
C – F	: Cantilevered – Free (İzostatik konsol kiriş)
CNT	: Karbon nanotüp
ÇDKNT	: Çok duvarlı karbon nanotüp
DNA	: Deoksiribo Nükleik Asit
GA	: Genetic algorithm (Genetik algoritma)
GPa	: Gigapascal
HS	: Harmony search (Harmoni arama)
m	: Metre
MPa	: Megapascal
nm	: Nanometre
nN	: Nanonewton
SSA	: Social spider algoritma (Sosyal örümcek algoritması)
S – S	: Simply supported – Simply supported (Her iki ucu basit mesnetli kiriş)
TDKNT	: Tek duvarlı karbon nanotüp
TPa	: Terapascal
TTM	: Taramalı tünelleme mikroskobu
TEM	: Taramalı elektron mikroskobu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Alan etkili karbon nanotüp transistörü (Kösegil Toksöz 2010)	3
Şekil 2.2. Motorize araba (Tepe 2007)	3
Şekil 2.3. Karbon elementinin hibritleşme türleri a) sp etkileşimi b) sp^2 etkileşimi c) sp^3 etkileşimi (Tepe 2007)	4
Şekil 2.4. Grafen tabaka (Anonymous 1)	4
Şekil 2.5. Karbon nanotüplerin tüp sayısına göre çeşitleri a) Tek duvarlı karbon nanotüpler (Anonim 1) b) Çok duvarlı karbon nanotüpler (Anonymous 2)	5
Şekil 2.6 Grafen tabakanın kıvrılma yönüne göre yapı çeşitleri a) Koltuk b) Zigzag c) Kiral (Rafii-Tabar 2008)	5
Şekil 2.7. Bor nitrit nanotüpün atomik konfigürasyonu: Rulo üzerinde birbirini takip eden bor (B) ve azot (N) atomları (Anonim 2)	7
Şekil 2.8. Bor nitrit nanotüpün TEM ile görüntülenmesi (Yürüm vd. 2011)	8
Şekil 3.1. Gelişigüzel yayılı yüke maruz kalan çubuk ve bu çubuktan çıkarılmış diferansiyel elemanın serbest cisim diyagramı	10
Şekil 3.2. Saf eğilme momenti M_x 'e maruz çubuk ve çeşitli şekil değişimi hallerinin çubuk kesit üzerinde betimlenmesi	11
Şekil 3.3. Eğilmiş geometrideki halin eğrilik merkezi ve eğrilik yarıçapı	12
Şekil 3.4. Basit eğilme altındaki kesitin, ayırma yüzeyinin dış zorlama ve iç tesirler altında dengesi.....	13
Şekil 3.5. Her iki ucu basit mesnetli ve L açıklığı boyunca q yayılı yükü ile yüklü dolu gövdeli kiriş.....	16
Şekil 3.6. Her iki ucu basit mesnetli ve açıklığının yarısında P tekil yükü ile yüklü dolu gövdeli kiriş.....	17
Şekil 3.7. İzostatik konsol ve L açıklığı boyunca q yayılı yükü ile yüklü dolu gövdeli kiriş.....	21
Şekil 3.8. İzostatik konsol ve serbest ucunda P tekil yükü ile yüklü dolu gövdeli kiriş.....	22
Şekil 4.1. Farklı malzemelerden imal edilmiş $S - S$ ve $C - F$ kirişlerinin artan açıklık değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri ($q = 0.05 \text{ nN/nm}$)	33
Şekil 4.2. Farklı malzemelerden imal edilmiş $S - S$ ve $C - F$ kirişlerinin artan açıklık değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri ($P = 0.0025L \text{ nN}$)	33

Şekil 4.3. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S ve C – F kirişlerinin artan yayılı ve tekil yükleme tipleri için optimum kesit alan değerleri a) Yayılı yüklü b) Tekil yüklü ($L = 50 \text{ nm}$).....	34
Şekil 4.4. farklı malzemelerden imal edilmiş S – S ve C – F kirişlerinin artan açıklık değerleri ve farklı yayılı ve tekil yük değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri a) CNT b) BNNT.....	35
Şekil 4.5. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S kirişlerinin artan yayılı yük değerleri ve farklı uzunluk değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri a) CNT b) BNNT.....	36
Şekil 4.6. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S kirişlerinin artan yayılı yüke eşit eğilme etkisi verecek biçimde seçilmiş tekil yük değerleri ve farklı uzunluk değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri a) CNT b) BNNT.....	37
Şekil 4.7. Farklı malzemelerden imal edilmiş C – F kirişlerinin artan yayılı yük değerleri ve farklı uzunluk değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri a) CNT b) BNNT	38
Şekil 4.8. Farklı malzemelerden imal edilmiş C – F kirişlerinin artan yayılı yüke eşit eğilme etkisi verecek biçimde seçilmiş tekil yük değerleri ve farklı uzunluk değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri a) CNT b) BNNT.....	39
Şekil 4.9. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S kirişlerinin artan açıklık değerleri ve birbirine göre maksimum eğilme etkisi eşit olacak biçimde seçilmiş farklı yayılı ve tekil yük çifti değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri a) CNT b) BNNT	40
Şekil 4.10. Farklı malzemelerden imal edilmiş C – F kirişlerinin artan açıklık değerleri ve birbirine göre maksimum eğilme etkisi eşit olacak biçimde seçilmiş farklı yayılı ve tekil yük çifti değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri a) CNT b) BNNT	41

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Tek ve çok duvarlı karbon nanotüplerin karşılaştırmalı özellikleri (slideshare.net)	5
Çizelge 2.2. Bazı malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması (Özer 2008, Hançer 2010, Chen 2014)	8
Çizelge 4.1. Çeşitli mesnetlenme ve yüklenme tipindeki iki farklı malzemeden imal edilmiş kirişlerin çeşitli açıklık L (nm) değerleri için optimum kesit alan değeri (nm^2)	30
Çizelge 4.2. Çeşitli uzunluktaki S – S kirişleri için çeşitli değerlerdeki yayılı yük ve tekil yük durumunda optimum kesit alan (nm^2) değerlerinin iki farklı malzeme için karşılaştırılması	30
Çizelge 4.3. CNT'den imal edilmiş S – S kirişlerinin iki farklı yayılı yük değeri için elde edilen optimum kesit alan (nm^2) sonuçlarının bu tez çalışması ve ilgili referans ile karşılaştırılması	31
Çizelge 4.4. CNT'den imal edilmiş çeşitli uzunluktaki S – S kirişlerinin $q = 0.005$ nN/nm yayılı yüke maruz kalması durumunda elde edilen optimum kesit tipleri ve kesit alanları ile beraber optimizasyon kısıtlarının durumu	31
Çizelge 4.5. CNT'den imal edilmiş çeşitli uzunluktaki C – F kirişlerinin $q = 0.005$ nN/nm yayılı yüke maruz kalması durumunda elde edilen optimum kesit tipleri ve kesit alanları ile beraber optimizasyon kısıtlarının durumu	31
Çizelge 4.6. İki farklı malzemeden imal edilmiş çeşitli uzunluktaki S – S kirişlerinin farklı şiddetteki tekil yük değeri için elde edilen optimum kesit alan değerleri (nm^2)...	32
Çizelge 4.7. İki farklı malzemeden imal edilmiş çeşitli uzunluktaki C – F kirişlerinin farklı şiddetteki tekil yük değeri için elde edilen optimum kesit alan değerleri (nm^2)...	32

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojinin ürünleri, öncekilerine göre daha hafif, daha az yer kaplayan, daha dayanıklı, daha farklı ısısal ve elektriksel özelliklere sahiptir. Ürünlerin boyutu küçüldükçe atomik yapı teknolojinin içerisinde etkisini göstermektedir. Üretimi gerçekleştirilebilen yepyeni özellikli malzemeler tıptan havacılığa, elektronikten malzeme bilimine birçok sektöre ciddi bir etkide bulunmuştur.

Tabi atomsal boyutun işin içine girmesi, yapılan çalışmaların takibini zorlaştırmıştır. 1980’li yıllarda taramalı tünelleme mikroskobu (TTM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AKM)’nin geliştirilmiş olması ile atomlar izlenebildiği gibi taşınabilmektedir, işte bu çalışmalar atomik ve atomik altı seviyedeki çalışmaların daha da hızlanmasını sağlamıştır (Akgöz 2010).

Nanoyapıların tasarımı aşamasında, bu yapıların maruz kalabileceği burkulma, eğilme ve titreşim gibi mekanik zorlamalardan dolayı görülebilecek davranışın iyi analiz edilebiliyor olması önem taşır (Işık 2011). Bununla beraber yapıların optimum tasarımı mevzusu da, önem taşıyan başka bir mühendislik problemidir. Bu tez çalışması giriş elemanların nano – ölçekteki eğilme davranışını açıklayacak olup bu ölçekte bir optimum tasarım yapılmasını da amaçlamıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Nanoteknoloji Bilimi

Nano, Yunanca *nannos* kelimesinden gelir ve *cüce* anlamını taşır. Ölçü birimlerinden olan nanometre (nm), metrenin (m) 10^{-9} katıdır. Atomik ve moleküler seviyedeki birimleri ifade etmek ve bu boyutlarda maddenin kontrolünü yapmak için kullanılan nanoteknoloji kısaca "Atomik boyuttaki sistemlerin mühendisliği" olarak tanımlanır ve nanoteknoloji, nanometre mertebesindeki ölçülerde uğraş alanı bulur (Toksöz 2010).

Öncekilerine göre daha dayanıklı, daha dayanımlı, daha hafif ve daha az yer kaplayabilen ürünlerin üretimi bu bilim dalında ele alınır. Çağ ilerledikçe insanlar daha küçük cihazları hayatlarında kullanımlarına almaktadırlar. Bu söylenenlere göre nanoteknoloji biliminin çağımızın vazgeçilmezi olacağı açıktır.

Nanoteknolojik çalışmaların temelinde iki farklı husus yatar. Bunlardan birincisi atomların istenildiği gibi hareket ettirilebiliyor ve düzenlerinin istenildiği gibi değiştirilebiliyor olmasıdır. Atomik yapıya inildiğinde o malzemenin çok daha farklı özellikleri ortaya çıkmaktadır. İkincisi, atomik yapıya inildiğinde klasik fizik kuralları artık geçerliliğini kaybetmeye başlar ve atomik boyutlardan kaynaklı etkiler incelenen problemde kendisini göstermeye başlar.

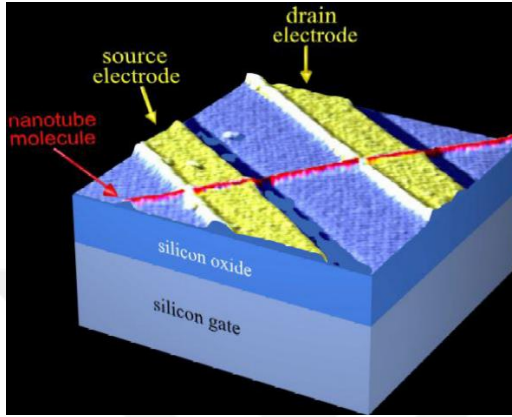
Nano yapıya yeni bir atom eklendiği zaman atomik yapının fiziksel özellikleri değişir. Bu özellikler eklenen atomun cinsine, nanoyapının türüne ve geometrisine bağlı olarak değişkenlik gösterir (Çıracı 2006).

Bu bilim dalının çalışma kapsamının ölçümsel büyüklüğüne örnekler verilecek olursa, 10 adet yanyana duran hidrojen atomunun çapı 1 nm, DNA sarmalı yaklaşık 2.5 nm, kırmızı kan hücreleri 1000 nm, toplu iğne başı 10^6 nm boyutlarındadır (Cireli vd. 2006).

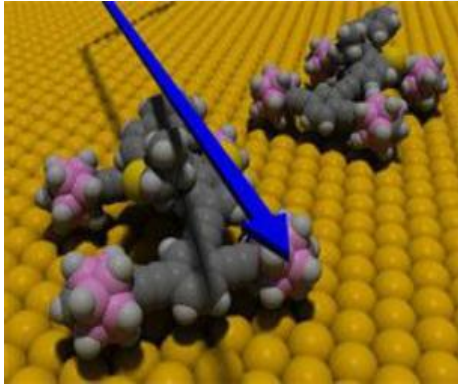
Nanoteknoloji biliminin kronolojisinden aşağıda maddeler halinde bahsedilebilir:

- Nobel fizik ödülü sahibi Richard Feynman 1959'daki konferansında moleküler düzeyde biyolojik makinaların üretimi gerçekleştirilebileceğini ve bunun yeni icatlara ilham kaynağı olabileceğini vurguladı ve bu fikir nanobilimin temellerini attı.
- N. Taniguchi 1974 yılında yazmış olduğu bir makalede nanoteknolojiyi tanımladı: Buna göre nanoteknoloji, "maddelerin bir atom ya da molekül tarafından ayrılması, birleştirilmesi ve bozulması yöntemi" olarak tanımlandı. (Seçgin 2010)
- 1981 yılında G.K. Binnig ve H. Rohrer atomları görüntülemek için TTM'yi keşfetti.
- 1986 yılında G.K. Binnig, C.F Quate ve C. Gerber AFM'yi keşfetti
- 1987 yılında elektriğin kuantum özelliği keşfedildi.
- 1989 yılında IBM'in Zürich'teki Almaden Araştırma Merkezinde 35 tane Ksenon atomu bir araya getirilerek IBM yazısı yazıldı.

- 1991 yılında çok duvarlı karbon nanotüpler keşfedildi.
- 1993 yılında tek duvarlı karbon nanotüpler keşfedildi.
- 1998 yılında C. Dekker ve çalışma arkadaşları alan etkili karbon nanotüp transistörü (TUBEFET) icat etti.
- 2001 yılında ZnO maddesinden nanotel lazeri yapıldı.
- 2005 yılında Rice Üniversitesi'nden bazı araştırmacılar ilk defa dört tekerlekli nanoaraba modelini hareket ettirdiler.



Şekil 2.1. Alan etkili karbon nanotüp transistörü (Toksöz 2010)



Şekil 2.2. Motorize araba (Tepe 2007)

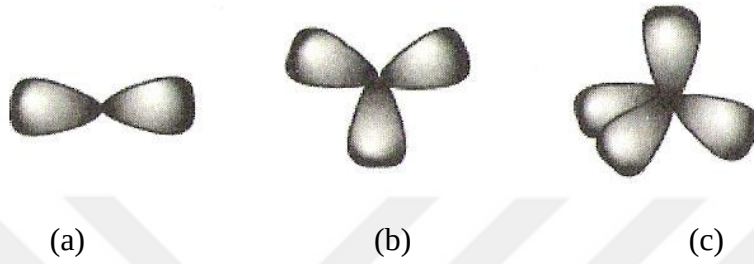
Nanoteknoloji biliminin uygulamalarının görüldüğü bazı sektörler aşağıdaki gibidir:

- Sağlık sektörü
- Elektrik, elektronik, manyetizma ve bilgisayar teknolojileri
- Havacılık ve uzay
- Çevre ve enerji
- Biyoteknoloji ve tarım
- İnşaat ve mimari
- Kozmetik
- Askeriye ve Savunmacılık.

2.2. Nanomalzemeler

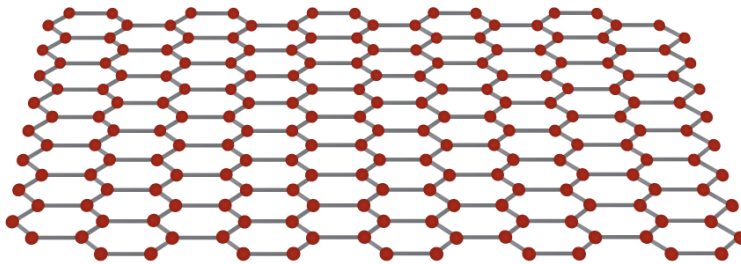
2.2.1. Karbon nanotüpler (CNT)

Karbon, periyodik tablonun IV. Grup II. Periyot elementidir. Karbon elementinin atomları birbiri ile sp , sp^2 ve sp^3 ve ile tanımlanan üç farklı biçimde etkileşirler (hibritleşirler). Bu etkileşimler farklı bağlanma geometrisini belirtir ve bunlar Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



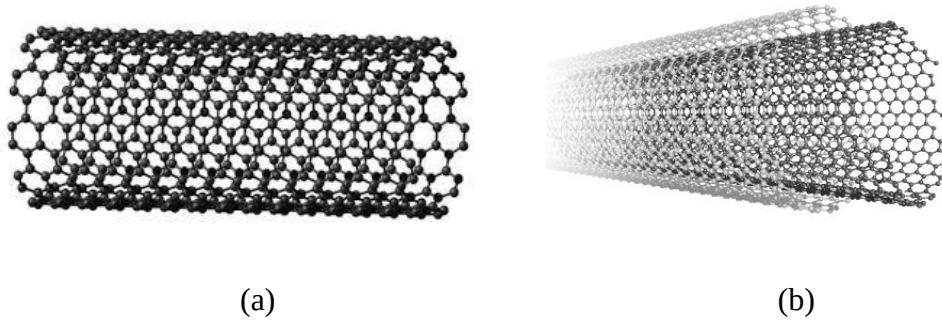
Şekil 2.3. Karbon elementinin hibritleşme türleri a) sp etkileşimi b) sp^2 etkileşimi c) sp^3 etkileşimi (Tepe 2007)

Nanoteknoloji kullanılarak imal edilen pek çok üründe karbon nanotüp denilen bir nano malzeme kullanılır. Karbon nanotüpler, karbon elementinin allotropu olan ve grafen denilen bir tabakanın tek veya çok sayıda katman oluşturup bu katmanların rulo gibi sarılıp iç içe geçmesi suretiyle oluşur.



