

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



KARBON NANOTÜPLERİN KİRİŞ MODELİ İLE ANALİZİ

Dahi ŞEN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2021

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



KARBON NANOTÜPLERİN KİRİŞ MODELİ İLE ANALİZİ

Dahi ŞEN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2021

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜPLERİN KİRİŞ MODELİ İLE ANALİZİ

Dahi ŞEN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 09/07/2021 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ömer CİVALEK
Doç. Dr. Mehmet AVCAR
Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ

ÖZET

KARBON NANOTÜPLERİN KİRİŞ MODELİ İLE ANALİZİ

Dahi ŞEN

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Temmuz 2021; 65 sayfa

Bu tez çalışmasında karbon nanotüplerin farklı yük ve mesnetlenme durumunda statik analizleri yapılmış olup, farklı kesitler için titreşim frekansları hesaplanmıştır. Kullanılan mesnetlenme şekillerinin deplasmanlar üzerine etkisi irdelenmiş olup, grafik ve tablolar halinde sunulmuştur. Benzer şekilde farklı kesitlerin titreşim frekansları üzerinde oluşturduğu etkiler de incelenmiştir. Kirişlerin serbest titreşim denklemi çıkarımında değişkenlerine ayırma metodu kullanılmıştır. Titreşim hesapları için çıkarımlar da bulunulmuş, farklı modlar için grafikler halinde gösterilmiştir.

Alınan neticeler ışığında farklı yüklenme ve mesnetlenme için farklı deplasmanlar elde edilmiştir. Benzer şekilde kuvvet etkisindeki kirişin kuvvetin etki ettiği konumla değiştiği, dolayısıyla yük mesafesinin de önem arz ettiği görülmektedir. Titreşim hesabı için mesnet koşullarına göre yapılan analizlerde içi boş veya dolu olmak üzere daire, dikdörtgen, üçgen ve içi dolu I ile altıgen kesitlerde farklı modlara ve periyotlara ulaşılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Deplasman, Karbon nanotüp, Kiriş modeli, Nanoteknoloji, Titreşim.

JÜRİ: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Doç. Dr. Mehmet AVCAR

Dr. Öğr. Üyesi Bekir AKGÖZ

ABSTRACT

ANALYSIS OF CARBON NANOTUBES WITH BEAM MODEL

Dahi ŞEN

MSc. Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

July 2021; 65 pages

In this thesis, the carbon nanotubes were subjected to static analysis in different load and bearing conditions and the vibration frequencies were calculated for different sections. The effects of the abovementioned support forms on displacements are examined and presented as graphs and tables. Similarly, the effects of different sections on vibration frequencies were also investigated. Separation of variables in the free vibration equation of the beams was used. Inferences for the vibration calculations are also shown and graphs are shown for different modes.

In the light of the results obtained, different displacements have been obtained for different loading and support. Similarly, it is seen that the force under the effect of the beam changes with the position of the force and therefore the load distance is also important. In the analyzes made according to the bearing conditions for the vibration calculation, different modes and periods were reached in the hexagonal sections with circles, rectangles, triangles and solid I and hollow or full.

KEYWORDS: Beam model, Carbon nanotube, Displacement, Nanotechnology, Vibration.

COMMITTEE: Prof. Dr. Ömer CİVALEK

Assoc. Prof. Dr. Mehmet AVCAR

Asst. Prof. Dr. Bekir AKGÖZ

ÖNSÖZ

Teknolojinin gelişmesi ve nano boyutta incelemelerin yapılması birçok yeniliğin öncüsü olmuştur. Her geçen yıl ilerleyen ve 1 ile 100 nm boyutlarındaki maddeleri inceleyen nanoteknoloji malzeme, elektronik ve bilgisayar teknolojileri, sağlık sektörü, havacılık ve uzay araştırmaları gibi birçok alanda uygulanmaktadır. Uygulama alanlarının geniş bir yelpazede ele alınmasına karşın yapılan çalışmalar gösteriyor ki her yenilikte farklı problemler ortaya çıkmaktadır.

Ele alınan mikro ve nano yapıların farklı bir işleyişi olduğundan kuantum mekaniği gibi fizik kurallarının ağırlık kazandığı görülmektedir. Dolayısıyla ele alınması gereken asıl problem malzemelerin davranışını görmektedir. Bu çalışmada analizleri yapılacak olan karbon nanotüpler de nanoteknolojinin bir ürünü olarak karşımıza çıkmaktadır. Karbon nanotüplerin gerek analizlerinde gerek davranışında incelemeler yapılacaktır.

Çalışmalarım esnasında bilgi birikimini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ömer CİVALEK'e ve hayatım boyunca beni destekleyip yanımda olan aileme ve eşime en içten teşekkürlerimi arz ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	2
2.1. Nanoteknoloji	2
2.1.1. Nanoteknolojinin tanımı	2
2.2.1. Nanoteknolojinin amacı.....	2
2.2. Karbon Nanotüpler	3
2.2.1. Tek duvarlı karbon nanotüp.....	3
2.2.2. Çok duvarlı karbon nanotüp	3
3. MATERYAL VE METOT	4
3.1. Kirişlerde Deplasman Hesabı	4
3.1.1. Her iki ucu basit mesnet durumu	4
3.1.2. Her iki ucu ankastre mesnet ve üzerinde yayılı yük olma durumu.....	5
3.1.3. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve üzerinde boş uca doğru azalan yük olma durumu.....	5
3.1.4. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta moment olma durumu....	6
3.1.5. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta tekil yük olma durumu...	6
3.1.6. İki ucu boşta ve uçlarında moment olma durumu	7
3.1.7. Bir ucu ankastre mesnet diğer ucu boşta ve üzerinde yayılı yük	7
3.1.8. İki ucu basit mesnet ve üzerinde yayılı yük olma durumu	8
3.1.9. İki ucu basit mesnet ve üzerinde birinci mesnede yakın tekil yük	8
3.1.10. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta	9
3.2. Bazı Sınır Koşulları İçin Titreşim Hesabı	9
3.2.1. Her iki ucu basit mesnet durumu	11
3.2.2. Her iki ucu ankastre mesnet durumu	13

3.2.3. Bir ucu ankastre bir ucu basit mesnet durumu.....	14
3.2.4. Her iki ucu serbest mesnet durumu	15
3.2.5. Bir ucu ankastre bir ucu boşta mesnet durumu.....	16
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	20
4.1. Statik Analiz	20
4.1.1. Her iki ucu basit mesnet durumu	22
4.1.2. Her iki ucu ankastre mesnet ve üzerinde yayılı yük olma durumu.....	24
4.1.3. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta olma durumu.....	24
4.1.4. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta moment	26
4.1.5. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta tekil yük olma	28
4.1.6. İki ucu boşta ve uçlarında moment olma durumu	30
4.1.7. Bir ucu ankastre mesnet diğer ucu boşta ve üzerinde yayılı yük.....	32
4.1.8. İki ucu basit mesnet ve üzerinde yayılı yük olma durumu	34
4.1.9. İki ucu basit mesnet ve üzerinde birinci mesnede yakın tekil yük	36
4.1.10. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta tekil yük durumu.....	37
4.2. Dinamik Analiz	39
4.2.1. Her iki ucu basit mesnet durumu	40
4.2.2. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu basit mesnet durumu	47
4.2.3. İki ucu ankastre mesnet durumu	53
5. SONUÇLAR	63
6. KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Karbon nanotüplerin giriş modeli ile 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.