Şekil 2.4. Grafen tabaka (Anonymous 1)

Japon NEC Firması araştırmacılarından S. Iijima, gerçekleştirmiş olduğu ark – buhar sentezi deneyleri ile 1991 yılında tüp yapıları Geçirmeli Elektron Mikroskobu ile gözlemleyerek keşfetti. Deneyde kullanmış olduğu grafit malzemesi rulo gibi sarılarak tüp biçimini alır. Iijima, 1991'deki deneylerinde çok duvarlı karbon nanotüp yapısını, 1993 yılında ise tek duvarlı karbon nanotüp yapısını keşfetmiştir. Yapıdaki tüp sayısı, yapının fiziksel, elektronik, mekanik, optik birçok özelliğini değişiklik göstermesine sebebiyet vermektedir. Duvar sayısına göre konfigürasyonlar Şekil 2.5'te görüldüğü gibidir.



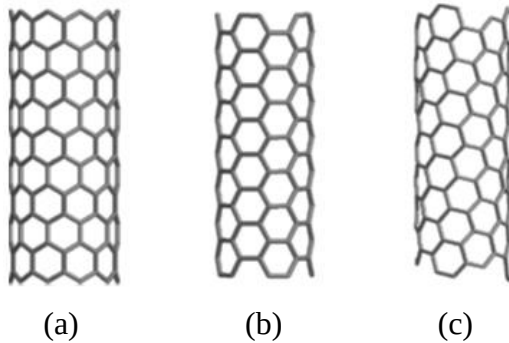
Şekil 2.5. Karbon nanotüplerin tüp sayısına göre çeşitleri a) Tek duvarlı karbon nanotüpler (Anonim 1) b) Çok duvarlı karbon nanotüpler (Anonymous 2)

Tek duvarlı karbon nanotüpler nanotüp yapısını açıklayan en basit modeldir. Bu modelde uçlar genelde kapalıdır ve çapları genelde 1 nm kadardır. Çok duvarlı yapılarda ise iki tüp arası uzaklık tüpü oluşturan atomlardan daha fazladır ve mesafe genelde 0.34 nm kadardır. Aşağıdaki tabloda tek duvarlı karbon nanotüplerin (TDKNT) ve çok duvarlı karbon nanotüplerin (ÇDKNT) karşılaştırmalı bazı özellikleri görülebilir.

Çizelge 2.1. Tek ve çok duvarlı karbon nanotüplerin karşılaştırmalı özellikleri (Anonim 1)

Özellik	TDKNT	ÇDKNT
Dış çap (nm)	1 – 2	~8
İç çap (nm)	0.8 – 1.6	2 – 5
Uzunluk (µm)	5 – 30	10 – 30
Özgül yüzey (m ² /g)	407	500
Elektriksel iletkenlik (S/cm)	0.01	0.01

Karbon nanotüp yapıları, Grafen yapısındaki karbon atomlarının kıvrılma şekline göre üçe ayrılır. Bunlar koltuk, zigzag ve kiral kıvrılma modelleridir ve Şekil 2.6'da görüldüğü gibidir.



Şekil 2.6. Grafen tabakanın kıvrılma yönüne göre yapı çeşitleri a) Koltuk b) Zigzag c) Kiral (Rafii-Tabar 2008)

Şekil 2.6’da görülen yapısal değişiklik, metalik ya da yarı metalik özellikleri etkiler, bunun yanı sıra yapısal deformasyon ve elektronik özellikler de değişiklik gösterebilir. Karbon nanotüplerin ağırlığı oldukça hafiftir, elastisite modülleri oldukça yüksektir. Karbon nanotüpler ağırlığının 300 milyon katı bir ağırlığa dayanabilmektedir, bununla beraber çelikten kat kat güçlüdür (Çıracı 2005). Tek duvarlı küçük çaplı nanotüplerin gerilme mukavemeti 45.000 MPa olarak belirlenmiştir (Erkoç 2001).

Mekanik özelliklerle ilgili diğer bilgiler verilecek olursa KNT lerin mekanik özellikleri birçok araştırmacı tarafından deneysel ve bilgisayar simülasyon metodları kullanılarak geniş olarak incelenmiştir. ÇDKNT’lerin elastisite modülünün ilk deneysel incelemesi Treacy vd. (1996) tarafından gerçekleştirildi. Isısal titreşim yöntemi kullanılarak tüplerin elastisite modülü 0.40 – 4.15 TPa aralığında ölçüldü. Krishnan vd. (1998) tarafından TDKNT’lerin elastisite modülünün 0.9-1.9 TPa aralığında olduğu da tespit edilmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen deneylerde Taramalı Elektron mikroskobu içinde yer alan nano-gerilim aparatı kullanılarak, eksenel germe altında ÇDKNT’lerin eksenel dayanımı ölçüldü ve bu dayanımların 11-63 GPa arasında olduğu tespit edilmiştir. (Süngü 2006).

Karbon nanotüpler elektronik malzeme olarak manyetik ve optik nanoaygıt yapımında; hafıza elemanı, kapasitör, transistör, fotodiyot, mantık devresi ve elektronik anahtar yapımında kullanılır (Yaylı 2010). Bununla beraber nanotoplar optik sınırlayıcı olarak kullanılabildiği gibi ışıktan koruyucu ve yüzey kaplaması olarak da kullanılabılırler. Mikro mekanik sistemlerde de yüksek sıcaklığa dayanıklı olabilmesi sebebiyle kullanılmaktadırlar (Cenger 2006).

Karbon nanotüplerin elde edilmesi için bazı yöntemler vardır. Bunlardan ilki ark buharlaştırmadır. Bu yöntem, helyum ve argon atmosferinde iki elektrodun arasına elektrik akımı uygulanması işlemini kapsar. Elektrotlar iki grafen çubuktan oluşur. Akım genellikle 50-100 A kadardır. 5000 °C’de grafen buharlaşır. Anottan buharlaşan karbonun bir kısmı, katotta silindirik olarak tekrar buharlaşır. Bu silindirik tortunun merkezinde nanotüpler ve nano parçacıklar oluşur (Yükseltürk 2008).

Lazer buharlaşma yönteminde ise karbon buharlaştırılarak tek duvarlı karbon nanotüpler elde edilir. İlk verimli tek duvarlı karbon nanotüp üretimi, bu yöntemle yapıldı. Bu yöntem diğer yöntemlere göre daha maliyetlidir ve yüksek sıcaklık gerektirmesi açısından dezavantajlıdır (Yükseltürk 2008).

Kimyasal buhar yönteminde de katalizör görevi görececek olan demir, nikel veya kobalt gibi manyetik metalleri içeren bir substrat hazırlanır. Substrat 700 °C sıcaklığa kadar ısıtılır. Nanotüp oluşumunu başlatmak reaktörün içine amonyak, azot, hidrojen gazlarından biri ve karbon içeren asetilen, etilen, etanol, metan gibi gazlar verilir. Bu gazlar katalizörün yüzeyinde parçalanır ve katalizörün yanına yapışır. Sonuçta metal katalizör etrafında nanotüp oluşumu gerçekleşir (Yükseltürk 2008).

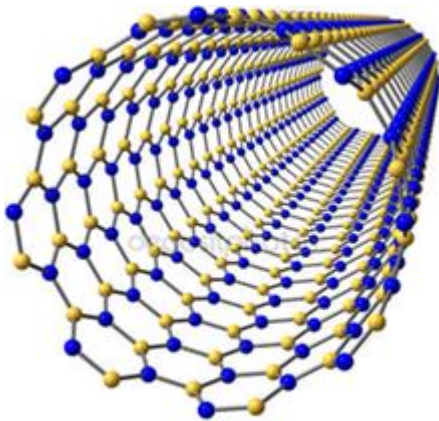
2.2.2. Boron nitrit nanotüpler (BNNT)

Boron nitrit nanotüpler, Birbirini takip eden bor (B) ve azot (N) atomlarından oluşan tabakanın rulo haline gelmesinden oluşur. Bu nanotüplerinin varlığı kuramsal olarak öngörülmüş ve deneysel olarak da gözlenmiştir (Zhi vd. 2005). Bor, periyodik sistemin III. Grup – II. Periyot elementidir. Azot ise V. Grup – II. Periyot elementidir.

Bor elementi Dünya'nın kabuğunda az miktarda yer alır. Ancak suda çözünürlüğü sebebiyle topraktan çeşitli mineraller şeklinde çıkarılabilir. Endüstride yüksek saflıkta bulunması zordur çünkü çoğunlukla başka elementlerle bileşik halinde bulunur. Bor elementi çamaşır tozunda beyazlatma işlevi, ısı yalıtımında cam elyafı bileşeni işlevi ile kullanılabilir. Yapı malzemelerinde, camlarda ve seramiklerde kullanılır (Anonim 2). Bor cevherleri ve kimyasallarından üretilen çok sayıdaki bor bileşikleri çok yüksek katma değere sahiptir, ileri teknoloji seramikler içerisinde bor esaslı maddelerin stratejik önemi büyüktür (Emrulloğlu vd. 2002).

Azot elementi havanın %78'ini kapsar. Gıda ve gübrelerde bulunabilir. Aminoasit, nitrik asit, siyanür gibi bileşiklerin yapısına katılır. Genel olarak renksiz ve kokusuzdur. Azot, önemli bir anorganik bileşiktir çünkü bitkiler tarafından gerçekleştirilen solunum ve fotosentez ile ilgili olan madde döngüleri, toprakta azot bileşiği yoksa yapılamaz (Anonim 3).

Bor nitrit nanotüplerin uçları karbon nanotüplere göre daha basıktır. Araştırmalar, bu tüplerin kompozitlerinin karbon nanotüp kompozitlerine göre daha iyi performans gösterdiğini söylemektedir. Bor nitrit nanotüplerin dayanıklılığı, karbon nanotüplerle neredeyse aynıdır fakat bor nitrit nanotüplerin asıl avantajı, kullanılan polimerlerle daha iyi bağ kurduğu için malzeme kalitesi daha iyi olmaktadır Kendi başlarına Kevlar'dan en az 30 kat daha güçlü olduğu tahmin edilmektedir. (Özbayram 2014).



Şekil 2.7. Bor nitrit nanotüpün atomik konfigürasyonu: Rulo üzerinde birbirini takip eden bor (B) ve azot (N) atomları (Anonim 2)

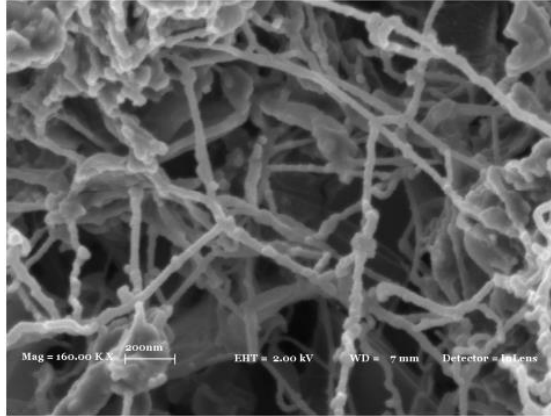
Farklı malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge 2.2’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 2.2. Bazı malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması (Özer 2008; Hançer 2010; Chen 2014)

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)	Yoğunluk (gr/cm ³)
BNNT	1200	33	0.5
CNT	1054	11	1.4
Çelik	208	1	7.3
Titanyum	103	0.434	4.5
Ahşap	16	0.008	0.4

Bor nitrit nanotüpler yalıtkan özelliğinden dolayı hidrojen depolayıcı olarak kullanılabilir, bu durum hidrojen enerjisi açısından önem taşır. Hidrojen enerjisi başta otomotiv gibi birçok sektör için önemlidir. Tekdüze bant açıklıkları sayesinde nano elektronik cihazlarda kullanılabilecek bir malzemedir (Yürüm vd. 2011).

Bor nitrit nanotüpler, ark deşarjı, lazerle kazıma, karbon nanotüp kalıplaması ve kimyasal buhar depolanması gibi farklı sıcaklık koşulu gerektiren yöntemlerle sentezlenebilir. Ancak verimsel düşüklük, yüksek sıcaklıklar, uygun katalizörün bulunamaması ve ürünlerin safsızlığı nedeniyle deneyler için optimum koşullar tam olarak belirlenememiştir (Yürüm vd. 2011).



Şekil 2.8. Bor nitrit nanotüpün TEM ile görüntülenmesi (Yürüm vd. 2011)

2.3. Optimizasyon Kavramı

Tanımlanmış bir amaç için belli koşullar altında tanımlanmış bir problemin çözümleri arasından en uygun olanın seçimine *optimizasyon* denir. Mesela bir eğilme elemanının bir takım statik yükler altında yapacağı maksimum sehmin kiriş açıklığının 300’de 1’inin altında kalıyor olmasının yanı sıra oluşacak maksimum gerilmenin de emniyetli eğilme dayanımının altında kalmasının istendiği bir problem ele alınsın. Malzeme tipinin tek olduğu kabul edilirse bu isteği sağlayacak çözüm öncelikle daire, dikdörtgen veya üçgen gibi kesitlere bağlıdır. Kesit tipinin yanı sıra kesitin boyutlarına da bağlıdır. Kesit tipi ve boyutunun bir eğilme elemanı için belli şartları sağlayacak şekilde seçimi bir optimizasyon problemidir.

Bir optimizasyon problemi, amaç fonksiyonu (goal function), tasarım değişkeni (design variables) ve kısıtlayıcılar (boundary conditions) ile anlam kazanır. Yukarıdaki paragrafta verilmiş olan örnekte amaç fonksiyonu problemi kısıtlar altında çözen minimum kesit alan miktarıdır. Kısıtlayıcılar maksimum sehmin sınırı (emniyetli sehmin) ve eğilme gerilmesi sınırı (emniyetli gerilme) olarak ortaya çıkmaktadır. Tasarım değişkenleri ise kesit tipi ve boyutlarıdır (Örneğin kare, dikdörtgen veya daire gibi kesit tipleri ve en, yükseklik gibi uzunluklar).

Evrimsel optimizasyon yöntemleri doğa olaylarını taklit ederek bir algoritma tasarlar ve algoritmayı program dillerinde kodlayarak çözüme ulaşmaya çalışır (Yetkin 2015). Evrimsel yöntemlerden bazıları Genetik Algoritma (Genetic Algorithm – GA), Harmoni Arama (Harmony Search – HS), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony – AC), Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony – ABC) ve Sosyal örümcek algoritmasıdır (Social Spider Algoritim – SSA) (Yetkin 2015)

Bu tez kapsamında tanımlanmış statik yükler altında eğilme elemanlarının optimum tasarım problemi sosyal örümcek algoritması ile çözüme kavuşturulacaktır. Bu nedenle SSA’nın üzerinde detaylıca durulacaktır. Giriş paragrafında verilmiş örnek problemin, aslında tez çalışmasının üzerinde duracağı problem olduğu söylenebilir.

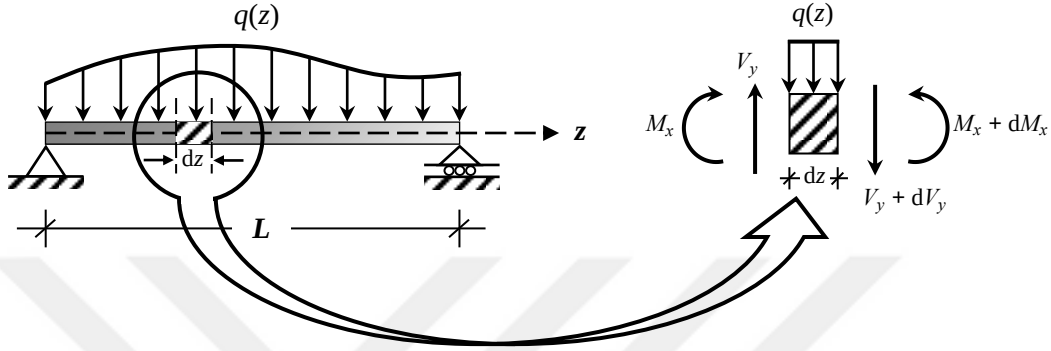
İnşaat mühendisliği bilimi içerisindeki bazı optimizasyon problemleri şöyle sıralanabilir:

- İstinat duvarı tasarımı
- Su ağ dağıtımı tasarımı
- Zemin stabilite analizi
- Açık kanallarının tasarımı
- Kafes sistemlerin tasarımı
- Betonarme/Çelik çerçeve sistemlerin tasarımı

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Eğilme Elemanlarında Diferansiyel Denge Denklemleri

Şekil 3.1’de görülen basit bir düzlem eğilme çubuğu ve bu çubuğa etkimekte olan gelişigüzel $q(z)$ yayılı yükü düşünölsün. Bu çubuğun oldukça küçük dz uzunluğundaki parçası çıkarılıp serbest cisim diyagramı çizilsin.



Şekil 3.1. Gelişigüzel yayılı yüke maruz kalan çubuk ve bu çubuktan çıkarılmış diferansiyel elemanın serbest cisim diyagramı

Şekil 3.1’de görülen serbest cisim diyagramı göz önüne alındığı zaman kuvvetlerin düşey doğrultudaki dengesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$\uparrow^+ \sum F_y = 0 \rightarrow V_y - (V_y + dV_y) - q(z) dz = 0 \rightarrow q(z) = -\frac{dV_y}{dz} \quad (3.1)$$

Denklemde görölen V_y kesme kuvvetidir. Bununla beraber serbest cismin eğilme dengesi de aşağıdaki gibi yazılmalıdır:

$$\begin{aligned} \curvearrowright^+ \sum M_x = 0 &\rightarrow -M_x + (M_x + dM_x) - (V_y + dV_y) dz - q(z) dz \frac{dz}{2} = 0 \\ &\rightarrow dM_x - V_y dz + \underbrace{dV_y dz}_{\approx 0} - \underbrace{q(z) dz \frac{dz}{2}}_{\approx 0} = 0 \rightarrow V_y = \frac{dM_x}{dz} \end{aligned} \quad (3.2)$$

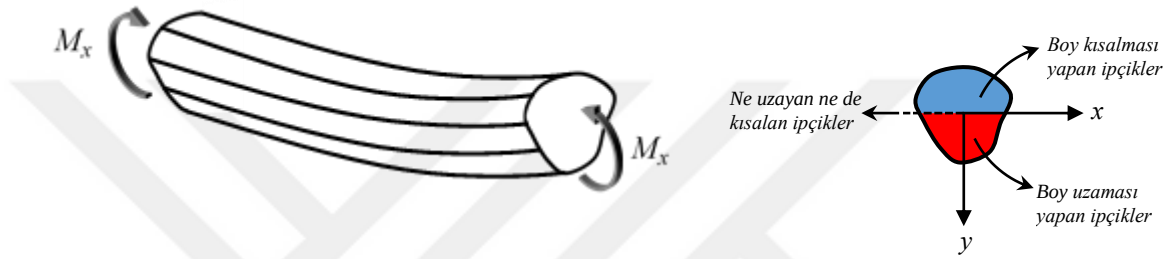
Denklem (3.2)’deki M_x eğilme momentidir. İkinci mertebeden diferansiyel ifadelerin denklemdeki diğer ifadeler yanında oldukça küçük kaldığı düşünöürse bunların çarpım hâlinde olduğu tüm ifadeler ihmal edilebilir haldedir, Denklem (3.2) bu söylenen doğrultusunda düzenlenmiştir.

Denklem (3.1) ve (3.2)’nin sonuçları olarak verilmiş türevsel ifadeler diferansiyel düzlem çubuğun diferansiyel denge denklemi olarak bilinir.

3.2. Euler – Bernoulli Eğilme Varsayımları

(3.2) Denkleminde de anlaşıldığı üzere kesme ve eğilme etkileri genelde bir arada olur ancak sadece eğilme iç tesiri altında da çubuklar dengede olabilir (Omurtag 2014).

Bir çubuk elemanda bir doğrultu boyunca alınan kalınlıksız çubuk parçasına ipçik (lifçik) denir ve eğilme zorlaması altındaki çubuk elemanlarda bazı ipçiklerin boyu uzar, bazı ipçiklerin boyu kısalır, bazı ipçiklerin ise boyu ne uzar ne de kısalır. Boyu değişmeyen bu ipçiklere *tarafsız ipçik* denir (Omurtag 2014). Şekil 3.2’de saf eğilme momenti M_x altında şekil değiştirmiş çubuk geometrisi görülmektedir.



Şekil 3.2 Saf eğilme momenti M_x 'e maruz çubuk ve çeşitli şekil değişimi hallerinin çubuk kesit üzerinde betimlenmesi

Şekil 3.2’deki kesit üzerindeki şekil değiştirme bölgelerinden de anlaşılaacağı üzere,

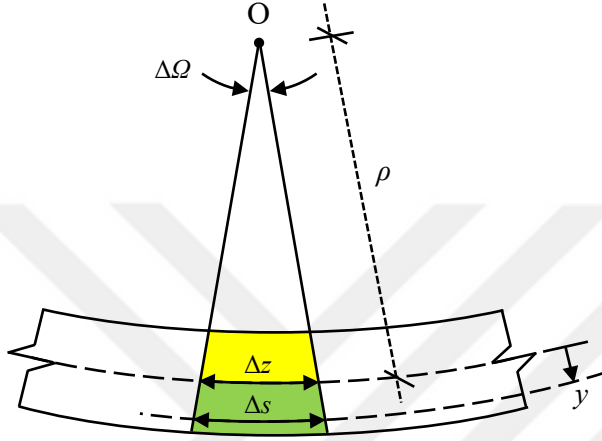
- $y > 0$ bölgesinde ipçiklerin boyu uzar, bu bölge çekme etkisi altında kalır.
- $y = 0$ bölgesinde ipçiklerin boyu değişmez, çünkü bu bölgede çekme veya basma etkisi yoktur. Bu bölgede yani xz düzleminde kalan ipçiklere tarafsız ipçikler denir.
- $y < 0$ bölgesinde ipçiklerin boyu kısalır, bu bölge basınç etkisi altında kalır. (Omurtag 2014)

Eğilme varsayımları, bir çubuğun eğilme olayından sonraki davranışını yorumlar (Omurtag 2014). Mukavemet bilimi içerisinde oldukça popüler iki eğilme varsayımı bulunmaktadır: Euler – Bernoulli ve Timoshenko kuramları. Euler – Bernoulli eğilme varsayımı *eğilmeden önce çubuk eksenine dik kalarak düzlem durumunda bulunan kesitler eğilmeden sonra da dik ve düzlem kalacaktır* ifadesine dayanır, başka bir deyişle kesitin kayma dönmelerinden kaynaklı deformasyonları ihmal edilir.

Kısa açıklıklı yüksek kirişler, ince cidarlı kesitler, yükün tekil etkidiği kirişler gibi durumlarda kesmenin eğilme üzerinde etkisi görülür (İnan 1970). Bu gibi durumlarda Euler – Bernoulli kirişi ile yapılan hesaplar ile gerçekçi sonuçlar elde edilemez. Bu varsayımın yerine Timoshenko tarafından önerilen, şekil değiştirme sonucunda düzlem kalan çubuk kesitleri çubuk eksenine dik kalmaz varsayımı daha iyi sonuçlar verir (Omurtag 2014). Euler – Bernoulli çubuk kuramında ihmal edilen kayma

deformasyonları Timoshenko kuramında ihmal edilmez ve kesit üzerinde sabit kabul edilir.

Bu tez kapsamındaki tüm analizler Euler – Bernoulli varsayımı kullanılarak gerçekleştirilecektir. Bunun öncesinde varsayımın formülasyonundan aşağıda bahsedilecektir. Eğilme şekil değiştirmesi yapmış cisim tekrardan düşünölsün. Şekil 3.3'teki şekil değiştirmiş cismin, tarafsız ipçığı ile şekil değiştirmiş haliyle ilgili eğrilinin merkezi olan O noktası arasındaki mesafe eğrilik yarıçapını belirtir.



Şekil 3.3. Eğilmiş geometrideki halin eğrilik merkezi ve eğrilik yarıçapı

Şekil 3.3'te O merkezli yayın yarıçapı, şekil değiştirmiş halin (elastik eğrinin) eğrilik yarıçapıdır ve ρ ile gösterilir. Eğilme şekil değişimini analizinin yapılacağı y düzeyindeki koordinata denk gelen ipçığın O merkezli ve $\Delta\Omega$ merkez açılı dilimle kesişimi olan bölgedeki yay uzunluğu Δs , tarafsız eksene denk gelen ipçığın yine aynı dilimle kesişimi olan bölgedeki yay uzunluğu Δz ile gösterilecektir. Şekil değiştirme, uzunluk değişiminin ilk uzunluğa oranı olduğu için, çubuk eksenine göre şekil değişimi miktarı,

$$\varepsilon_z = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta s - \Delta z}{\Delta z} = \frac{(\rho + y)\Delta\Omega - \rho\Delta\Omega}{\rho\Delta\Omega} = \frac{y}{\rho} \quad (3.3)$$

olacak şekilde bir limitle hesaplanır.

Bir eğrinin bir yayından atılan teğetin oldukça küçük uzunlukta olması durumunda bu teğete ait yayın merkez açısının yay uzunluğuna oranına *eğrilik* denir. Şekil 3.3 üzerinden eğrilik şöyle tanımlanır:

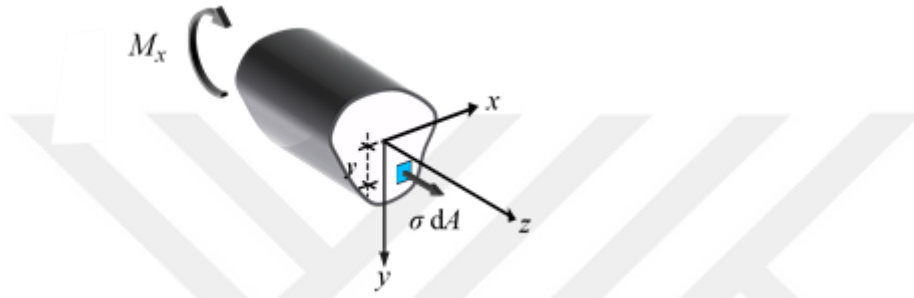
$$\kappa = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta\Omega}{\Delta z} = \frac{d\Omega}{dz} = \frac{1}{\rho} \quad (3.4)$$

Burada κ eğriliği belirtir. Yay uzunluğu Δz , o kadar küçük olmalıdır ki limiti sıfıra gittiği zaman türev işlemine geçilebilmelidir. $\Delta z = \rho \Delta \Omega$ olduğundan dolayı (3.4) ifadesi eşitliğin en sağındaki gibi düzenlenebilir. (3.3) Denkleminde eğrilik yarıçapı çekilip (3.4)'te yerine yazılırsa

$$\varepsilon_z = \kappa y \quad (3.5)$$

şeklinde yazılan denklem şekil değiştirme – eğrilik ilişkisini ifade eder.

Basit eğilme etkisindeki kesiti tekrardan ele alalım. Şekil 3.4'te görülen ve eğilme zorlaması altındaki çubukta ayırma yüzeyindeki denge denklemleri yazılacaktır.



Şekil 3.4. Basit eğilme altındaki kesitin, ayırma yüzeyinin dış zorlama ve iç tesirler altında dengesi

Dış eğilme zorlaması M_x 'i iç tesirlerin x – eksenini etrafında oluşturacağı eğilme momenti iç tesiri dengelemektedir. Basit eğilme mevzuu incelendiğinden sadece x – eksenine göre denge denkleminin yazılması yeterli olacaktır. Buna göre diferansiyel iç kuvvet ve bunun x – eksenini etrafında oluşturacağı eğilme momenti sırasıyla (3.6) ve (3.7) denklemlerinde yazıldığı gibidir.

$$dF = \sigma dA \quad (3.6)$$

$$dM = y dF = \sigma y dA \quad (3.7)$$

Burada dF diferansiyel iç kuvvet, dM diferansiyel eğilme momenti, σ eğilme gerilmesi, y koordinat ve dA diferansiyel elemanın alanıdır.

Denklem (3.7) her iki tarafından integre edilirse

$$M = \int \sigma y dA \quad (3.8)$$

olarak eğilme iç tesiri yazılır. Ayrıca elastisitenin en temel bağıntısı olan gerilme – şekil değiştirme ilişkisi Denklem (3.5)'te yerine yazılacak olursa

$$\sigma = E \kappa y \quad (3.9)$$

elde edilir. Bu ifadede görülen E elastisite modülüdür. Gerilme ifadesi (3.7)'de yerine koyulduğunda

$$M = \int E\kappa y^2 dA = E\kappa \int y^2 dA \quad (3.10)$$

yazılır. Denklem (3.10)'un en sağdaki denklemin içinde görülen integral, bir kesit özelliği olan x – eksenine göre ikinci mertebeden alan momentini tanımlayan atalet momenti I_x 'e eşittir. Eğrilik ifadesi de (3.4)'ten yerine konursa

$$M = \frac{EI_x}{\rho} \quad (3.11)$$

şeklinde (3.10) denklemi düzenlenmiş olur. Denklem (3.11), eğrilik yarıçapı cinsinden olan eğrilik bir tarafa çekilecek biçimde yazılacak olursa

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI_x} \quad (3.12)$$

şeklinde düzenlenen denklem de moment – eğrilik ilişkisini belirtir.

(3.12) Denklemi, (3.9) denkleminde yerine yazılırsa oluşan

$$\sigma_z = \frac{M_x}{I_x} y \quad (3.13)$$

denkleme de gerilme – moment ilişkisi denir.

3.3. Kirişlerin Elastik Eğrisi

Şekil değiştirmiş cisimler mekaniği, taşıyıcı sistemin iç tesirlerinin hesabıyla ilgilendiği gibi bu iç tesirlerin cisimde meydana getireceği dönme veya sehim gibi deformasyonların hesabı üzerine de çalışır. Kesme ve diğer etkilerin sehim deformasyonuna etki etmediği bir eğilme çubuğu düşünölsün. Bu eğilme çubuğunun eğilme zorlaması altında şekil değiştirmiş halinin geometrik yeri *elastik eğri* olarak tanımlanır. (Omurtag 2013)

Eğilme çubuğunun eğilmiş geometrisi Şekil 3.3'te göröldüğü gibidir. Bir eğrinin eğrilik yarıçapının, o eğrinin değeriyle olan bağıntısı diferansiyel geometri biliminde

$$\frac{1}{\rho} = \pm \frac{v''}{[1 + (v')^2]^{3/2}} \quad (3.14)$$

olarak tanımlıdır (Omurtag 2013) Şekil 3.3'te görölmekte olan eğilme şekil değiştirmesi, pozitif işaret – yön kabulü gereğince $M_x > 0$ durumunda olur. Yine Şekil 3.3'teki eğrinin geometrik durumu için z artan olduğunda v' azalan olduğü için $v'' < 0$ olur ve (3.14) denkleminde görölen $(\pm)$ işareti kalkar, yerine $(-)$ gelir. Bununla beraber

elastik basık eğrilerde v' oldukça küçük değerlerde olduğundan v' fonksiyonunun değeri 1 değerinin yanında aşırı küçüktür ($v' \ll 1$). O halde (3.14) denkleminde v' ifadesi düşürülebilir. Neticede eğrilik – çökme ilişkisi

$$\frac{1}{\rho} = -v'' \quad (3.15)$$

olarak belirlenmiş olur (Omurtag 2013).

Denklem (3.12)'de görülen eğrilik – moment ilişkisi (3.15) denkleminde kullanılacak olursa

$$M = -EI_x v''(z) \quad (3.16)$$

yazılan ifadeye de moment – çökme ilişkisi denir. Diferansiyel denge denklemlerinden (3.2), (3.16) denkleminde yerine yazılırsa

$$V = -EI_x v'''(z) \quad (3.17)$$

elde edilir. Diferansiyel denge denklemlerinden (3.1) kullanılacak olursa

$$q = EI_x v^{(4)}(z) \quad (3.18)$$

yazılan (3.18) denklemi *elastik eğrinin dördüncü mertebeden diferansiyel denklemi* olarak tanımlanır.

Denklem (3.18), arka arkaya dört defa koordinata göre integre edilirse yayılı yüklü sistemler için çökme (sehim, deplasman) eğrisine ulaşılır.

$$\frac{d^4 v}{dz^4} = \frac{1}{EI_x} q \quad (3.19)$$

$$\frac{d^3 v}{dz^3} = \frac{1}{EI_x} [qz + c_1] \quad (3.20)$$

$$\frac{d^2 v}{dz^2} = \frac{1}{EI_x} \left[\frac{qz^2}{2} + c_1 z + c_2 \right] \quad (3.21)$$

$$\frac{dv}{dz} = \frac{1}{EI_x} \left[\frac{qz^3}{6} + \frac{c_1 z^2}{2} + c_2 z + c_3 \right] \quad (3.22)$$

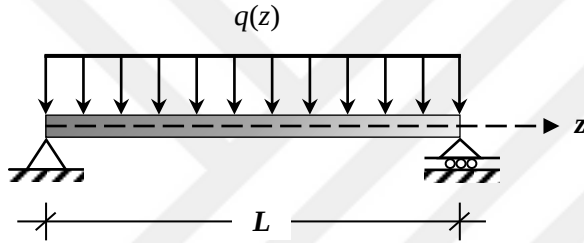
$$v(z) = \frac{1}{EI_x} \left[\frac{qz^4}{24} + \frac{c_1 z^3}{6} + \frac{c_2 z^2}{2} + c_3 z + c_4 \right] \quad (3.23)$$

Bu denklemlerin mekanik anlamına bakılacak olursa (3.19) yayılı yük – çökme, (3.20) kesme – çökme, (3.21) moment – çökme ilişkisini belirtir. Geometrik anlamlara gelince, (3.22) Denklemi dönme – çökme ilişkisini belirtir. (3.23) Denklemi ise çökmüş halin geometrik yer denklemidir (Omurtag 2013).

3.4. Uygulamalar

Kirişlerin elastik eğrilerinde görülen c_i ($i = 1, 2, 3, 4$) integral sabitlerinin belirlenmesi için çubuğun geometrik (çökme ve eğim) ve mekanik (kesme kuvveti ve eğilme momenti) yapıdaki sınır ve bağ şartlarından yararlanılır (Omurtag 2013). Uygulamalar kapsamında çeşitli yüklenme (tekil ve yayılı statik yük) ve bağ (mesnetlenme) koşullarındaki çubuk elemanların elastik eğrisi incelenecektir.

Şekil 3.5'te görülen her iki ucu basit mesnetli ve açıklığı boyunca üniform yayılı yüklü kirişin elastik eğrisi (3.23) kullanılarak tespit edilebilir.