09/07/2021

Dahi ŞEN



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

L	: Kiriş uzunluğu
A	: Kesit alanı
I	: Atalet momenti
E	: Elastisite modülü
w	: Mod şekli
n	: Mod sayısı
δ	: Deplasman
P	: Tekil yük
q	: Yayılı yük
M	: Eğilme momenti

Bu tezde ondalık ayıraç olarak nokta işareti (.) kullanılmıştır.

Kısaltmalar

nm	: Nanometre
nN	: Nanonewton
MNT	: Moleküler nanoteknoloji

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. İki ucu basit mesnet ve uygulanan tekil yük.....	4
Şekil 3.2. İki ucu ankastre mesnet ve uygulanan yayılı yük.....	5
Şekil 3.3. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve uygulanan azalan yayılı yük	5
Şekil 3.4. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta uygulanan moment	6
Şekil 3.5. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta tekil yük	6
Şekil 3.6. İki ucu boşta ve uygulanan momentler	7
Şekil 3.7. Ankastre mesnet ve uygulanan yayılı yük	7
Şekil 3.8. Basit mesnet ve uygulanan yayılı yük	8
Şekil 3.9. Basit mesnet ve uygulanan tekil yük	8
Şekil 3.10. Bir ucu ankastre ve uygulanan tekil yük.....	9
Şekil 4.1. Çözümü yapılan kesitler	40
Şekil 4.2. Kesitlerin birinci moddaki frekanslarının uzunluk ile değişimleri.....	46
Şekil 4.3. Kesitlerin birinci moddaki frekanslarının uzunluk ile değişimleri.....	52
Şekil 4.4. Kesitlerin birinci moddaki frekanslarının uzunluk ile değişimleri.....	58
Şekil 4.5. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi dolu daire kesitin ilk 5 moddaki frekansları....	59
Şekil 4.6. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi boş daire kesitin ilk 5 moddaki frekansları	59
Şekil 4.7. Aynı uzunluktaki (10 nm) dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki frekansları	60
Şekil 4.8. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi boş dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki frekansları.....	60
Şekil 4.9. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi dolu üçgen kesitin ilk 5 moddaki frekansları.....	61
Şekil 4.10. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi boş üçgen kesitin ilk 5 moddaki frekansları.....	61
Şekil 4.11. Aynı uzunluktaki (10 nm) I kesitin ilk 5 moddaki frekansları	62
Şekil 4.12. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi dolu altıgen kesitin ilk 5 moddaki frekansları.....	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kenar koşullarına bağlı frekans denklem ve değerleri	18
Çizelge 3.2. Farklı sınır koşullarındaki titreşim modları	19
Çizelge 4.1 Farklı kesitler için atalet değerleri	20
Çizelge 4.2. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	20
Çizelge 4.3. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	21
Çizelge 4.4. Farklı P değerleri için deplasman değerleri	21
Çizelge 4.5. Farklı P değerleri için deplasman değerleri	22
Çizelge 4.6. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	22
Çizelge 4.7. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	23
Çizelge 4.8. Farklı q değerleri için deplasman değerleri	23
Çizelge 4.9. Farklı q değerleri için deplasman değerleri	24
Çizelge 4.10. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	24
Çizelge 4.11. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	25
Çizelge 4.12. Farklı q değerleri için deplasman değerleri	25
Çizelge 4.13. Farklı q değerleri için deplasman değerleri	26
Çizelge 4.14. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	26
Çizelge 4.15. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	27
Çizelge 4.16. Farklı M değerleri için deplasman değerleri	27
Çizelge 4.17. Farklı M değerleri için deplasman değerleri	28
Çizelge 4.18. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	28
Çizelge 4.19. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	29
Çizelge 4.20. Farklı P değerleri için deplasman değerleri	29
Çizelge 4.21. Farklı P değerleri için deplasman değerleri	30
Çizelge 4.22. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	30
Çizelge 4.23. Farklı L değerleri için deplasman değerleri	31

Çizelge 4.24. Farklı M değerleri için deplasman değerleri.....	31
Çizelge 4.25. Farklı M değerleri için deplasman değerleri.....	32
Çizelge 4.26. Farklı L değerleri için deplasman değerleri.....	32
Çizelge 4.27. Farklı L değerleri için deplasman değerleri.....	33
Çizelge 4.28. Farklı q değerleri için deplasman değerleri	33
Çizelge 4.29. Farklı q değerleri için deplasman değerleri	34
Çizelge 4.30. Farklı L değerleri için deplasman değerleri.....	34
Çizelge 4.31. Farklı q değerleri için deplasman değerleri	35
Çizelge 4.32. Farklı q değerleri için deplasman değerleri	35
Çizelge 4.33. Farklı q değerleri için deplasman değerleri	36
Çizelge 4.34. Tekil yükleme için a, b ve c değerleri.....	36
Çizelge 4.35. Farklı P değerleri için deplasman değerleri	37
Çizelge 4.36. Farklı P değerleri için deplasman değerleri	37
Çizelge 4.37. Tekil yükleme için a ve b değerleri	38
Çizelge 4.38. Farklı P değerleri için deplasman değerleri	38
Çizelge 4.39. Farklı P değerleri için deplasman değerleri	39
Çizelge 4.40. İçi dolu daire kesit özellikleri	40
Çizelge 4.41. İçi dolu daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları	41
Çizelge 4.42. İçi boş daire kesit özellikleri.....	41
Çizelge 4.43. İçi boş daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları.....	41
Çizelge 4.44. İçi dolu dikdörtgen kesit özellikleri	42
Çizelge 4.45. İçi dolu dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları.....	42
Çizelge 4.46. İçi boş dikdörtgen kesit özellikleri	42
Çizelge 4.47. İçi boş dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları	43
Çizelge 4.48. İçi dolu üçgen kesit özellikleri.....	43

Çizelge 4.49. İçi dolu üçgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları.....	43
Çizelge 4.50. İçi boş üçgen kesit özellikleri	44
Çizelge 4.51. İçi boş üçgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları	44
Çizelge 4.52. I kesit özellikleri	44
Çizelge 4.53. I kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları	45
Çizelge 4.54. İçi dolu altıgen kesit özellikleri	45
Çizelge 4.55. İçi dolu altıgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları ..	46
Çizelge 4.56. İçi dolu daire kesit özellikleri	47
Çizelge 4.57. İçi dolu daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları	47
Çizelge 4.58. İçi boş daire kesit özellikleri.....	47
Çizelge 4.59. İçi boş daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları.....	48
Çizelge 4.60. İçi dolu dikdörtgen kesit özellikleri.....	48
Çizelge 4.61. İçi dolu dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları.....	48
Çizelge 4.62. İçi boş dikdörtgen kesit özellikleri	49
Çizelge 4.63. İçi boş dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları.....	49
Çizelge 4.64. İçi dolu üçgen kesit özellikleri.....	49
Çizelge 4.65. İçi dolu üçgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları....	50
Çizelge 4.66. İçi boş üçgen kesit özellikleri	50
Çizelge 4.67. I kesit özellikleri	50
Çizelge 4.68. İçi boş üçgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları	51
Çizelge 4.69. I kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları	51
Çizelge 4.70. İçi dolu altıgen kesit özellikleri	51
Çizelge 4.71. İçi dolu altıgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları ..	52
Çizelge 4.72. İçi dolu daire kesit özellikleri	53
Çizelge 4.73. İçi dolu daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları	53