Şekil 3.5. Her iki ucu basit mesnetli ve L açıklığı boyunca q yayılı yükü ile yüklü dolu gövdeli kiriş

Her iki ucu basit mesnetli kirişin mesnetleri düşey deplasman almayacağı gibi eğilme momenti de almazlar. O halde sınır şartları aşağıdaki gibi sıralanır.

$$v(0) = 0 \quad (3.24)$$

$$v''(0) = 0 \quad (3.25)$$

$$v(L) = 0 \quad (3.26)$$

$$v''(L) = 0 \quad (3.27)$$

Şartların hepsi sırayla uygulandıktan sonra integral sabitleri

$$c_1 = -\frac{qL}{2} \quad (3.28)$$

$$c_2 = 0 \quad (3.29)$$

$$c_3 = \frac{qL^3}{24} \quad (3.30)$$

$$c_4 = 0 \quad (3.31)$$

olarak bulunur. İntegral sabitleri (3.23) elastik eğri denkleminde yerine yazılırsa

$$v(z) = \frac{1}{EI_x} \left[\frac{qz^4}{24} - \frac{qLz^3}{12} + \frac{qL^3z}{24} \right] \quad (3.32)$$

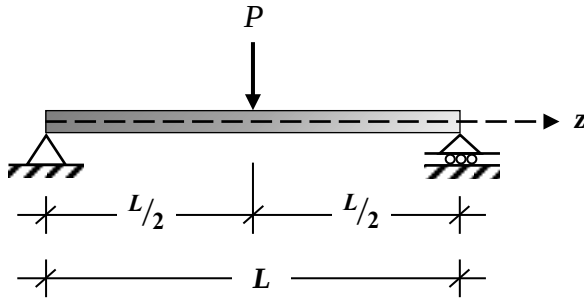
elastik eğri belirlenmiş olur. Maksimum çökme (v_{mak}) ve gerilme (σ_{mak}) değerleri kirişin ortasında ($z=L/2$) oluşacak olup bunların değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$v_{mak} = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (3.33)$$

$$\sigma_{mak} = \frac{qL^2 y_{mak}}{8I} \quad (3.34)$$

y_{mak} kesitin en üst ipçiklerinin tarafsız eksene olan uzaklığıdır ve dikdörtgen kesitlerde yüksekliğin, dairesel kesitlerde çapın yarısı kadardır.

Şekil 3.6'da görülen her iki ucu basit mesnetli ve açıklığının tam ortasında P tekil yükü etkileyen kirişin elastik eğrisi (3.23)'ten bulunamaz. Elastik eğride yükün etkidiği nokta süreksizlik gösterir ve kiriş daha farklı bir şekilde analiz edilmelidir.



Şekil 3.6. Her iki ucu basit mesnetli ve açıklığının yarısında P tekil yükü ile yüklü dolu gövdeli kiriş

Kirişin tek bir elastik eğrisi yoktur çünkü eğri süreksizlik gösterir. Kiriş iki parçaya ayrılarak analiz edilir.

1. Bölge: $0 < z < L/2$

Bu bölgede geçerli olan sınır şartları

$$v_1(0) = 0 \quad (3.35)$$

$$v_1''(0) = 0 \quad (3.36)$$

şeklindedir. Yayılı yük üzerinden denklem (3.23) kullanılamayacağından (3.16) Denklemi ile çözüm yapılır. Bunun için bu bölgede eğilme momenti iç tesiri fonksiyonu oluşturulmalıdır. Bu fonksiyon 1. Bölge içinde geçerli olan bir noktada kesim yöntemi ile bulunur. Moment iç tesiri fonksiyonu yazılıp (3.16)'ya yerleştirilirse (3.37)'deki gibi olur. Buradan dönme ve çökme de yazılır.

$$v_1''(z) = -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{Pz}{2} \right] \quad (3.37)$$

$$v_1'(z) = -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{Pz^2}{4} + c_1 \right] \quad (3.38)$$

$$v_1(z) = -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{Pz^3}{12} + c_1z + c_2 \right] \quad (3.39)$$

(3.35) şartı göz önüne alındığında $c_2 = 0$ bulunur. Diğer şart ise aşıkâr çözüm olduğundan c_1 bulunamamış olur ve c_1 'in bulunması için uygunluk koşullarına başvurulur.

2. Bölge: $L/2 < z < L$

Sınır şartları bu bölge için

$$v_2(L) = 0 \quad (3.40)$$

$$v_2''(L) = 0 \quad (3.41)$$

Olarak verilir. Diğer bölgenin analizine benzer biçimde bu bölge için moment iç tesiri fonksiyonuna bağlı ikinci mertebeden denklem ve onun integrasyonundan gelen dönme ve çökme fonksiyonları

$$v_2''(z) = -\frac{1}{EI_x} \left[-\frac{Pz}{2} + \frac{PL}{2} \right] \quad (3.42)$$

$$v_2'(z) = -\frac{1}{EI_x} \left[-\frac{Pz^2}{4} + \frac{PLz}{2} + c_3 \right] \quad (3.43)$$

$$v_2(z) = -\frac{1}{EI_x} \left[-\frac{Pz^3}{12} + \frac{PLz^2}{4} + c_3z + c_4 \right] \quad (3.44)$$

(3.40) ve (3.41) şartları kullanılarak bu bölgedeki integrasyon sabitleri bulunamaz. O halde bilinmeyen üç integrasyon sabiti uygunluk koşulları vasıtasıyla bulunur.

Tekil yükün teşkil ettiği süreksizlik halinde üç farklı uygunluk koşulu bulunur. Bunlar *çökme uygunluğu*, *dönme uygunluğu* ve *eğilme uygunluğu*dur.

1. Çökme uygunluğu

Çökme uygunluğu, süreksizliğin meydana geldiği noktaya ait kesitin her iki eğri için de aynı değere sahip olduğunu vurgular, başka deyişle iki farklı eğrisel bölgenin sınırdaki çökme değerleri eşittir. Şöyle ki,

$$v_1(L/2) = v_2(L/2) \quad (3.45)$$

Bu ifade (3.39) ve (3.44) denklemleri için aşağıdaki neticeyi verir.

$$\begin{aligned} -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{PL^3}{96} + c_1 \frac{L}{2} \right] &= -\frac{1}{EI_x} \left[-\frac{PL^3}{96} + \frac{PL^3}{16} + c_3 \frac{L}{2} + c_4 \right] \\ \rightarrow (c_3 - c_1) \frac{L}{2} + c_4 &= -\frac{PL^3}{24} \end{aligned} \quad (3.46)$$

2. Dönme uygunluğu

Dönme uygunluğu ise çökme uygunluğuna benzer şekilde süreksizliğin meydana geldiği noktada her iki eğrinin birinci türevinin aynı değere sahip olduğu anlamına gelir yani iki farklı eğrisel bölgenin sınırdaki kesit dönmesi değerleri eşittir.

$$v_1'(L/2) = v_2'(L/2) \quad (3.47)$$

Bu ifade (3.39) ve (3.44) denklemleri için aşağıdaki neticeyi verir.

$$\begin{aligned} -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{PL^2}{16} + c_1 \right] &= -\frac{1}{EI_x} \left[-\frac{PL^2}{16} + \frac{PL^2}{4} + c_3 \right] \\ \rightarrow c_3 - c_1 &= -\frac{PL^2}{8} \end{aligned} \quad (3.48)$$

3. Eğilme uygunluğu

Diğer uygunluk çeşitlerine benzer biçimde süreksizliğin meydana geldiği noktada her iki eğrinin ikinci türevinin aynı değere sahip olduğu anlamına gelir yani iki farklı eğrisel bölgenin sınırdaki eğilme iç tesirleri değerleri eşittir.

$$v_1''(L/2) = v_2''(L/2) \quad (3.49)$$

Bu ifade (3.39) ve (3.44) denklemleri için uygulanırsa aşikâr çözüm elde edilir. (3.48) Denkleminin neticesi, (3.46) Denkleminin neticesinde yerine yazıldığı zaman

$$c_4 = \frac{PL^3}{48} \quad (3.50)$$

olarak belirlenecektir. c_4 (3.44)'ta yerine yazıldıktan sonra (3.40) uygulanırsa c_3 belirlenir. c_3 (3.48) Denkleminde yerine yazılırsa c_1 de bulunabilir. Neticede aşağıdaki değerler hesaplanır.

$$c_3 = -\frac{9PL^2}{48} \quad (3.51)$$

$$c_1 = -\frac{PL^2}{16} \quad (3.52)$$

Bu kirişe ait elastik eğri denklemi

$$v(z) = \begin{cases} -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{Pz^3}{12} - \frac{PL^2}{16}z \right] & , \quad 0 < z < L/2 \\ -\frac{1}{EI_x} \left[-\frac{Pz^3}{12} + \frac{PLz^2}{4} - \frac{9PL^2}{48}z + \frac{PL^3}{48} \right] & , \quad L/2 < z < L \end{cases} \quad (3.53)$$

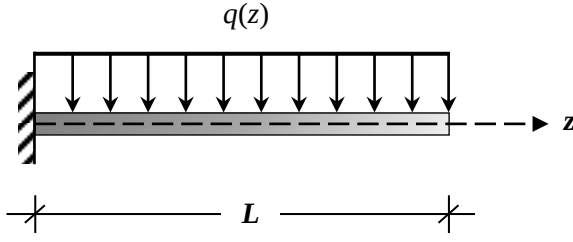
şeklinde bir parçalı fonksiyon ile ifade edilir. Son olarak kirişin maksimum çökmesi ve gerilmesi orta noktada oluşur ve

$$v_{mak} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (3.54)$$

$$\sigma_{mak} = \frac{PLy_{mak}}{4I} \quad (3.55)$$

değerleri hesaplanır.

Şekil 3.7’de görülen konsol kirişe açıklığı boyunca üniform yayılı yük etmektedir.



Şekil 3.7 İzostatik konsol ve L açıklığı boyunca q yayılı yükü ile yüklü dolu gövdeli kiriş

Bu tip yüklemedeki kirişler de (3.23) ile çözülebilir. İlk uygulamadan farkı sınır şartların değişiklik göstermesidir. Ankastre uç tam rijit davranacağından çökme ve dönme yapmaz, serbest uç hiç rijit davranmayacağından kesme ve eğilme almaz. Sınır şartlar aşağıdaki gibi sıralanır.

$$v(0) = 0 \quad (3.56)$$

$$v'(0) = 0 \quad (3.57)$$

$$v''(L) = 0 \quad (3.58)$$

$$v'''(L) = 0 \quad (3.59)$$

Şartların hepsi sırayla uygulandıktan sonra integral sabitleri

$$c_1 = -qL \quad (3.60)$$

$$c_2 = \frac{qL^2}{2} \quad (3.61)$$

$$c_3 = 0 \quad (3.62)$$

$$c_4 = 0 \quad (3.63)$$

olarak bulunur. İntegral sabitleri (3.23) elastik eğri denkleminde yerine yazılırsa

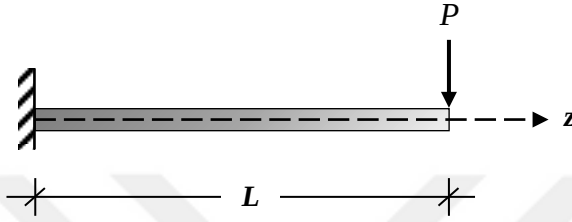
$$v(z) = \frac{1}{EI_x} \left[\frac{qz^4}{24} - \frac{qLz^3}{6} + \frac{qL^2z^2}{4} \right] \quad (3.64)$$

elastik eğri denklemi yazılır. Maksimum çökme (v_{max}) serbest uça ($z=L$), maksimum gerilme (σ_{max}) ise ankastre uça ($z=0$) görülür, bunların değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$v_{mak} = \frac{qL^4}{8EI} \quad (3.65)$$

$$\sigma_{mak} = \frac{qL^2 y_{mak}}{2I} \quad (3.66)$$

Şekil 3.8’de görülen konsol kirişin serbest ucuna P tekil yükü etkimesi durumu için elastik eğrinin analizi yapılacaktır.



Şekil 3.8. İzostatik konsol ve serbest ucunda P tekil yükü ile yüklü dolu gövdeli kiriş

Yayıllı yük olmadığından dolayı bu kirişi (3.23) Denklemini ile çözmek uygun olmamaktadır. Bunun yerine koordinata bağlı eğilme iç tesiri fonksiyonu oluşturulup (3.16)’da yerine konularak çözüm yapılır. Eğilme iç tesiri fonksiyonuna bağlı ikinci mertebeden denklem ve arka arkaya iki integrasyonu aşağıdaki gibidir.

$$v''(z) = -\frac{1}{EI_x} [Pz - PL] \quad (3.67)$$

$$v'(z) = -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{Pz^2}{2} - PLz + c_1 \right] \quad (3.68)$$

$$v(z) = -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{Pz^3}{6} - \frac{PLz^2}{2} + c_1z + c_2 \right] \quad (3.69)$$

(3.69) Denklemini iki tane integral sabiti içerdiğinden çözüm iki sınır koşula ihtiyaç duyar, bunlar aşağıda yazılmıştır.

$$v(0) = 0 \quad (3.70)$$

$$v'(0) = 0 \quad (3.71)$$

Şartlar uygulandığı zaman integral sabitleri sırasıyla

$$c_1 = 0 \quad (3.72)$$

$$c_2 = 0 \quad (3.73)$$

olarak bulunur, böylece elastik eğri denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$v(z) = -\frac{1}{EI_x} \left[\frac{Pz^3}{6} - \frac{PLz^2}{2} \right] \quad (3.74)$$

Maksimum çökme (v_{max}) serbest uçta ($z=L$), maksimum gerilme (σ_{max}) ise ankastre uçta ($z=0$) görülür, bunların değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$v_{mak} = \frac{PL^3}{3EI} \quad (3.75)$$

$$\sigma_{mak} = \frac{PLy_{mak}}{I} \quad (3.76)$$

3.5. Optimizasyon Problemi

3.5.1. Amaç ve sınır fonksiyonlar

Bu tez çalışması, statik yükler altındaki farklı mesnetlenme koşullarındaki eğilme elemanlarının kesitini gerilme ve deplasman sınırları altında belirleyecektir. O halde amaç fonksiyonu kesit alanıdır (Numanoğlu 2017).

$$A(b, h) = bh \quad (3.77)$$

$$A(D) = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.78)$$

Bu denklemlerde görülen b ve h dikdörtgen kesitin sırayla eni ve yüksekliği, d ise daire kesitin çapıdır.

Optimizasyon problemi iki farklı sınır koşul altında çalışacaktır. Bunlar deplasman ve gerilme sınır koşulu olup bunların sınırlayıcı fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{mak}}{\sigma_{limit}} - 1 \leq 0 \quad (3.79)$$

$$S_v = \frac{v_{mak}}{v_{limit}} - 1 \leq 0 \quad (3.80)$$

Denklemlerde yer alan σ_{mak} ve σ_{limit} sırayla maksimum ve sınır gerilmeyi, v_{mak} ve v_{limit} ise maksimum ve sınır sehimi gösterir.

3.5.2. Sosyal örümcek optimizasyonu (SSO) algoritması

Evrimsel bir optimizasyon yöntemi olan Sosyal Örümcek Optimizasyonu yöntemi 2013 yılında Cuevas vd. tarafından önerilmiştir. Yöntem örümceklerin doğal hayattaki topluluk davranışlarından yola çıkılarak geliştirilmiştir. Bu yöntemde belirli sayıda dişi ve erkek sosyal örümcekler bir sosyal topluluk meydana getirir. Her bir örümceğin aday çözümü tespit edilir. Daha sonra örümceklerin performans değeri belirlenir ve bu değer örümceklerin ağırlıkları ile karşılaştırılır. (Cuevas vd. 2013; Cuevas vd. 2014)

Her bir örümcek cinsiyete ve performansa bağlı olan titreşim, hareket ve çiftleşme gibi farklı evrimsel operatörleri kullanırlar. Sosyal örümcekler ortak bir örümcek ağı olarak nitelendirilen etkileşim alanı içerisinde bu sosyal operatörleri uygularlar. Ortak ağ üzerinde önce sosyal topluluk oluşturulur. Daha sonra sosyal örümcekler birbiri ile iletişime geçmek için titreşim oluştururlar. Titreşim sayesinde örümcekler birbirine doğru hareket eder ve hareketin miktarı titreşimin gücüne bağlıdır. (Cuevas vd. 2013; Cuevas vd. 2014)

Titreşim operatörü tamamlandıktan sonra örümcekler yeni konumlarında diğer sosyal operatör olan çiftleşmeyi uygularlar. Bu operatör tamamlandıktan sonra yeni bir çözüm elde edilir ve çözümler topluluğun en kötü sosyal örümceği ile karşılaştırılır ve yeni çözüm daha iyiye kötü örümcek topluluktan çıkarılır ve çiftleşme sonucu çözüm, başka deyişle yeni örümcek topluluğa dahil olur. Bu arada topluluktan çıkan örümcekle topluluğa giren örümceğin cinsiyeti aynı olur. Bu işlemler program içerisinde belirlenmiş sayıda tekrarlanır ve en iyi sosyal örümceğin tespiti, optimizasyon probleminin çözümü olur. (Cuevas vd. 2013; Cuevas vd. 2014)

SSO algoritmasının adımları aşağıda açıklanmıştır:

1. Örümcek sayısını belirle: Topluluktaki dişi örümcek sayısı, genellikle toplam örümcek sayısının %90'ı ile %65'i arasında yer alır .
2. Örümceklerin başlangıç pozisyonu belirle ve çiftleşme etki alanını hesapla.
3. Örümceklerin cezalı ağırlıklarını hesapla
4. Örümceklerin performanslarını hesapla
5. Örümceklerin titreşimlerinin şiddetini hesapla
6. Dişi örümceklerin yeni pozisyonunu belirle
7. Erkek örümceklerin yeni pozisyonunu belirle
8. Çiftleşme operatörünü uygula
9. Baskın titreşim operatörüne (yeni çözümlere) göre koloniyi güncelle
10. Maksimum iterasyon sayısına ulaşıldıysa algoritmayı durdur. Değilse ikinci adıma dön.