Çizelge 4.74. İçi boş daire kesit özellikleri.....	53
Çizelge 4.75. İçi boş daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları.....	54
Çizelge 4.76. İçi dolu dikdörtgen kesit özellikleri.....	54
Çizelge 4.77. İçi dolu dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları.....	54
Çizelge 4.78. İçi boş dikdörtgen kesit özellikleri	55
Çizelge 4.79. İçi boş dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları.....	55
Çizelge 4.80. İçi dolu üçgen kesit özellikleri.....	55
Çizelge 4.81. İçi dolu üçgen kesitin ilk 5 mod farklı uzunluklardaki frekansları.....	56
Çizelge 4.82. İçi boş üçgen kesit özellikleri	56
Çizelge 4.83. İçi boş üçgen kesitin ilk 5 mod farklı uzunluklardaki frekansları	56
Çizelge 4.84. I kesit özellikleri	57
Çizelge 4.85. I kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları	57
Çizelge 4.86. İçi dolu altıgen kesit özellikleri	57
Çizelge 4.87. İçi dolu altıgen kesitin ilk 5 mod farklı uzunluklardaki frekansları	58

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar her geçen gün hız kazanarak ilerleyen teknoloji, her alanda karşımıza çıkmaktadır. Şu an kullandığımız teknolojileri geçmişte hayal bile edemez durumdaydık. Özellikle yakın tarihimize baktığımızda bilim ve teknolojiye hızla büyük mesafeler kat ettiğimiz ortada. Sanayi devrimi, otomotiv devrimi, kuantum mekaniği kuramlarının ortaya çıkması gibi tarihteki bu sıçramalardan sonra sıra nanoteknolojide.

Nanoteknoloji mekanik, yer bilimi, organik kimya, moleküler biyoloji, yarı iletken fiziği, mikro fabrikasyon gibi bilim alanlarını içerdiğinden çok geniş alana sahiptir. İlgili araştırma ve uygulamalar da aynı şekilde çeşitlidirler. Nanoteknoloji ilaç, elektronik, biyomalzeme ve enerji sektörü geniş yelpazesıyla birçok araç ve madde üretebilir. Bu maddelerden biri de karbon nanotüpleridir.

Karbon nanotüplerin yapısını açıklayabilecek en basit model tek duvarlı bir tüp için şu şekildedir: Tek sıra karbon atomundan oluşan bir grafen katmanının, silindir şekilde bükülerek uçlarının birleştirildiği ve grafen içerisindeki bağların aynısından oluşturulduğu düşünülürse bu yapı tek katmanlı bir karbon nanotüp ile aynı yapıda olur. Kısacası karbon nanotüp grafitin bal peteğini andıran atom düzleminin bir silindir üzerine hiçbir kusur oluşturmada kesiksiz olarak sarılmış bir şekli olarak düşünülebilir. Tek katmanlı nanotüpler iç içe geçerek çok katmanlı nanotüp oluşturur.

Karbon nanotüplerin analizi için mekanik biliminden faydalanılmaktadır. Nanomekanik, mekanik biliminin moleküler düzeyde incelenmesini kapsayan, malzeme bilimi ile desteklenen bir daldır. Karbon nanotüplerin bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesinde osilatör ve algılayıcı gibi çeşitli elektromekanik sistemlerin modellenmesinde kullanımları açısından önem arz etmektedir. Ayrıca karbon nanotüpler kompozit malzemelerde katkı elemanı olarak kullanılmaktadır. Tüm bu çalışmaların yapılabilmesi için karbon nanotüplerin çökme davranışı incelenmelidir.

Sürekli ortam mekaniği hem katı hem de akışkan maddeleri içine alan mekaniğin alt dallarından biridir. Basit eğilme etkisindeki bir kirişin herhangi bir yerindeki düşey yer değiştirmeyi bulmak için başvuru yöntemleri içerisinde barındırır. Sonucu etkileyen parametreleri (elastisite modülü, atalet momenti, yükleme durumu) içeren bir diferansiyel denklem yazılır ve mesnet koşullarına bağlı olarak sınır değerlere göre entegre edilip problemler çözülür. Bu bağlamda, karbon nanotüplerin hem düşey yer değiştirmesi hem de titreşim analizleri yapılırken kiriş modellerine başvurulacaktır.

Oluşturulan karbon nanotüplerin kiriş modellerinin deplasman analizleri ile titreşim hesapları yapılacak ve çıkarımlarda bulunulacaktır.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Nanoteknoloji

2.1.1. Nanoteknolojinin Tanımı

Kaliforniya'daki Foresight Enstitüsü başkanı Dr. Eric Drexler, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'ndeki eğitimi sırasında, biyolojik sistemlerden esinlenerek molekül makinelere yapılabileceğini önermiştir ve nanoteknoloji kelimesini ilk kez ortaya çıkarmıştır.

Nanoteknoloji, çok genel tanımıyla, istisnai şekilde küçük (yaklaşık atom boyutlarında) yapıların ticari bir amaca hizmet edebilecek şekilde düzenlenmesidir. Başka şekilde tanımlamak gerekirse: Maddeler üzerinde 100 nanometre ölçeğinden küçük boyutlarda gerçekleştirilen işleme, ölçüm, modelleme ve düzenleme gibi çalışmalar nano-teknoloji çalışmaları olarak nitelenir. Nanometre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) ölçeğindeki fiziksel, kimyasal ve biyolojik olayların anlaşılması, kontrolü ve üretimi amacıyla, fonksiyonel materyallerin, cihazların ve sistemlerin geliştirilmesidir.

Gelecekte bu teknoloji muhtemelen Moleküler Nanoteknolojisi (MNT) adıyla nano büyüklüğündeki boyutlarıyla yapı makineleri ve mekanizmalarını da içerecektir. Nanoteknoloji ölçü olarak nanometre adı verilen (kısa şekli nm) bir ölçme birimini kullanılır. Her bir ölçüde 1 milyar nm vardır. Her bir nm sadece 3 ile 5 atom genişliğindedir yani ortalama bir insan saç kalınlığından yaklaşık 40.000 kez daha küçüktür. Atomlar bakterilerin 1/10.000, bakteriler ise bir sivrisineğin 1/10.000 büyüklüğündedirler. Nanoteknoloji, atomlarla oynayan bir teknolojidir. Atom ve molekülleri tek tek manipüle ederek istenilen yapının oluşturulması ilkesine dayanır. Yaklaşık 100-1000 atom bir araya gelerek nano ölçeklerde bir nesneyi oluşturmaktadır. Nanoteknoloji de bu bağlamda “çok küçük maddelerin teknolojisi” olmaktadır. 1 nanometre, hidrojen atomunun çapının sadece 10 katıdır. Ne kadar küçük olduğunu canlandırmak zordur; boyutları giderek küçülen transistörlü radyolar, cep telefonları vb. aygıtlar nanoteknoloji dünyasında yeri olmayan dev yapılarıdır.

Maddeleri moleküler ya da nanometre düzeyinde ele alan bir mühendislik bilimi olan nanoteknoloji, daha güçlü ve daha hafif elektronik materyallerin kullanıldığı yeni bir çağ vaat ederek bilim adamlarının son yıllarda umutlarını arttırmaya devam etmektedir. Bilim insanları ve mühendisleri her gün daha küçük boyutlara inmeye, daha az yer kaplayan, daha az enerji harcayarak daha hızlı çalışabilen aygıtlar yapmaya zorlanmıştır.

2.1.2. Nanoteknolojinin amacı

Bir aygıtta kullanılan malzemenin boyutu küçüldükçe, çalışma hızı da artar ve o malzemenin yeni fiziksel özellikleri ortaya çıkar. Boyutlar nanometre ölçeklerine yaklaşırken, malzemenin fiziksel özellikleri kuantum mekaniğinin kontrolüne girip, elektron durumlarının fazı ve enerji spektrumunun kesikli yapısı daha belirgin hale gelmektedir. Daha da önemlisi, malzemeyi oluşturan atom sayıları 100'ler düzeyine inince, atomsal yapının geometrisi, hatta atom sayısının kendisi bile fiziksel özelliklerin belirlenmesinde etken olmaktadır. Örneğin; yarı iletken olarak bilinen ve çağımızın en

önemli malzemesi olan silisyumdan yapılan bir telin çapı nanometreye yaklaşırken tel iletken bir karakter sergilemektedir.

Nanoteknolojinin amaçları kısaca aşağıdaki gibi verilebilir.

- Nanometre ölçekli yapıların analizi,
- Nanometre boyutunda yapıların fiziksel özelliklerinin anlaşılması,
- Nanometre ölçekli yapıların imalatı,
- Nano hassasiyetli cihazların geliştirilmesi,
- Nano ölçekli cihazların geliştirilmesi,
- Uygun yöntemler bulunarak nanoskobik ve makroskobik dünya arasındaki bağın kurulması.

2.2. Karbon nanotüpler

Karbon Nanotüp, karbon elementinin uzunluk-çap oranı 28x106:1 olan allotropudur. Bu oran başka herhangi bir malzemenin sahip olabileceğinden daha büyüktür. Nanotüp'ler fullerenin yapısal grubuna dahildir. Düzgün karbon nanotüp yapılarda atomlar birbirleri ile sp² şeklinde (grafit plakada olduğu gibi) bağlanır, atomlar sadece altıgen geometri oluşturur ve her atomun sadece üç komşusu bulunur. Karbon tüplerin uçlarının koni şeklinde tamamlandığı durumlarda mümkündür. Tek katmanlı (tek duvarlı) ya da çok katmanlı (çok duvarlı) karbon nanotüpler mevcuttur.

2.2.1. Tek duvarlı karbon nanotüp

Karbon nanotüplerin yapısını açıklayabilecek en basit model tek duvarlı bir tüp için şu şekildedir: Tek sıra karbon atomundan oluşan bir grafen katmanının, silindir şeklinde bükülerek uçlarının birleştirildiği ve grafen içerisindeki bağların aynısından oluşturulduğu düşünülürse bu yapı tek katmanlı bir karbon nanotüp ile aynı yapı olur. Kısacası karbon nanotüp grafitin bal peteğini andıran atom düzleminin bir silindir üzerine hiçbir kusur oluşturmada kesiksiz olarak sarılmış bir şekli olarak düşünülebilir. Karbon nanotüpleri 10⁻⁹ metrelik kalınlıklarıyla bir saç telinden daha incedirler, uzunlukları ise bir milimetreden daha kısadır. Fakat bu inceliklerine rağmen çok güçlü ve serttirler. Uygun şekilde üretilirlerse mükemmel iletkenler olarak da kullanılabilirler.

2.2.2. Çok duvarlı karbon nanotüpler

İç içe geçmiş karbon tüplerinde (çok duvarlı tüplerde) iki tüp arasındaki uzaklık, genellikle tüpü oluşturan karbon atomları arasındaki bağ uzaklığından fazladır. Eğer iç içe geçmiş tüplerde, tüplerin duvarları arasındaki uzaklık, karbon atomlarının bağ yapmalarına olanak verecek kadar azsa (0.15 nm), karbon atomları birbirleriyle (sp³ gibi) bağlanır, başka bir deyişle, her karbon atomunun dört bağlı komşusu bulunmaktadır. Bu durumda oluşan çok duvarlı tüp yapısına “karbon nanoçubuk” denir. Çubuklar içi tamamen boş veya içi kısmen dolu tüp yapılardan oluşmaktadır. Bu yapıların esnekliği tüplere göre daha az; ayrıca tek duvarlı tüplerden farklı mekanik ve elektronik özellikler gösterirler.

3. MATERYAL VE METOT

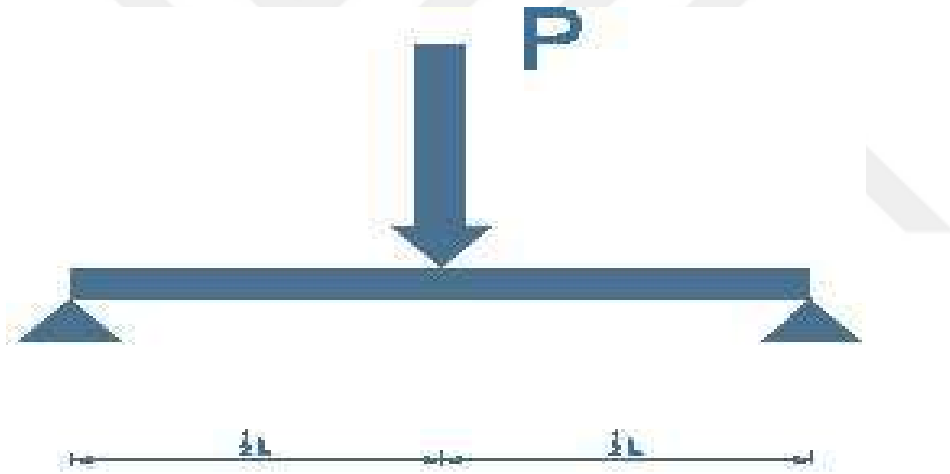
3.1. Kirişlerde Deplasman Hesabı

Bu bölümde karbon nanotüp kullanarak elde ettiğimiz kirişlerin yük altında nasıl davranış gösterdikleri ve nasıl bir deplasman yapacakları incelenecektir. Kullanılan farklı kesitlerin, farklı durumlar için yapacakları deplasmanlar tablolar ve grafikler halinde gösterilecektir.

Kesit tipi olarak dikdörtgen, kare, daire ve üçgen olmak üzere 4 tip kesit seçimi yapılmıştır. Seçilen kesitlerin alanları aynı alınarak kesit tipine göre atalet momentlerinin nasıl değişim gösterdiği grafikler yardımıyla gösterilecektir.