3.6. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi

Makro yapıların mekanik zorlamalar altındaki tasarımı elde edilirken kullanılan klasik elastisite teorisi, mikro ve özellikle de nano yapıya inildiği zaman geçerliliğini yitirir yani elde edilen sonuçlar gerçek davranışı yansıtmaz. Bu durumun altında malzemenin karakteristik iç boyutlarının etkisi olduğu anlaşılmıştır.

Klasik teorilere göre denge ve enerji denklemleri maddenin her noktasında geçerli olmaktadır. Ancak mikro yapının her noktasında, ilgili noktaya komşu olan noktadaki gerilme ve şekil değiştirme durumlarını da gözetmek gerekir. Yerel olmayan elastisite teorisi söylenen bu hükme dayanır (Işık 2011). Bu teori mikro yapıların mekanik analizi için önemli bir yaklaşımdır. Cisimlerin yapısında yer değiştirme sırasında geometrik düzensizlikler meydana gelir ve bu düzensizlikler ek gerilme doğurur ve gerilme enerjisi sonsuza gider. Yerel olmayan teorisinin kullanımı ile bu sorun ortadan kalkar (Tepe 2007).

Yerel olmayan elastisite teorisinin temelindeki denklemler,

$$\sigma_{ij} + \rho (f_j - \ddot{u}_j) = 0 \quad (3.81)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji}) \quad (3.82)$$

$$\sigma_{ij}(x') = \int_V C_{klmn}(x' - x) \varepsilon_{mn} dv(x') \quad (3.83)$$

(3.81) denkleminde görülen σ_{ij} yerel olmayan gerilmeyi, ρ kütleel yoğunluğu, f_j kütleel kuvveti ve $\ddot{u}_j$ yer değiştirmenin ikinci mertebeden türevini ifade eder. (3.82) denkleminde yer alan ε_{ij} yerel olmayan şekil değiştirmedir. Bünye denklemi olarak bilinen (3.83)'te görülen x' konumdur. C_{klmn} dördüncü mertebeden elastisite tansörüdür ve $(x' - x)$ uzunluğunun bir fonksiyonudur. Son olarak V cismin kapladığı hacimdir. Çift notasyonlu alt indis

$$u_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.84)$$

olarak verilir. İzotropik cisimlerde gerilme tansörü ve bunun izotropik cisimlerdeki şekli

$$\sigma_{ij}(x') = \int_V \alpha(|x' - x|) \sigma_{ij}^e(x') dv(x') \quad (3.85)$$

$$\sigma_{ij}^e(x') = \lambda \varepsilon_{rr} \sigma_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (3.86)$$

şeklinde dir. Burada $\sigma_{ij}^e(x')$ klasik gerilmeyi ifade eder. $\alpha(|x' - x|)$ Öklidyen formda uzaklık, λ ve μ Lamé sabitleridir.

Öklidyen formda uzaklık,

$$L_0 \alpha(|x' - x|, \phi) = \delta(|x' - x|) \quad (3.87)$$

şeklinde verilir. Bu bağıntı yerel olmayan teoremin kurucu denklemini belirtir. Burada $\delta(|x' - x|)$ Dirac fonksiyonudur. L_0 ise doğrusal diferansiyel operatörü ve ϕ bir malzeme sabitidir. Buna göre

$$L_0 = 1 - l^2 \phi^2 \nabla^2 \quad (3.88)$$

$$\phi = e_0 \frac{a}{l} \quad (3.89)$$

Denklemlerde görülen a karakteristik iç uzunluk ve l karakteristik dış uzunluktur. e_0 ise malzeme tipine bağlı deneysel belirlenen bir sabittir. (3.87) ifadesi daha anlaşılır şekilde

$$L_0 \sigma_{ij} = \sigma_{ij}^c \quad (3.90)$$

olarak verilir. (3.89) ifadesi (3.88) denkleminde yerine yazıldıktan sonra oluşan ifadenin kendisi de (3.90) denkleminde yerine koyulursa yerel olmayan elastisite teorisinin en temelindeki gerilme denkleminde ulaşılmış olur:

$$\left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \sigma_{xx} = E \epsilon_{xx} \quad (3.91)$$

Burada $\mu = (e_0 a)^2$ olarak tanımlanır ve yerel olmayan parametre olarak adlandırılır.

3.6.1. Euler – Bernoulli kirişinin yerel olmayan eğilmesi

(3.91)'de görülen gerilme denkleminin her iki tarafı enine koordinat y ile çarpıldıktan sonra alan üzerinden integre edilirse

$$\left(1 - \mu \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) \int_A \sigma_{xx} y \, dA = \int_A \sigma_{ij}^c y \, dA \quad (3.92)$$

Denge denklemlerinin sonucu olarak aşağıda görülen

$$\int_A \sigma_{xx} y \, dA = M_{xx} \quad , \quad \int_A \sigma_{ij}^c y \, dA = M^c = -EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (3.93)$$

Eşitlikleri kurulur. Burada M_{xx} yerel olmayan moment iç tesiri ve M^c klasik moment iç tesiridir. Buna göre (3.93) denkleminde görülenler (3.93) denkleminde yerine konulduktan sonra denklem her iki tarafından x 'e göre arka arkaya iki defa türetilirse ve

yerel olmayan momentin ikinci dereceden türevinin yayılı yükün zıt işaretlisine eşit olduğu bilgisi kullanılırsa,

$$q - \mu \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} = EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} \quad (3.94)$$

sonucuna varılır. Bu arada klasik formülasyonlarda boyuna koordinat z olarak verilmişti. Burada yerel olmayan iç tesirin ifadesinde görülen konumun koordinatıyla karışmaması açısından boyuna koordinatın gösterimi x olarak değiştirilmiştir.

Yerel olmayan çökme denkleminin sadece her iki ucu basit mesnetli ve açıklık boyunca homojen yayılı yüklü kiriş için uygulaması yapılmıştır. Bunun için ilgili analitik denklem elde edilmiş ancak bulgular kısmında sayısal bir sonuç verilmemiştir. Bunların daha ilerideki çalışmalarda ele alınması planlanmaktadır.

(3.94) Denklemi her iki tarafından boyuna koordinata göre arka arkaya dört kez integre edilirse,

$$v(x) = \frac{1}{EI} \left[\frac{q}{24} x^4 + \frac{c_1}{6} x^3 + \frac{c_2}{2} x^2 + c_3 x + c_4 - \frac{\mu q}{2} x^2 \right] \quad (3.95)$$

Denkleme ulaşılır (Reddy ve Pang 2008). İntegrasyondan doğan sabitleri belirlemek için sınır şartları kullanılmalıdır ancak bilinmelidir ki sınır şartları klasik koşulla benzer değildir. Atomik parametre şartlara da etki eder. Şöyle ki, (3.92) denkleminde (3.93)'te görülen ifadeler yerine yerleştirilecek olursa,

$$M_{xx} - \mu \frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} = -EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (3.96)$$

Burada yerel olmayan moment iç tesirinin yayılı yük ile olan ilişkisi yerine konur, yerel olmayan moment iç tesiri yalnız bırakılırsa

$$M_{xx} = -EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \mu q \quad (3.97)$$

elde edilir. Bu ifade (3.95) yerine konularak düzenlenecek olursa moment elde edilir.

$$M_{xx} = -\frac{q}{2} x^2 - c_1 x - c_2 \quad (3.98)$$

Sınır şartların uygulamasına geçilebilir. Sınır şartlar yazılacak olursa,

$$v(0) = 0 \quad (3.99)$$

$$M_{xx}(0) = 0 \quad (3.100)$$

$$v(L) = 0 \quad (3.101)$$

$$M_{xx}(L) = 0 \quad (3.102)$$

İlk olarak (3.99) şartı uygulanırsa $c_4 = 0$ olarak elde edilmiş olur. (3.100) uygulanacak olursa $c_2 = 0$ olarak elde edilmiş olur. (3.102) uygulanacak olursa

$$-\frac{q}{2}L^2 - c_1L = 0 \quad \rightarrow \quad c_1 = -\frac{qL}{2} \quad (3.103)$$

olarak elde edilir. Son olarak (3.101) uygulanırsa

$$\frac{q}{24}L^4 - \frac{q}{12}L^4 + c_3L - \frac{\mu q}{2}L^2 = 0 \quad \rightarrow \quad c_3 = \frac{qL^3}{24} + \frac{\mu qL}{2} \quad (3.104)$$

elde edilir (Işık 2011). Sonuç olarak bulunan tüm sabitler (3.95) denkleminde yerleştirilecek olursa,

$$v(x) = \frac{1}{EI} \left[\frac{q}{24}x^4 - \frac{qL}{12}x^3 - \frac{\mu q}{2}x^2 + \left(\frac{qL^3}{24} + \frac{\mu qL}{2} \right)x \right] \quad (3.105)$$

olarak yerel olmayan çökme denklemi bulunur. Klasik olsun, yerel olmayan olsun eğrilerin geometrik karakteristikleri değişmez, mesela uç noktalardaki deplasmanların eşit ve sıfır olacağı bu karakteristiğe bir örnektir ve daha başka bir örnek, maksimum çökme yerel olmayan çözümde, klasikte olduğu gibi gene orta noktada oluşacaktır. Ancak yerel olmayan maksimum çökme ile klasik maksimum çökme atomik parametrenin varlığından dolayı eşit olmaz. Şöyle ki (3.105) denkleminde $x = L/2$ yazılırsa,

$$v(L/2) = \frac{1}{EI} \left[\frac{5qL^4}{384} + \frac{\mu qL^2}{8} \right] \quad (3.106)$$

Buradan yapılacak en önemli yorum atomik parametrenin klasik deplasmanı artıracığıdır. Böylelikle maksimum gerilme ve eğilme momentinin de klasiğe göre artacağı rahatça anlaşılır. Sonuç olarak bir eğilme elemanının klasik ve yerel olmayan çözümüne göre yapılacak tasarım optimizasyonlarında yerel olmayan çözümün klasiğe göre daha fazla kesit alan ihtiyacı ortaya çıkaracağı söylenebilir.

4. BULGULAR

Tez çalışmasında yapılacak olan analizlerde kesit tipleri dikdörtgen ve daire olarak seçilmiştir. Bu kesitlerin boyutları ve kiriş açıklıkları aşağıdaki gibi alınacaktır:

- Dikdörtgen kesitlerin yüksekliği h için minimum boyut $h_{min} = 1\text{nm}$ ve maksimum boyut $h_{mak} = 7.5\text{nm}$,
- Dikdörtgen kesitlerin eni b için minimum boyut $b_{min} = 0.5\text{nm}$ ve maksimum boyut $b_{mak} = 4.5\text{nm}$.
- Daire kesitlerin çapı için minimum boyut $D_{min} = 0.5\text{nm}$ ve maksimum boyut $D_{mak} = 6.5\text{nm}$.
- Kiriş açıklıkları için minimum boyut $L_{min} = 10\text{nm}$ ve maksimum boyut $L_{mak} = 100\text{nm}$.

Statik yüklemeler altında kesit seçiminin ve seçilen kesit için bu boyut değerlerinin optimizasyonu yapılacaktır.

Optimizasyon probleminin sınırlayıcıları ile ilgili olarak,

- Gerilme sınırlayıcıları Çizelge 2.1’de görülen değerler göz önüne alındığında $\sigma_{limit}^{CNT} = 11\text{ GPa}$ ve $\sigma_{limit}^{BNNT} = 33\text{ GPa}$ olarak belirlenmiştir.
- Deplasman sınırlayıcısı ise tüm kiriş modelleri için açıklığın 200’de 1’i alınacaktır, $v_{limit} = L/200$ (Numanoğlu 2017).

Makro yapılar çoğunlukla MKS birim sisteminde modellenir ve mikro/nano ölçeğe geçildiğinde uzunluklar mikrometre/nanometre biriminde modellenirler. Dolayısı ile nano ölçekteki yapılarda deplasman ve gerilme büyüklükleri için sırasıyla nm ve nN/nm² birimlerini kullanmak uygundur. Deplasman ve gerilme büyüklüklerinin bağlı olduğu Elastisite modülü hala MKS birim sisteminde kaldığı için makro yapının mekanik analizinde kullanılabilecek 10 ton, 100N/m gibi kabul edilebilir yükleri nano ölçekte kullanmak kabul edilemez derecede gerilmeler ve deplasmanlar ortaya çıkartır. Bu duruma *değişmeyen niceliğin algı etkisi* denir. Etkinin giderilmesi için nano boyuttaki birimlerde oldukça küçük sayılar kullanılmalıdır (Numanoğlu 2017). Bu çalışmada statik yükler aşağıdaki gibi seçilecektir.

- İki ucu basit mesnetli kirişlerde yayılı yük her açıklık için eşit ve $q = 0.001; 0.005; 0.01; 0.05\text{ nN/nm}$ alınacaktır. Tekil yük ise açıklığa bağlı $P = qL/2\text{ (nN)}$ şeklinde bir değişken olarak kullanılacaktır.
- Konsol kirişlerde de yayılı yük her açıklık için eşit ve $q = 0.001; 0.005; 0.01; 0.05\text{ nN/nm}$ alınacaktır. Tekil yük ise yine açıklığa bağlı $P = qL/2\text{ (nN)}$ şeklinde bir değişken olarak kullanılacaktır (Numanoğlu 2017).

Sayısal sonuçlarda görülmekte olan S – S ve C – F kısaltmaları sırasıyla her iki ucu basit mesnetli kirişi ve konsol kirişi belirtir. Aksi belirtilmedikçe yayılı yükler açıklık boyunca, tekil yükler S – S kirişinde açıklık ortasına ve C – F kirişinde serbest uca etkililerek analiz yapılacaktır. Yine aksi belirtilmedikçe tekil yükler, yayılı yüke eşit miktarda maksimum eğilme etkisi meydana getirecek biçimde seçilecektir.

Çizelge 4.1. Çeşitli mesnetlenme ve yüklenme tipindeki iki farklı malzemeden imal edilmiş kirişlerin çeşitli açıklık L (nm) değerleri için optimum kesit alan değeri (nm^2)

	CNT			BNNT		
Kiriş ve Yükleme	$L = 20$	$L = 40$	$L = 80$	$L = 20$	$L = 40$	$L = 80$
S – S, $q = 0.001 \text{ nN/nm}$	0.5000	0.7941	1.5888	0.4674	0.7497	1.4944
S – S, $P = 0.0005L \text{ nN}$	0.4580	0.7371	1.4745	0.4178	0.6934	1.3866
C – F, $q = 0.001 \text{ nN/nm}$	0.8458	1.6872	3.3738	0.7948	1.5920	3.1759
C – F, $P = 0.0005L \text{ nN}$	0.9296	1.8568	3.7134	0.8752	1.7476	3.4950

Çizelge 4.2. Çeşitli uzunluktaki S – S kirişleri için çeşitli değerlerdeki yayılı yük ve tekil yük durumunda optimum kesit alan (nm^2) değerlerinin iki farklı malzeme için karşılaştırılması

Yükleme	Açıklık, L , nm							
q , nN/nm	CNT				BNNT			
P , nN	10	20	40	80	10	20	40	80
$q = 0.001$	0.1960	0.5000	0.7941	1.5888	0.1960	0.4674	0.7497	1.4944
$P = 0.0005L$	0.1960	0.4580	0.7371	1.4745	0.1960	0.4178	0.6934	1.3866
$q = 0.005$	0.4051	0.6794	1.3578	2.7152	0.3698	0.6391	1.2766	2.5546
$P = 0.0025L$	0.3619	0.6300	1.2605	2.5220	0.3315	0.5944	1.1859	2.3715
$q = 0.01$	0.5743	0.8568	1.7113	3.4207	0.5227	0.8054	1.6115	3.3248
$P = 0.005L$	0.5161	0.7959	1.5876	3.1755	0.4675	0.7470	1.4938	2.9892
$q = 0.05$	0.7319	1.4624	2.9260	14.2334	0.6892	1.3777	2.7541	11.8536
$P = 0.025L$	0.6792	1.3599	2.7148	11.4045	0.6387	1.2784	2.5555	9.4837

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de eşit eğilme etkisi verecek olan yayılı yük ve tekil yük sonuçlarına bakıldığı zaman küçük uzunluklarda değerlerin birbirine çok yakın, büyük uzunluklarda değerlerin birbirinden uzak olduğu sonucuna varılır. Netice olarak eğilme etkileri eşit olsa dahi tekil ve yayılı yüklerin çökme etkileri farklı olduğundan optimum kesit alan sonuçları birbirinden farklıdır. S – S kirişlerinde yayılı yük durumunda daha fazla kesit alana ihtiyaç duyulurken C – F kirişinde tekil yük durumunda daha fazla alana ihtiyaç duyulur.