Karbon nanotüplerin elastisite modülü $E = 1000 \text{ }^{nN}/\text{mm}^2$ olarak verilir. Tüm deplasman hesabında aynı değer kullanılacaktır.

3.1.1. Her iki ucu basit mesnet durumu

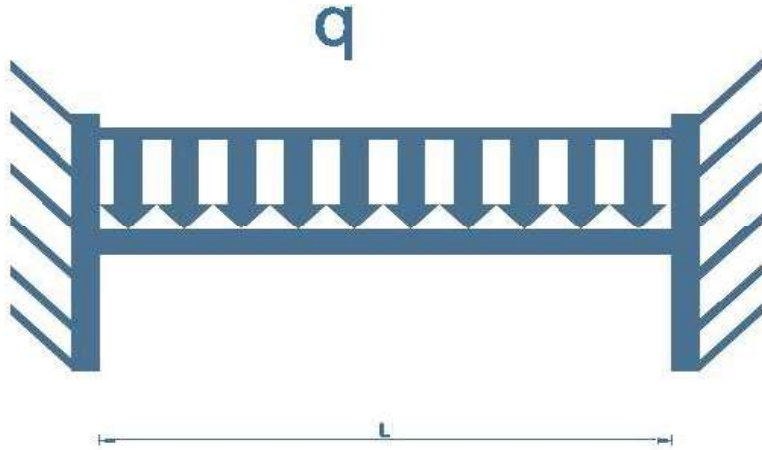


Şekil 3.1. İki ucu basit mesnet ve uygulanan tekil yük

Bu yüklemede sonlu farklar yöntemiyle elde edilen maksimum deplasman formülü;

$$\delta = \frac{P * L^3}{48 * E * I}$$

3.1.2. Her iki ucu ankastre mesnet ve üzerinde yayılı yük olma durumu

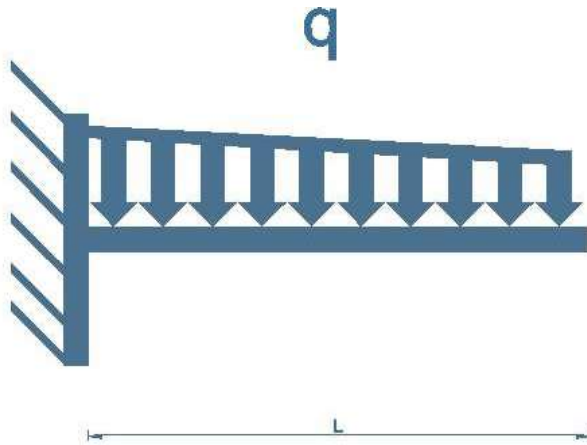


Şekil 3.2. İki ucu ankastre mesnet ve uygulanan yayılı yük

Mesnet ve yüklerin kesitimiz üzerinde bu düzende yerleştirilmesi sonucu Sonlu Farklardan elde edilen maksimum deplasman formülü;

$$\delta = \frac{P * L^3}{384 * E * I}$$

3.1.3. Ankastre mesnet azalan yük olma durumu

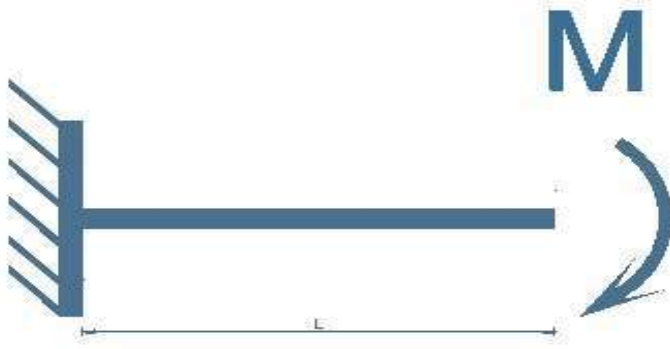


Şekil 3.3. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve uygulanan azalan yayılı yük

Mesnet ve yüklerin kesitimiz üzerinde bu düzende yerleştirilmesi sonucu Sonlu Farklardan elde edilen maksimum deplasman formülü;

$$\delta = \frac{q * L^4}{30 * E * I}$$

3.1.4. Kirişlerde Deplasman Hesabı

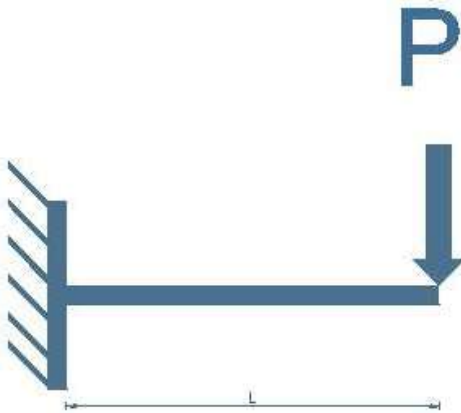


Şekil 3.4. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta uygulanan moment

Mesnet ve yüklerin kesitimiz üzerinde bu düzende yerleştirilmesi sonucu Sonlu Farklardan elde edilen maksimum deplasman formülü;

$$\delta = \frac{M * L}{2 * E * I}$$

3.1.5. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta tekil yük olma durumu

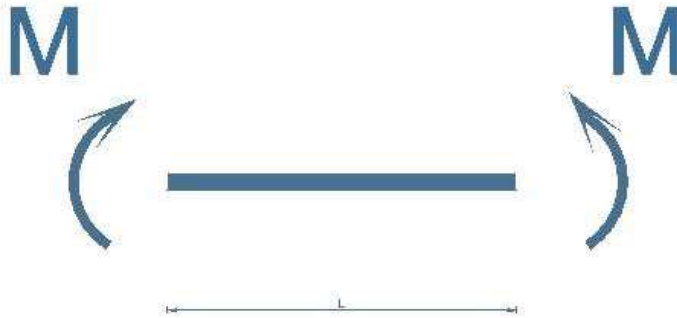


Şekil 3.5. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta tekil yük

Mesnet ve yüklerin kesitimiz üzerinde bu düzende yerleştirilmesi sonucu Sonlu Farklardan elde edilen maksimum deplasman formülü;

$$\delta = \frac{P * L^3}{3 * E * I}$$

3.1.6. İki Ucu boşta ve uçlarında moment olma durumu

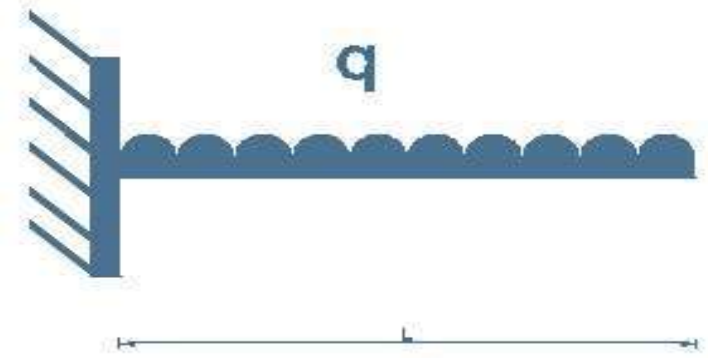


Şekil 3.6. İki ucu boşta ve uygulanan momentler

Mesnet ve yüklerin kesitimiz üzerinde bu düzende yerleştirilmesi sonucu Sonlu Farklardan elde edilen maksimum deplasman formülü;

$$\delta = \frac{M * L^2}{8 * E * I}$$

3.1.7. Bir ucu ankastre mesnet diğer ucu boşta ve üzerinde yayılı yük olma durumu



Şekil 3.7. Ankastre mesnet ve uygulanan yayılı yük

Mesnet ve yüklerin kesitimiz üzerinde bu düzende yerleştirilmesi sonucu Sonlu Farklardan elde edilen maksimum deplasman formülü;

$$\delta = \frac{q * L^4}{8 * E * I}$$

3.1.8. İki ucu basit mesnet ve üzerinde yayılı yük olma durumu

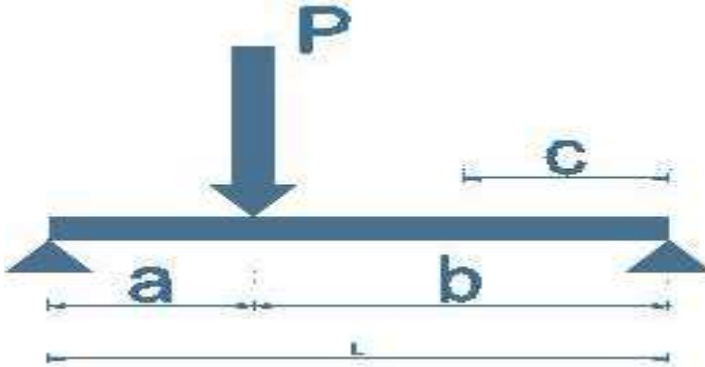


Şekil 3.8. Basit mesnet ve uygulanan yayılı yük

Mesnet ve yüklerin kesitimiz üzerinde bu düzende yerleştirilmesi sonucu Sonlu Farklardan elde edilen maksimum deplasman formülü;

$$\delta = \frac{5 * q * L^4}{384 * E * I}$$

3.1.9. İki ucu basit mesnet ve üzerinde birinci mesnede yakın tekil yük

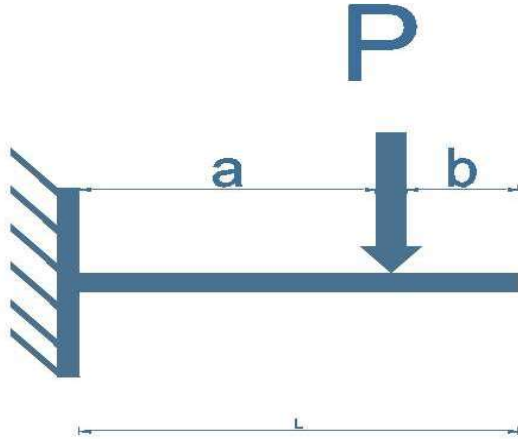


Şekil 3.9. Basit mesnet ve uygulanan tekil yük

Mesnet ve yüklerin kesitimiz üzerinde bu düzende yerleştirilmesi sonucu Sonlu Farklardan elde edilen maksimum deplasman formülü;

$$\delta = \frac{P * a * b^3}{3 * L * E * I}$$

3.1.10. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve üzerinde boş uca yakın tekil yük durumu



Şekil 3.10. Bir ucu ankastre ve uygulanan tekil yük

Mesnet ve yüklerin kesitimiz üzerinde bu düzende yerleştirilmesi sonucu Sonlu Farklardan elde edilen maksimum deplasman formülü;

$$\delta = \frac{P * a^2}{6 * E * I} * (3 * L - a)$$

3.2. Kirişlerde Titreşim Hesabı

Malzeme ve kesit özellikleri değişmeyen bir kirişin serbest titreşim denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.1)$$

Kirişlerin serbest titreşim denklemi değişkenlerine ayırma metodu ile bulunabilir.

$$w(x,t) = v(x) \cdot q(t) \quad (3.2)$$

Denklem (3.2), (3.1)'de yerine yazılırsa,

$$EI \frac{\partial^4 v(x)}{\partial x^4} q(t) + \rho A \frac{\partial^2 q(t)}{\partial t^2} v(x) = 0 \quad (3.3)$$

$$-\frac{EI}{\rho A} \frac{\partial^4 v(x)}{\partial x^4} \frac{1}{v(x)} = \frac{\partial^2 q(t)}{\partial t^2} \frac{1}{q(t)} = -\omega^2 \quad (3.4)$$

Burada $-\omega^2$ sabit gibi kabul edilip Denklem (3.4) şu şekilde tekrar yazılabilir:

$$\frac{\partial^2 q(t)}{\partial t^2} \frac{1}{q(t)} = -\omega^2 \quad (3.5a)$$

$$-\frac{EI}{\rho A} \frac{\partial^4 v(x)}{\partial x^4} = -\omega^2 v(x) \quad (3.5b)$$

Denklem (3.5a) ve (3.5b) düzenlendiğinde,

$$\frac{\partial^2 q(t)}{\partial t^2} + \omega^2 q(t) = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial^4 v(x)}{\partial x^4} - \omega^2 \frac{\rho A}{EI} v(x) = 0 \quad (3.7)$$

yazılır. Denklem (3.7),

$$\omega^2 \frac{\rho A}{EI} = k^4 \quad (3.8)$$

olarak yazıldığında

$$\frac{\partial^4 v(x)}{\partial x^4} - k^4 v(x) = 0 \quad (3.9)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemin çözümü

$$v(x) = B.e^{mx} \quad (3.10)$$

şeklindedir.

Denklem (3.10)'u, (3.9)'da yerine koyduğumuzda,

$$B.m^4.e^{mx} - k^4.B.e^{mx} = 0 \quad (3.11)$$

$$(m^4 - k^4).B.e^{mx} = 0 \quad (3.12)$$

Bu durumda Denklem (3.12)'nin anlamlı çözümü için $(m^4 - k^4) = 0$ olmalıdır. $(m^4 - k^4) = 0$ denkleminin kökleri;

$$m_1 = k, m_2 = -k, m_3 = ik, m_4 = -ik \quad (3.13)$$

Denklem (3.9)'un genel çözümü:

$$v(x) = B_1 e^{kx} + B_2 e^{-kx} + B_3 e^{ikx} + B_4 e^{-ikx} \quad (3.14)$$

olur. Burada B_1, B_2, B_3, B_4 sabit sayılardır. Denklem (3.14)'te aşağıdaki Euler dönüşümleri uygulanırsa,

$$e^{i\theta} = \cos\theta + i.\sin\theta \quad (3.15a)$$

$$e^{-i\theta} = \cos\theta - i.\sin\theta \quad (3.15b)$$

$$e^{\theta} = \cosh\theta + i.\sinh\theta \quad (3.15c)$$

$$e^{-\theta} = \cosh\theta - i.\sinh\theta \quad (3.15d)$$

Denklem şu hale gelir,

$$v(x) = C_1 \cos kx + C_2 \sin kx + C_3 \cosh kx + C_4 \sinh kx \quad (3.16)$$

Denklem (3.16)'da C katsayıları sınır koşullarıyla bulunur. Burada C_1 , C_2 , C_3 ve C_4 sabit sayılardır. Kirişin doğal frekansı Denklem (3.8) ile şu şekilde bulunur

$$\omega = k^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = (kl)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (3.17)$$

$v(x)$ fonksiyonu (3.16) kiriş titreşiminin karakteristik fonksiyonu, ω kirişin doğal frekansıdır. Kirişlerin sonsuz sayıda normal modu ve her moda ait doğal frekansı vardır. Bilinmeyen sabitler (C_1 , C_2 , C_3 ve C_4) ve k mesnet durumlarına göre kirişin sınır koşullarından bulunur.