Çizelge 4.3. CNT’den imal edilmiş S – S kirişlerinin iki farklı yayılı yük değeri için elde edilen optimum kesit alan (nm^2) sonuçlarının bu tez çalışması ve ilgili referans ile karşılaştırılması

	q = 0.001 nN/nm		q = 0.01 nN/nm	
L, nm	Bu çalışma	<i>Numanoğlu 2017</i>	Bu çalışma	<i>Numanoğlu 2017</i>
20	0.5125	0.5127	0.8596	0.8599
30	0.5956	0.5958	1.2825	1.2831
40	0.7938	0.7938	1.7104	1.7100
50	0.9923	0.9925	2.1382	2.1375
75	1.4890	1.4893	3.4074	3.6638

Çizelge 4.4. CNT’den imal edilmiş çeşitli uzunluktaki S – S kirişlerinin $q = 0.005$ nN/nm yayılı yüke maruz kalması durumunda elde edilen optimum kesit tipleri ve kesit alanları ile beraber optimizasyon kısıtlarının durumu

Kiriş Açıklığı	Optimum Alan	Optimum Kesit	Yük.	Gen.	Çap	Mak. Dep.	Mak. Ger.	Dep. Oranı	Ger. Oranı
<i>L (nm)</i>	<i>A (nm²)</i>	<i>Dikdörtgen Daire</i>	<i>h (nm)</i>	<i>b (nm)</i>	<i>D (nm)</i>	<i>v_{mak} (nm)</i>	<i>σ_{mak} (TPa)</i>	<i>$\frac{v_{mak}}{v_{lim}}$</i>	<i>$\frac{\sigma_{mak}}{\sigma_{lim}}$</i>
10	0.4067	Daire			0.72	0.0489	0.0016	0.999	0.149
20	0.6794	Dikdörtgen	1.36	0.50		0.0989	0.0015	0.998	0.148
50	1.6966	Dikdörtgen	3.39	0.50		0.2500	0.0015	0.998	0.148
80	2.7166	Dikdörtgen	5.43	0.50		0.3994	0.0015	0.998	0.147
100	3.3935	Dikdörtgen	6.79	0.50		0.4998	0.0016	0.999	0.148

Çizelge 4.5. CNT’den imal edilmiş çeşitli uzunluktaki C – F kirişlerinin $q = 0.005$ nN/nm yayılı yüke maruz kalması durumunda elde edilen optimum kesit tipleri ve kesit alanları ile beraber optimizasyon kısıtlarının durumu

Kiriş Açıklığı	Optimum Alan	Optimum Kesit	Yük.	Gen.	Çap	Mak. Dep.	Mak. Ger.	Dep. Oranı	Ger. Oranı
<i>L (nm)</i>	<i>A (nm²)</i>	<i>Dikdörtgen Daire</i>	<i>h (nm)</i>	<i>b (nm)</i>	<i>D (nm)</i>	<i>v_{mak} (nm)</i>	<i>σ_{mak} (TPa)</i>	<i>$\frac{v_{mak}}{v_{lim}}$</i>	<i>$\frac{\sigma_{mak}}{\sigma_{lim}}$</i>
10	1.2609	Daire			0.04	0.0494	0.0013	0.988	0.114
20	1.4435	Dikdörtgen	2.88	0.50		0.0997	0.0014	0.998	0.130
50	3.6062	Dikdörtgen	7.21	0.50		0.2498	0.0014	0.999	0.131
80	13.6571	Dikdörtgen	7.50	1.82		0.3999	0.0009	0.999	0.085
100	26.7120	Dikdörtgen	7.50	3.56		0.4992	0.0007	0.998	0.068

Çizelge 4.6. İki farklı malzemeden imal edilmiş çeşitli uzunluktaki S – S kirişlerinin farklı şiddetteki tekil yük değeri için elde edilen optimum kesit alan değerleri (nm²)

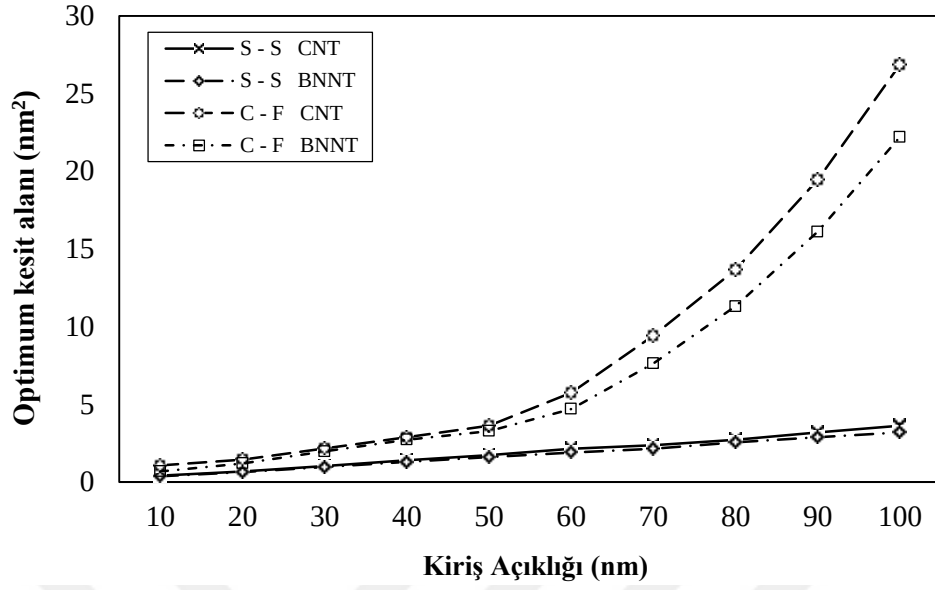
Yüklemeye	CNT				BNNT			
<i>L (nm)</i>	10	20	40	80	10	20	40	80
P = 1 nN	1.0789	1.7018	2.7164	5.6944	1.0146	1.6099	2.5403	4.7432
P = 2 nN	1.3594	2.1545	3.4203	11.3921	1.2753	2.0279	3.2180	9.4828
P = 3 nN	1.5539	2.4687	4.2705	17.0828	1.4622	2.3238	3.6856	14.2323
P = 4 nN	1.7150	2.7152	5.6939	22.7619	1.6089	2.5549	4.7518	18.9680
P = 5 nN	1.8483	2.9271	7.1186	28.4534	1.7364	2.7534	5.9369	23.7381

Çizelge 4.7. İki farklı malzemeden imal edilmiş çeşitli uzunluktaki C – F kirişlerinin farklı şiddetteki tekil yük değeri için elde edilen optimum kesit alan değerleri (nm²)

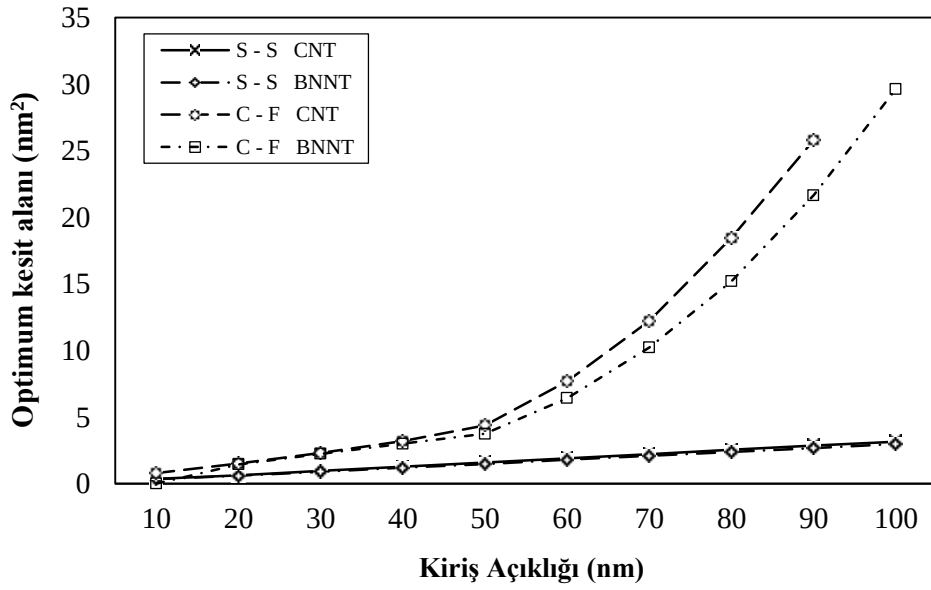
Yüklemeye	CNT				BNNT			
<i>L (nm)</i>	10	20	40	80	10	20	40	80
P = 1 nN	2.7167	5.7012	22.7691		2.5552	4.7453	18.9654	
P = 2 nN	3.4226	11.4256			3.2187	9.5069		
P = 3 nN	4.2670	17.0703			3.6903	14.2315		
P = 4 nN	5.6892	22.7635			4.7453	18.9652		
P = 5 nN	7.1138	28.4485			5.9274	23.7082		

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 incelendiği zaman CNT ile bulunan sonuçların BNNT ile bulunanlardan daha düşük olduğu gözlenmiştir ve bunun nedeni elastisite modülüdür çünkü elastisite modülü deplasmanı doğrudan etkiler. C – F kirişinin sonuçlarına bakıldığı zaman bazı uzunluk değerlerinde sayısal netice elde edilememiştir, bunun sebebi ilgili uzunlukların ve yüklemelerin gerektirdiği optimum kesit alan miktarının tanımlanmış sınırlarda yer almamasıdır.

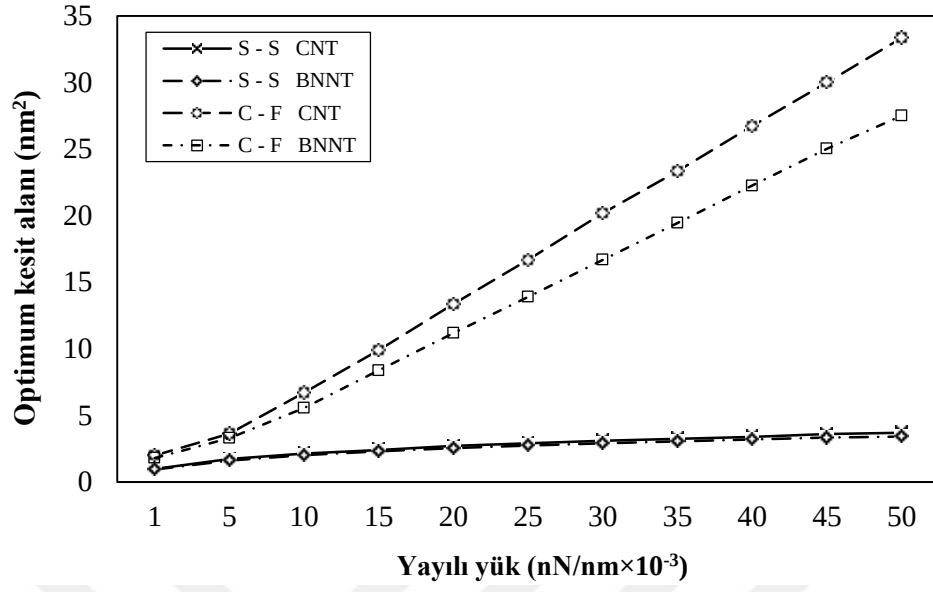
Buradan itibaren sonuçlar grafik şeklinde verilmiştir. Bazı grafik çizgileri belli bir noktadan sonra kesilmiştir. Bunun nedeni ilgili uzunluk ve yükleme altında optimum sonuç bulunamamasıdır.



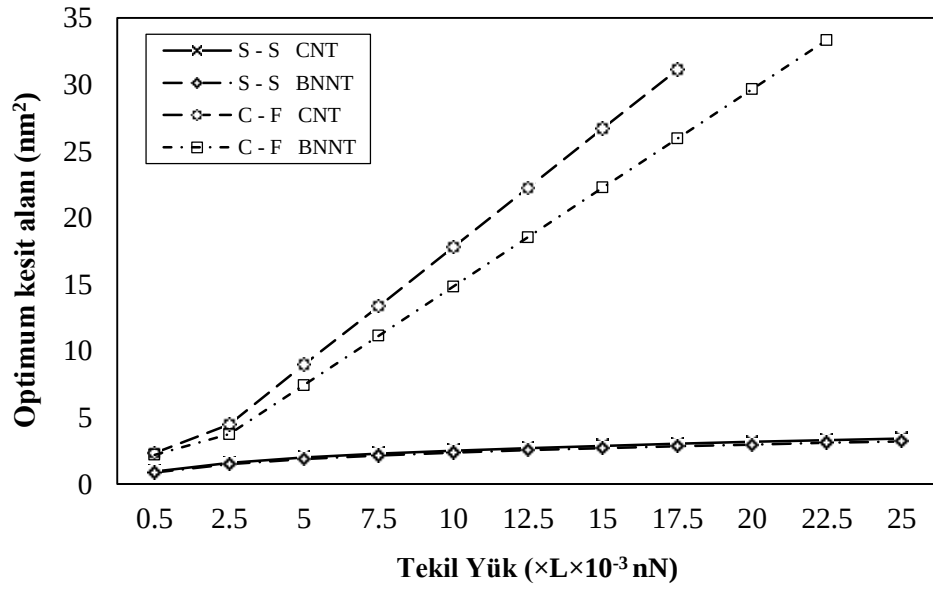
Şekil 4.1. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S ve C – F kirişlerinin artan açıklık değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri ($q = 0.05 \text{ nN/nm}$)



Şekil 4.2. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S ve C – F kirişlerinin artan açıklık değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri ($P = 0.025L \text{ nN}$)

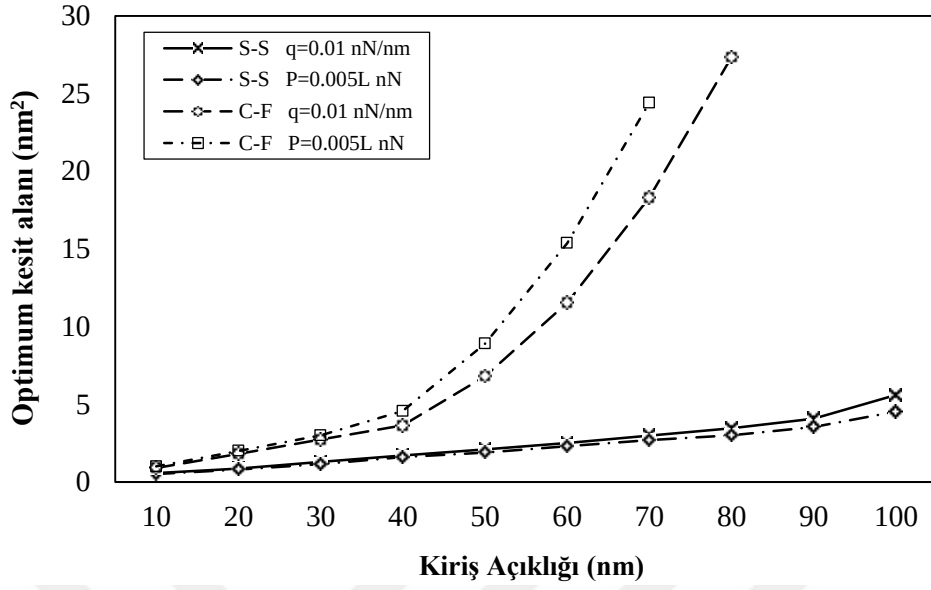


(a)

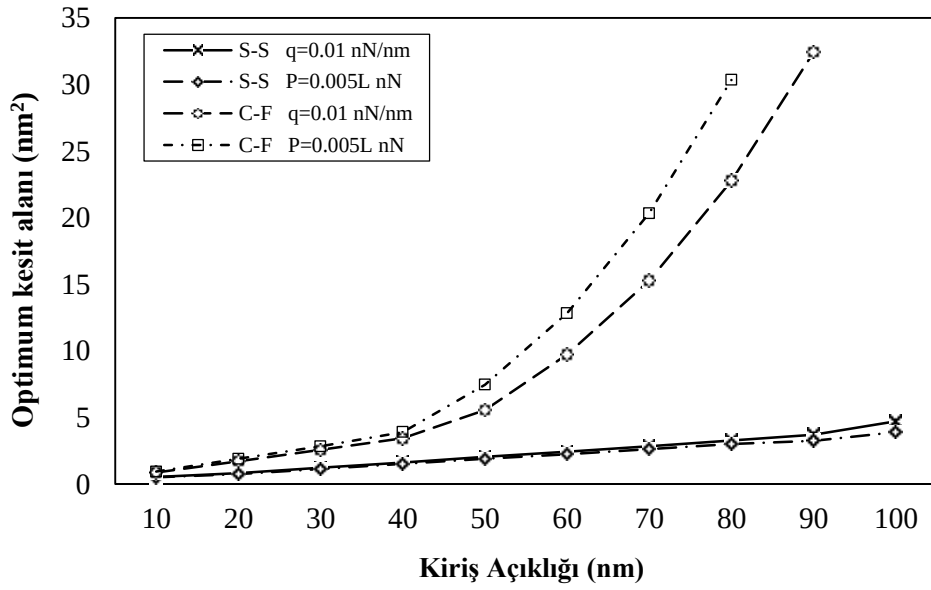


(b)

Şekil 4.3. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S ve C – F kirişlerinin artan yayılı ve tekil yükleme tipleri için optimum kesit alan değerleri **a)** Yayılı yüklü **b)** Tekil yüklü (L = 50 nm)

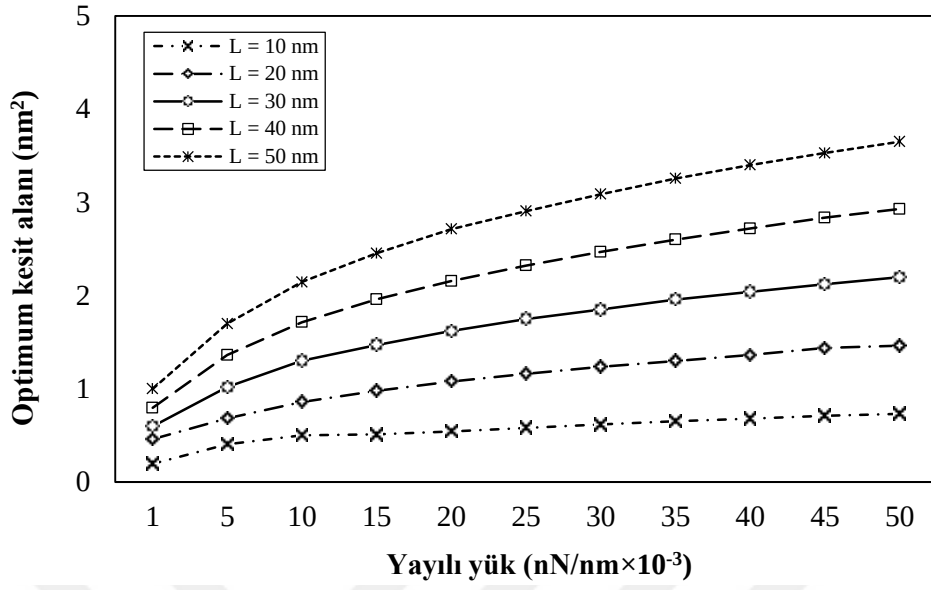


(a)