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} v_i(x) (A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t) \quad (3.18)$$

Burada, ω_i kirişin i 'inci doğal frekansı, bu frekansa karşılık gelen normal modu ise $v_i(x)$ 'tir. A_i ve B_i kirişin mesnetlenme durumuna göre başlangıç koşullarından bulunur.

3.2.1. Her iki ucu basit mesnet durumu

Basit mesnette deplasman (çökme) ve moment sıfırdır. Yani sınır koşulları;

$$v(0) = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{d^2 v}{dx^2}(0) = 0 \quad (3.20)$$

$$v(l) = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{d^2 v}{dx^2}(l) = 0 \quad (3.22)$$

Denklem (3.19), (3.20), (3.21) ve (3.22), (3.16)'da yerine yazılırsa,

$$v(0) = C_1.1 + C_2.0 + C_3.1 + C_4.0 = 0 \quad (3.23)$$

$$v''(0) = -C_1 k^2.1 - C_2 k^2.0 + C_3 k^2.1 + C_4 k^2.0 = 0 \quad (3.24)$$

$$v(l) = C_1 \cos kl + C_2 \sin kl + C_3 \cosh kl + C_4 \sinh kl = 0 \quad (3.25)$$

$$v''(l) = -C_1 k^2 \cos kl - C_2 k^2 \sin kl + C_3 k^2 \cosh kl + C_4 k^2 \sinh kl = 0 \quad (3.26)$$

Denklem (3.23) ve (3.24)'ten C_1 ve C_3 sabitlerinin 0 olduğu görülür. Bu durumda Denklem (3.25) ve (3.26) şu hale gelir,

$$v(l) = C_2 \sin kl + C_4 \sinh kl = 0 \quad (3.27)$$

$$v''(l) = -C_2 k^2 \sin kl + C_4 k^2 \sinh kl = 0 \quad (3.28)$$

Denklem (3.27) ve (3.28) 2 bilinmeyenli 2 denklemdir, bunları matris formda yazarsak,

$$\begin{bmatrix} \sin kl & \sinh kl \\ -k^2 \sin kl & k^2 \sinh kl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Denklem (3.29)'da görülen matrisin determinantını alırsak,

$$-(\sin kl + \sinh kl)^2 + (\sin kl - \sinh kl)^2 = 0 \quad (3.30)$$

$$\sin kl \sinh kl = 0 \quad (3.31)$$

Burada $\sinh kl$ nin 0 olamayacağı görülür ($k = 0$ olamaz), bu durumda $\sin kl = 0$ olur. Böylece frekans denklemi şu hale gelir,

$$\sin kl = 0 \quad (3.32)$$

Sinüs fonksiyonunu 0 yapan değerler Denklem (3.32)'nin kökleri olur, bunlar,

$$k_n l = n\pi, \quad n=1,2,\dots \quad (3.33)$$

Bu durumda doğal frekans ve titreşim denklemleri şu hale gelir,

$$\omega_n = (k_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}}, \quad n=1,2,\dots \quad (3.34)$$

$$v_n(x) = C_n \sin k_n x = C_n \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad n=1,2,\dots \quad (3.35)$$

Denklem (3.35) mod şekilleri denklemini ifade eder. Normal titreşim denklemi ise şöyle ifade edilir,

$$w_n(x,t) = v_n(x)(A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t), \quad n=1,2,\dots \quad (3.36)$$

Denklem (3.36) normal titreşim denklemdir ve çözümü şu şekilde yazılabilir,

$$w_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} w_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi x}{l} (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \quad (3.37)$$

3.2.2. Her iki ucu ankastre mesnet durumu

Ankastre mesnette deplasman (çökme) ve dönme sıfırdır. Yani sınır koşulları

$$v(0) = 0 \quad (3.38)$$

$$\frac{dv}{dx}(0) = 0 \quad (3.39)$$

$$v(l) = 0 \quad (3.40)$$

$$\frac{dv}{dx}(l) = 0 \quad (3.41)$$

Denklem (3.38), (3.39), (3.40) ve (3.41), (3.16)'da yerine yazılırsa,

$$v(0) = C_1 \cdot 1 + C_2 \cdot 0 + C_3 \cdot 1 + C_4 \cdot 0 = 0 \quad (3.42)$$

$$v'(0) = -C_1 k \cdot 0 - C_2 k \cdot 1 + C_3 k \cdot 0 + C_4 k \cdot 1 = 0 \quad (3.43)$$

$$v(l) = C_1 \cos kl + C_2 \sin kl + C_3 \cosh kl + C_4 \sinh kl = 0 \quad (3.44)$$

$$v'(l) = -C_1 k \sin kl + C_2 k \cos kl + C_3 k \sinh kl + C_4 k \cosh kl = 0 \quad (3.45)$$

Denklem (3.42) ve (3.43)'ten C_1 ve C_3 sabitlerinin 0 olduğu görülür. Bu durumda Denklem (3.44) ve (3.45) şu hale gelir,

$$v(l) = C_2 \sin kl + C_4 \sinh kl = 0 \quad (3.46)$$

$$v'(l) = C_2 k \cos kl + C_4 k \cosh kl = 0 \quad (3.47)$$

Denklem (3.46) ve (3.47) 2 bilinmeyenli 2 denklemdir, bunları matris formda yazarsak,

$$\begin{bmatrix} \sin kl & \sinh kl \\ k \cos kl & k \cosh kl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Denklem (3.48)'de görülen numaralı matrisin determinantını alırsak,

$$\cos kl \cosh kl - 1 = 0 \quad (3.49)$$

$$k_n l = \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi$$

Denklem (3.49) frekans denklemdir. Denklem (3.49), (3.16)'da yerine yazılırsa,

$$v_n(x) = \left[C_n (\cos k_n x - \cosh k_n x) - \frac{\cos k_n l - \cosh k_n l}{\sin k_n l - \sinh k_n l} (\sin k_n x - \sinh k_n x) \right] \quad (3.50)$$

Buradan n. moda ait genel denklem şu şekilde yazılabilir:

$$w_n(x, t) = v_n(x) (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \quad (3.51)$$

Serbest titreşim denklemi ise:

$$w_n(x) = \left[(\cos k_n x - \cosh k_n x) - \frac{\cos k_n l - \cosh k_n l}{\sin k_n l - \sinh k_n l} (\sin k_n x - \sinh k_n x) \right] (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \quad (3.52)$$