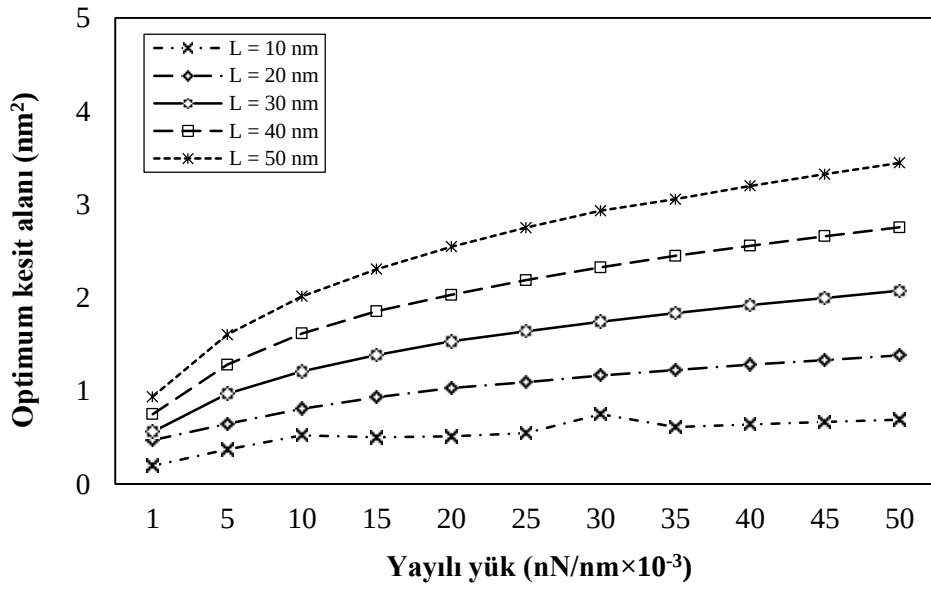


(b)

Şekil 4.4. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S ve C – F kirişlerinin artan açıklık değerleri ve farklı yayılı ve tekil yük değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri **a) CNT b) BNNT**

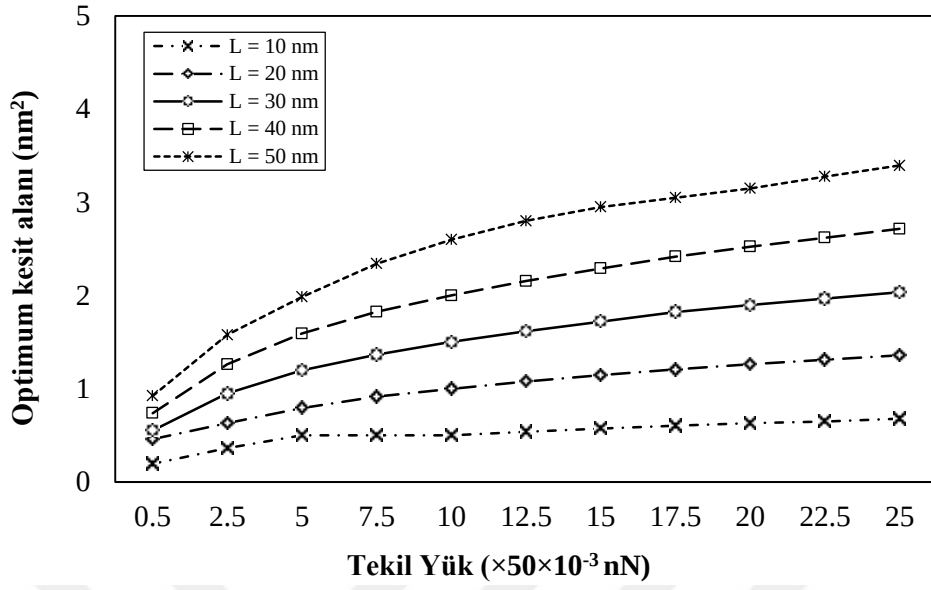


(a)

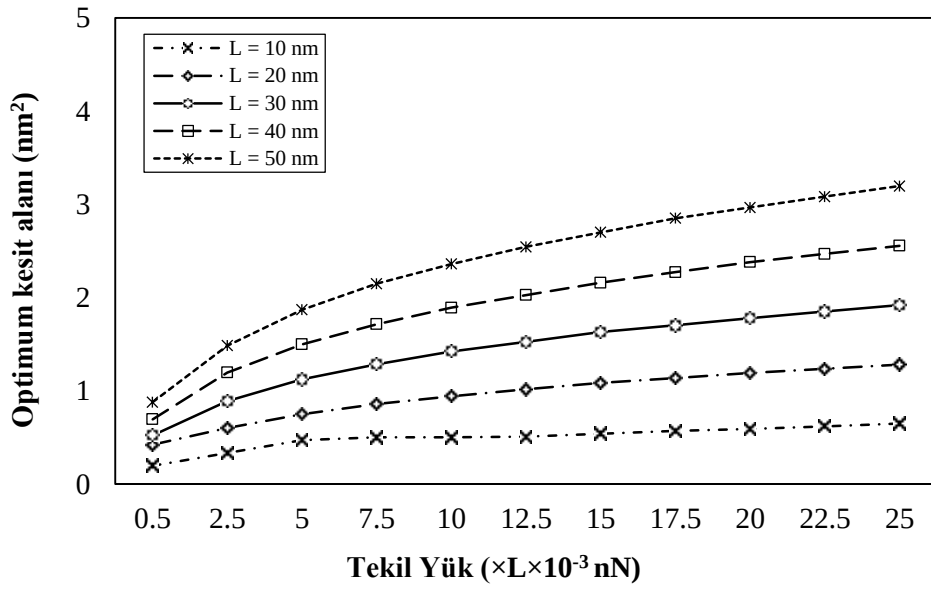


(b)

Şekil 4.5. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S kirişlerinin artan yayılı yük değerleri ve farklı uzunluk değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri **a)** CNT **b)** BNNT

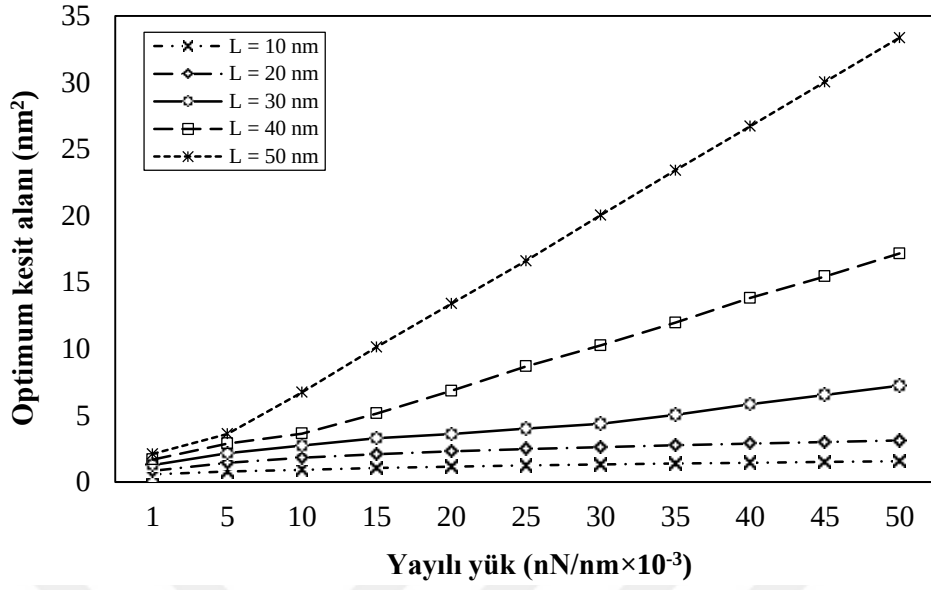


(a)

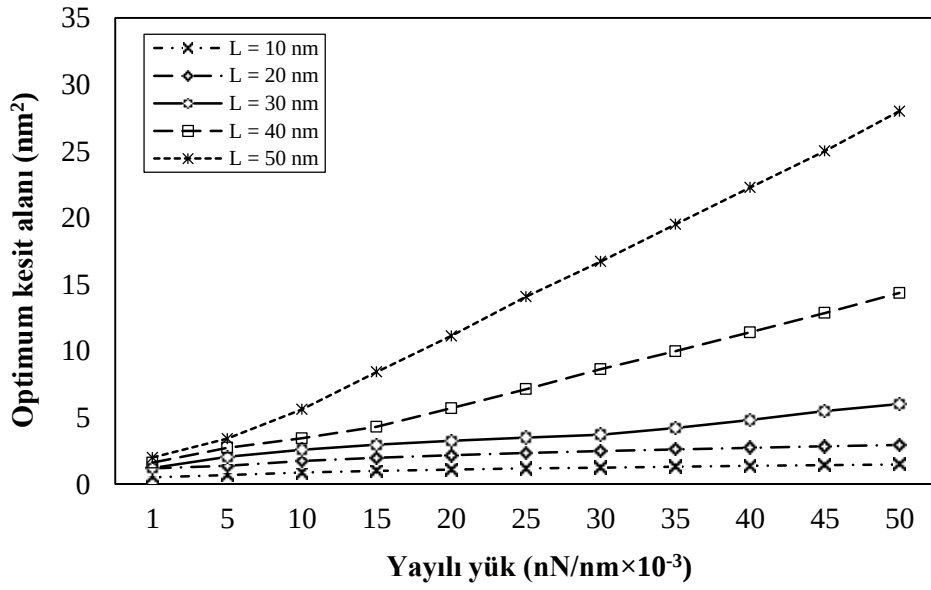


(b)

Şekil 4.6. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S kirişlerinin artan yayılı yüke eşit eğilme etkisi verecek biçimde seçilmiş tekil yük değerleri ve farklı uzunluk değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri **a) CNT b) BNNT**

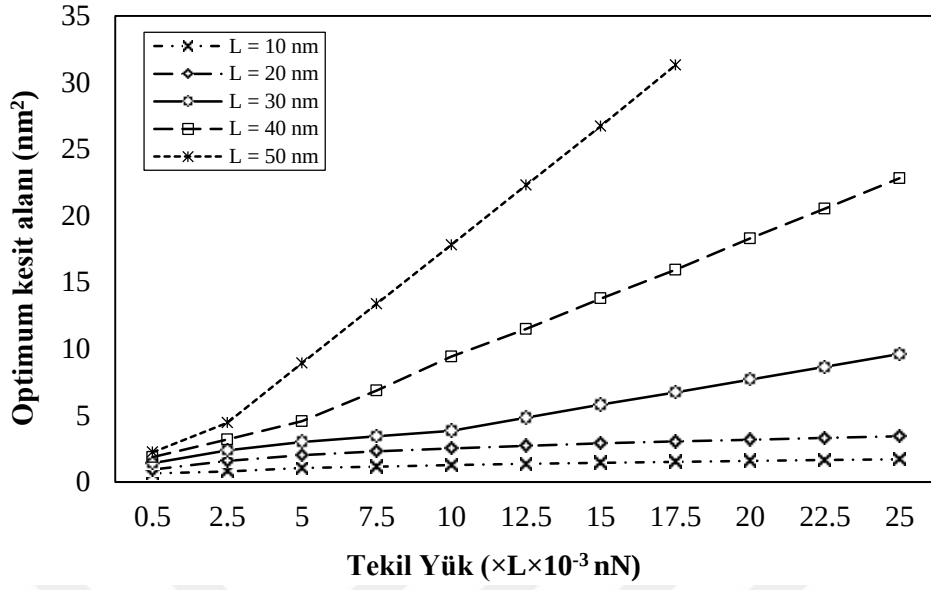


(a)

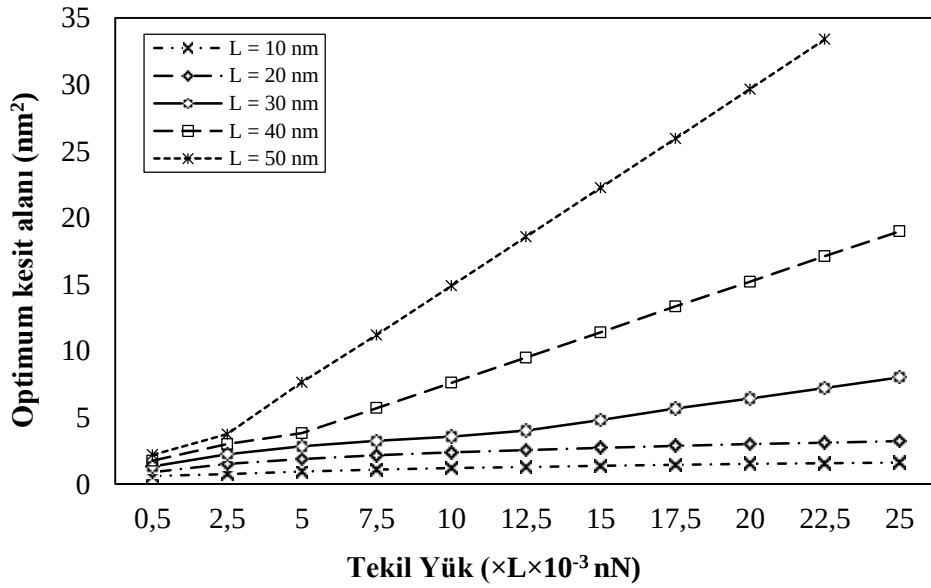


(b)

Şekil 4.7. Farklı malzemelerden imal edilmiş C – F kirişlerinin artan yayılı yük değerleri ve farklı uzunluk değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri **a)** CNT **b)** BNNT

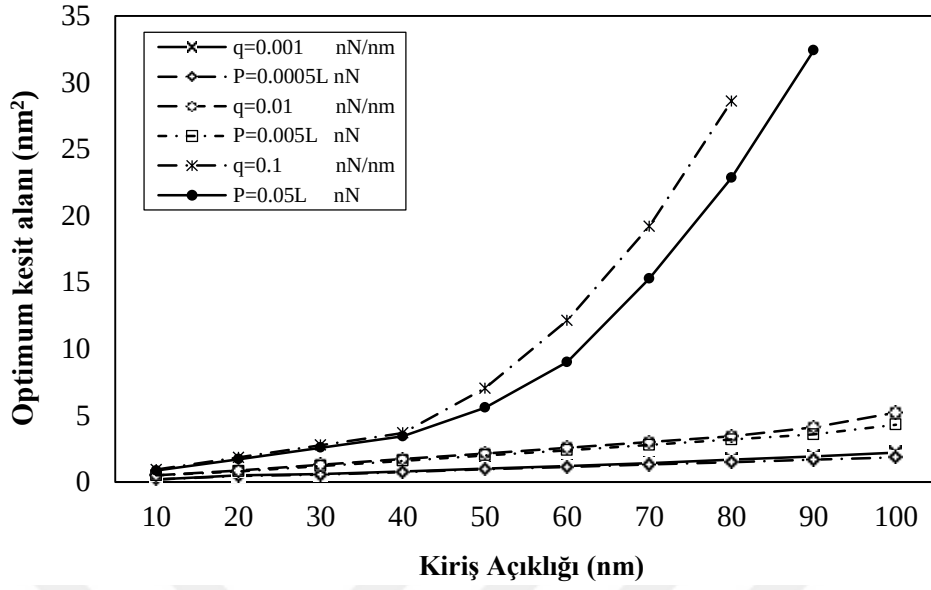


(a)

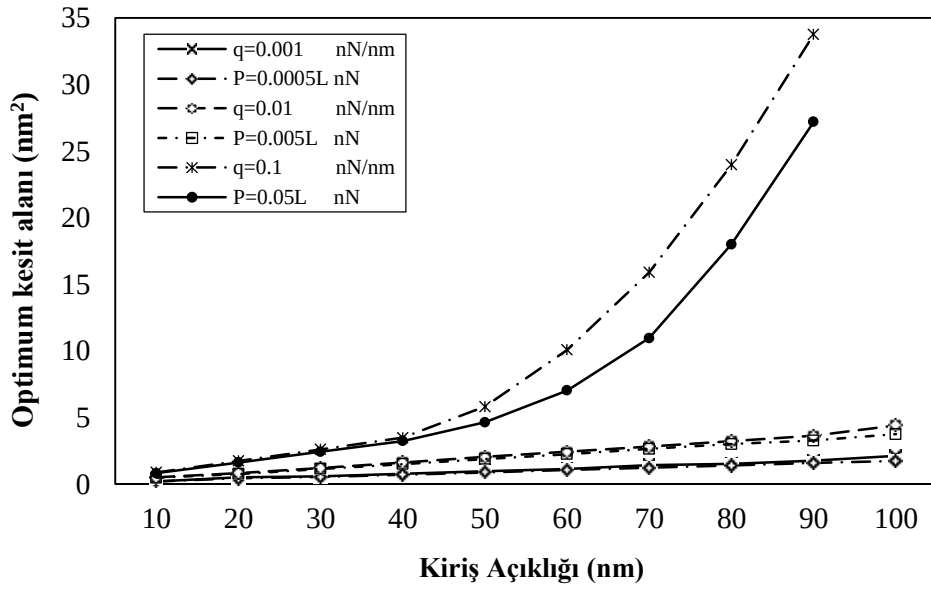


(b)

Şekil 4.8. Farklı malzemelerden imal edilmiş C – F kirişlerinin artan yayılı yüke eşit eğilme etkisi verecek biçimde seçilmiş tekil yük değerleri ve farklı uzunluk değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri **a) CNT b) BNNT**

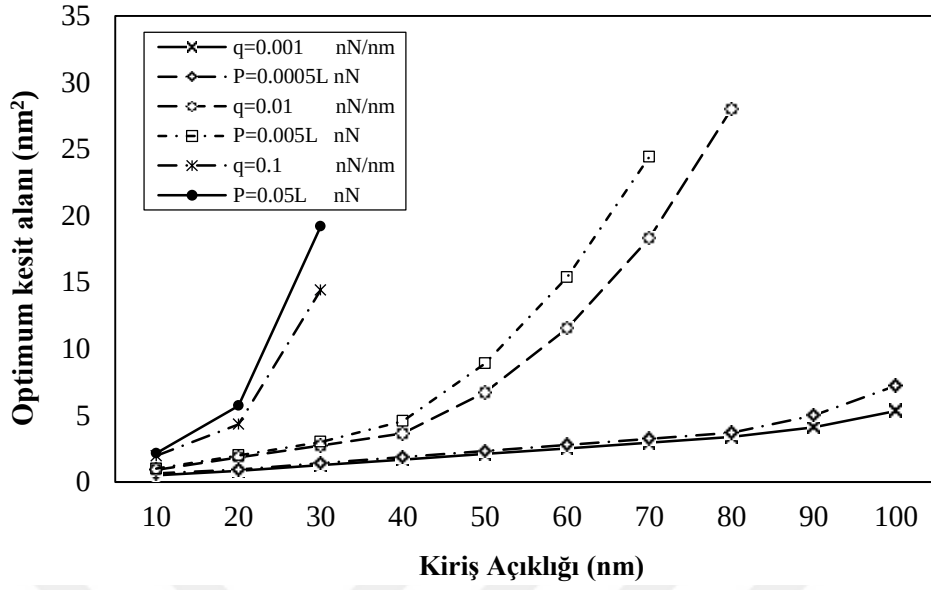


(a)

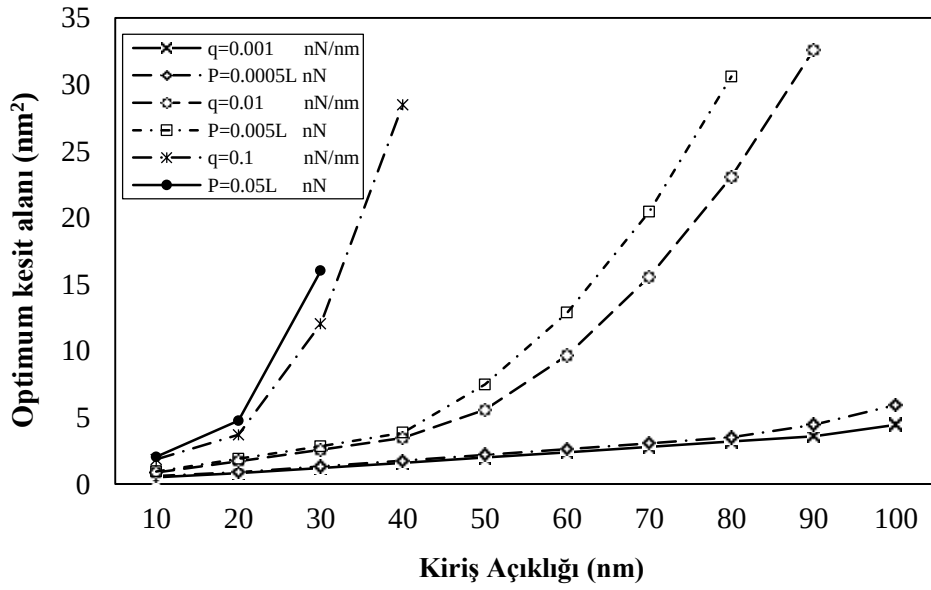


(b)

Şekil 4.9. Farklı malzemelerden imal edilmiş S – S kirişlerinin artan açıklık değerleri ve birbirine göre maksimum eğilme etkisi eşit olacak biçimde seçilmiş farklı yayılı ve tekil yük çifti değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri **a) CNT b) BNNT**



(a)



(b)

Şekil 4.10. Farklı malzemelerden imal edilmiş C – F kirişlerinin artan açıklık değerleri ve birbirine göre maksimum eğilme etkisi eşit olacak biçimde seçilmiş farklı yayılı ve tekil yük çifti değerlerine karşı gelen optimum kesit alan değerleri **a)** CNT **b)** BNNT

5. TARTIŞMA

Tez kapsamında eğilme varsayımlarından Euler – Bernoulli varsayımına göre kirişler, nano ölçekte ele alınmıştır. Bu optimum tasarım problemi daha farklı kiriş teorilerine de uygulanabilir. Mesela eğilmeye maruz yapının eğilme olayının çözümlenebilmesi için kayma deformasyonlarını da göz önüne alan Timoshenko kirişleri için literatürden rahatça bulunabilecek eğilme formülasyonları da optimizasyon tekniğinin algoritmasına entegre edilerek sonuçlar elde edilebilir ve kıyaslama yapılabilir. Belirtilmelidir ki kesme etkilerinin belirginleşmeye başladığı durumlarda eğilme kuramları farklılık göstereceğinden optimum tasarım sonuçları da değişkenlik gösterebilir.

Nanokirişler klasik teoriye göre çözülmüştür. Bir örnek boyut etkisine yani yerel olmayan elastisite teorisine göre çözülmüştür ancak sayısal netice verilmemiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiği zaman nanoyapılar, klasik teoriyle beraber başka teorilerle de ele alınırlar. Bu teorilerden bazıları yerel olmayan elastisite teorisinin yanı sıra değiştirilmiş gerilme çifti elastisite teorisi, değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorisi, yüzey enerjili elastisite teorisidir. Teorilerin bütünüün temeli, mikro ve nanoölçekteki malzemenin mekanik davranışına atomik boyutların etki edeceği fikrine dayanır. Dahası, bu teorilerle elde edilen sonuçlar çoğu zaman klasik teoriyle elde edilen sonuçlardan çok daha farklıdır ve çoğunlukla gerçeğe uygun nitelikte olabilmektedir.

Optimizasyon probleminin analizleri, sosyal örümcek optimizasyonu algoritmasına göre yapılmıştır. Diğer evrimsel optimizasyon yöntemlerinin algoritmaları da programlanarak bu tasarım problemi, programlara entegre edilebilir ve elde edilen optimum alan sonuçlarının kıyaslanması yapılabilir.

6. SONUÇLAR

Sonuçlar göstermektedir ki, bu problem üzerinde deplasman, gerilmeye göre oldukça baskındır. Genelde deplasman kısıtının %99'u kullanılırken gerilme kısıtı en fazla %15-16 dolaylarında kullanılmaktadır.

Sonuçlara etki eden faktörlere bakılacak olursa elastisite modülü yüksek olan malzemelerin daha düşük optimum kesit alan vermesi gerekir çünkü elastisite modülü yüksek olan malzemeler eğilme rijitliği arttığı için daha az deplasman yaparlar. Dolayısı ile CNT ile elde edilen optimum kesit alan değerleri, BNNT ile elde edilen değerlerden daha yüksektir.

Sonuçlar üzerinde yükün ve mesnetlenmenin etkisi de oldukça önemlidir. Elbette yük arttığı zaman deplasman artacağı için optimum kesit alan artacaktır. Bunun yanı sıra, hatırlanacak yayılı yüke karşı gelen tekil yük değeri, S – S ve C – F kirişlerinin her ikisi için de maksimum eğilme etkileri eşit olacak biçimde seçilmiştir. Ancak eğilmenin eşit etki verecek biçimde seçilmesi deplasman kısıtını etkilemez. S – S kirişinde yayılı yük durumunda deplasman daha yüksek iken C – F kirişinde tekil yük durumunda deplasman daha yüksek değerdedir. O halde eğilme etkileri aynı olan yüklemeler kirişe etkilense bile deplasman etkileri farklı olacağından seçilen kesit alan miktarları arasında bir farklılık olmalıdır ve sonuçlar da bu söyleneni göstermiştir. Öte yandan her faktörün eşit olduğu durumlarda S – S kirişi ile elde edilen alan miktarı, C – F ile elde edilenden daha azdır.

Uzunluğun artmasının ise optimum kesit alan ihtiyacını artıracığı açıktır. Ancak büyük yük değerlerinde seçilen optimum alanlar, tezde belirtilen sınırlar içinde yer almadığından genelde 80 nm ve üzerindeki değerlerde optimum tasarım yapılamamıştır.

Seçim yapılan kesiti bakılacak olursa, öncelikle şu belirtilmelidir ki, daire ve dikdörtgenin sınırları alanca birbirine eşit olacak biçimde seçilmiştir. Bununla beraber seçimi yapılan kesit türü ekseriyetle dikdörtgensel kesittir çünkü daire ve dikdörtgenin eşit atalet momentli olduğu durumlarda dikdörtgen kesitin alanı daha düşük olacaktır ve daire kesitin seçimi optimum olmayacaktır (Numanoğlu 2017).

7. KAYNAKLAR

- Akgöz, B. 2010. Yüksek mertebeden elastisite teorileriyle mikro ve nano yapıların lineer ve lineer olmayan analizleri. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 72s.
- Cenger, Y. 2006. Nanoteknoloji ve karbon nanoyapılar. Lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 80s.
- Chen, Y. 2014. Nanotubes and nanosheets, CRC Press, Boca Raton, 607 s.
- Cireli, A., Kutlu, B., Onar, N., Erkan, G. 2006. Tekstilde ileri teknolojiler. *TMMOB Tekstil Mühendisleri Odası Tekstil ve Mühendis Dergisi*.
- Çıracı, S. 2005. Nanoteknolojide yeni ufuklar, *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- Elibol, K. 2012. Karbon elementi ve nanoteknolojideki yeri. <http://www.kuark.org/2012/08/karbon-elementi-ve-nanoteknolojideki-yeri/>. [Son erişim tarihi: 05.07.2016]
- Emrullahoğlu, Ö.F., Emrullahoğlu, C.B., Günaydın, S. 2002. Bor nitrür üretimi, sf 124-128, 3-4 Ekim, 1. Uluslararası Bor Sempozyumu, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Erkoç, Ş. 2001. Karbon nano yapılar, *Bilim ve Teknik Dergisi*.
- Grant, A. 2014. 'Impermeable' graphene yields to protons. <https://www.sciencenews.org/article/%E2%80%98impermeable%E2%80%99-graphene-yields-protons>. [Son erişim tarihi: 17.08.2017]
- Hançer, S. 2010. Çift duvarlı karbon nanotüplerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 43 s.
- Işık, Ç. 2011. Nano ve mikro yapıların yerel olmayan elastisite teorisi ile eğilme ve titreşim hesabı. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 143s.
- İnan, M. 1970. Cisimlerin Mukavemeti. Ofset Matbaacılık, İstanbul, 560 s.
- Karlicic, D., Murmu, T., Adhikari, S., Mccarthy, M., 2016. Non-local structural mechanics. Iste – Wiley, 354 s.
- Kaltakçı, M.Y. 2008. Çözümlü örneklerle mukavemet. Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Ders Notları Yayını, Konya, 406 s.
- Kutucu, B. 2010. Nanoteknoloji ve çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 84 s.
- Murmu, T., Adhikari, S., Mccarthy, M.A., 2014. Axial vibration of embedded nanorods

under transverse magnetic field effects via. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 11: 1–7.

Numanoğlu, H.M. 2017. Karbon nanotüplerin gerilme ve deplasman sınırlayıcıları altında kırış modeli ve optimum tasarımı. TÜBİTAK 2209–A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Sonuç Raporu (yayınlanmamış), Antalya.

Omurtag, M.H. 2013. Mukavemet Cilt 2. Birsen Yayınevi, İstanbul, 480 s.

Omurtag, M.H. 2014. Mukavemet Cilt 1. Birsen Yayınevi, İstanbul, 484 s.

Özbayram, F. 2014. ‘Impermeable’ graphene yields to protons. <https://malzemebilimi.net/kompozit-malzemelerde-bor-nitrur-kullanimi.html>. [Son erişim tarihi: 04.06.2017]

Özer, Y. 2008. Nanobilim ve nanoteknoloji: Ülke güvenliği/etkinliği açısından doğru modeli belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Kara Harp Okulu, 197 s.

Rafii – Tabar, H. 2007. Computational physics of carbon nanotubes. Cambridge University Press, Cambridge, 493 s.

Reddy, J.N., Pang S.D. 2008. Nonlocal continuum theories of beams for the analysis of carbon nanotubes. *Journal of Applied Physics*, 103(2): 1-16.

Seçgin, S. 2010. Karbon nanotüplerin çökme davranışlarının sürekli ortam kırış modelleri kullanılarak incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi, 51 s.

Sevi, A.H. 2006. Nanoteknolojide karbon nanotüplerin dayanıklılık simülasyonu, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 43 s.

Süngü, B. 2006. Sıkı bağ moleküler dinamik yöntemiyle karbon nanotüplerin bilgisayar simülasyonu. Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 134s.

Tepe, A. 2007. Nanoteknolojide nano ölçekteki yapıların yerel olmayan elastisite çerçevesinde incelenmesi. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 99 s.

Thai, H.T. 2012. A nonlocal beam theory for bending, buckling and vibration of nanobeams. *International Journal of Engineering Science*, 52: 56–64.

Toksöz, A.K. 2010. Yerel olmayan elastisite teorisinde Açık ve Ritz yöntemlerinin nanoteknolojiye uygulanması. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 134s.

Yaylı, M.Ö. 2010. Yerel olmayan elastisite teorisine göre nano ölçekteki kırışların doğrusal olmayan teoriye göre incelenmesi. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 85s.

- Yetkin, M. 2015. Düzlem çelik çerçevelerin sosyal örümcek optimizasyonuna göre boyutlandırılması, Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 70 s.
- Yükseltürk A. 2008. Karbon nanotüplerin elde edilmesi. http://nanoturkiye.blogspot.com.tr/2008/04/nano-101-karbon-nanotpler3_21.html [Son erişim tarihi: 08.06.2016]
- Yürüm, Y., Saner Okan, B., Kocabaş, Z.Ö., Okyay, F., Nalbant Ergün, A., Gümrah Dumanlı, A., Yürüm, A. 2011. Bor ve karbon Nanomalzemelerin üretimi ve karakterizasyonu. Kocaeli Nanoteknoloji Günleri, Kocaeli.
- Zhi, C., Bando, Y., Tan, C., Golberg, D. 2005. Effective precursor for high yield synthesis of pure BN nanotubes. *Solid State Communications*, 135(1): 67-70.
- Anonim 1: <http://www.kuark.org/>.
[Son erişim tarihi: 21.06.2017]
- Anonim 2: <https://malzemebilimi.net/>.
[Son erişim tarihi: 17.06.2017]
- Anonim 3: <https://www.slideshare.net/kalyoncu89/karbonnanotpler-ve-teknolojide-kullanım>.
[Son erişim tarihi: 22.06.2017]
- Anonim 4: <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~mehmet09/html/bor.html>.
[Son erişim tarihi: 16.06.2017]
- Anonim 5: <http://www.nkfu.com/nitrojen-azot-nedir-nitrojen-elementinin-ozellikleri/>.
[Son erişim tarihi: 04.06.2017]
- Anonymous 1: 'Impermeable' graphene yields to protons.
<https://www.sciencenews.org/article/'impermeable'-graphene-yields-protons>.
[Son erişim tarihi: 07.06.2017]
- Anonymous 2: <http://www.unnderstandingnano.com/>
[Son erişim tarihi: 20.06.2017]

8. EKLER

Bu çalışmada yapıldığı gibi çalışmadaki veya farklı bir optimizasyon tekniği kullanılarak nano-ölçekteki kirişlerin serbest titreşim analizi yapılabilir. Bu durumda optimizasyon kısıtları, amaç fonksiyonu ve tasarım değişkenleri değişiklik gösterebilecektir. Örnek vermek gerekirse sürekli kirişlerin temel mod frekanslarının belli bir sınırın üstünde olacak şekilde tasarımı bir optimizasyon problemidir ve ilgili sınır optimizasyon kısıtını belirtir. Frekansı etkileyen parametrelerin elastisite modülü, birim hacim ağırlığı, kesit alan ve uzunluk olduğu düşünülürse cinsi bilinen bir malzemenin kesit boyutları optimize edilebilir. Boyutlar tasarım değişkenidir. Amaç fonksiyonu ise problemin boyutuna göre cismin hacmi veya kesit alan olacaktır. Öte yandan değişken kesitli kirişlerin de optimum tasarımı gerçekleştirilebilir. Optimizasyon probleminin niteliği boyut etkisi katılarak da genişletilebilir.



ÖZGEÇMİŞ

SERÇİL SOLMAZ

sercilsolmaz@hotmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2015-2017	Fen Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi
2010-2014	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Tasarım Mühendisliği	
2017- Devam Ediyor	Peri Kalıp ve İskeleleri Şirketi Antalya