3.2.3. Bir ucu ankastre bir ucu basit mesnet durumu

Ankastre mesnette deplasman (çökme) ve dönme sıfır, basit mesnette ise deplasman (çökme) ve moment sıfırdır. Yani sınır koşulları

$$v(0) = 0 \quad (3.53)$$

$$\frac{dv}{dx}(0) = 0 \quad (3.54)$$

$$v(l) = 0 \quad (3.55)$$

$$\frac{d^2v}{dx^2}(l) = 0 \quad (3.56)$$

Denklem (3.53), (3.54), (3.55) ve (3.56), (3.16)'da yerine yazılırsa,

$$v(0) = C_1 \cdot 1 + C_2 \cdot 0 + C_3 \cdot 1 + C_4 \cdot 0 = 0 \quad (3.57)$$

$$v'(0) = -C_1 k \cdot 0 - C_2 k \cdot 1 + C_3 k \cdot 0 + C_4 k \cdot 1 = 0 \quad (3.58)$$

$$v(l) = C_1 \cos kl + C_2 \sin kl + C_3 \cosh kl + C_4 \sinh kl = 0 \quad (3.59)$$

$$v''(l) = -C_1 k^2 \cos kl - C_2 k^2 \sin kl + C_3 k^2 \cosh kl + C_4 k^2 \sinh kl = 0 \quad (3.60)$$

Denklem (3.57)'den $C_1 + C_3 = 0$ olduğu görülür. Denklem (3.58)'den $kC_2 + kC_4 = 0$ olduğu görülür. Bu denklemler birleştirilirse:

$$v(x) = C_1 (\cos kx - \cosh kx) + C_2 (\sin kx - \sinh kx) \quad (3.61)$$

Denklem (4.61), (4.59) ve (4.60) ile birleştirilirse:

$$C_1 (\cos kl - \cosh kl) + C_2 (\sin kl - \sinh kl) = 0 \quad (3.62)$$

$$-C_1 (\cos kl + \cosh kl) - C_2 (\sin kl + \sinh kl) = 0 \quad (3.63)$$

Denklem (3.62) ve (3.63) 2 bilinmeyenli 2 denklemdir, bunları matris formda yazarsak,

$$\begin{bmatrix} \cos kl - \cosh kl & \sin kl - \sinh kl \\ -(\cos kl + \cosh kl) & -(\sin kl + \sinh kl) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Denklem (3.64)'te görülen matrisin determinantını alırsak,

$$\cos kl \sinh kl - \sin kl - \cosh kl = 0 \quad (3.65)$$

$$\tan kl = \tanh kl \quad (3.66)$$

$$k_n l = (n + \frac{1}{4})\pi$$

Denklem (3.66)'nın kökleri kirişin doğal titreşim frekanslarını verir.

$$\omega_n = (k_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad n=1,2,3,\dots \quad (3.67)$$

k_n 'e bağlı olan denklemde C_2 'yi C_{2n} olarak gösterirsek, Denklem (3.62) C_{1n} 'e bağlı olarak şu şekilde yazılır

$$C_{2n} = -C_{1n} \frac{\cos k_n l - \cosh k_n l}{\sin k_n l - \sinh k_n l} \quad (3.68)$$

Böylece Denklem (3.61) şu şekilde yazılır:

$$v_n(x) = C_{1n} \left[(\cos k_n x - \cosh k_n x) - \frac{\cos k_n l - \cosh k_n l}{\sin k_n l - \sinh k_n l} (\sin k_n x - \sinh k_n x) \right] \quad (3.69)$$

3.2.4. Her iki ucu serbest mesnet durumu

Boş uçta kesme ve moment sıfırdır. Yani sınır koşulları

$$\frac{d^2 v}{dx^2}(0) = 0 \quad (3.70)$$

$$\frac{d^3 v}{dx^3}(0) = 0 \quad (3.71)$$

$$\frac{d^2 v}{dx^2}(l) = 0 \quad (3.72)$$

$$\frac{d^3 v}{dx^3}(l) = 0 \quad (3.73)$$

Denklem (3.70), (3.71), (3.72) ve (3.73), Denklem (3.16)'da sırayla yerine yazılırsa,

$$v''(0) = -C_1 k^2 \cdot 1 - C_2 k^2 \cdot 0 + C_3 k^2 \cdot 1 + C_4 k^2 \cdot 0 = 0 \quad (3.74)$$

$$v'''(0) = -C_1 k^3 \cdot 0 - C_2 k^3 \cdot 1 + C_3 k^3 \cdot 0 + C_4 k^3 \cdot 1 = 0 \quad (3.75)$$

$$v'''(l) = C_1 k^3 \sin kl - C_2 k^3 \cos kl + C_3 k^3 \sinh kl + C_4 k^3 \cosh kl = 0 \quad (3.76)$$

$$v'''(l) = C_1 k^3 \sin kl - C_2 k^3 \cos kl + C_3 k^3 \sinh kl + C_4 k^3 \cosh kl = 0 \quad (3.77)$$

Denklem (3.74) ve (3.75)'ten C_2 ve C_4 sabitlerinin 0 olduğu görülür. Bu durumda Denklem (3.76) ve (3.77) şu hale gelir,

$$v''(l) = -C_1 k^2 \cos kl + C_3 k^2 \cosh kl = 0 \quad (3.78)$$

$$v'''(l) = C_1 k^3 \sin kl + C_3 k^3 \sinh kl = 0 \quad (3.79)$$

Denklem (3.78) ve (3.79) 2 bilinmeyenli 2 denklemdir, bunları matris formda yazarsak,

$$\begin{bmatrix} -k^2 \cos kl & k^2 \cosh kl \\ k^3 \sin kl & k^3 \sinh kl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

Denklem (3.80)'de görülen matrisin determinantını alırsak,

$$\cos kl \cosh kl - 1 = 0 \quad (3.81)$$

$$k_n l = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi$$

Denklem (3.81) frekans denklemdir.

3.2.5. Bir ucu ankastre bir ucu boşta mesnet durumu

Ankastre mesnette deplasman (çökme) ve dönme sıfır, boş uçta ise kesme ve moment sıfırdır. Yani sınır koşulları

$$v(0) = 0 \quad (3.82)$$

$$\frac{dv}{dx}(0) = 0 \quad (3.83)$$

$$\frac{d^2 v}{dx^2}(l) = 0 \quad (3.84)$$

$$\frac{d^3 v}{dx^3}(l) = 0 \quad (3.85)$$

Denklem (3.82), (3.83), (3.84) ve (3.85) denklemleri sırasıyla Denklem (3.16)'da yerine yazılırsa,

$$v(0) = C_1 \cdot 1 + C_2 \cdot 0 + C_3 \cdot 1 + C_4 \cdot 0 = 0 \quad (3.86)$$

$$v'(0) = -C_1 k \cdot 0 - C_2 k \cdot 1 + C_3 k \cdot 0 + C_4 k \cdot 1 = 0 \quad (3.87)$$

$$v''(l) = -C_1 k^2 \cos kl - C_2 k^2 \sin kl + C_3 k^2 \cosh kl + C_4 k^2 \sinh kl = 0 \quad (3.88)$$

$$v''''(l) = C_1 k^3 \sin kl - C_2 k^3 \cos kl + C_3 k^3 \sinh kl + C_4 k^3 \cosh kl = 0 \quad (3.89)$$

Denklem (3.86) ve (3.87)'den C_1 ve C_3 sabitlerinin 0 olduğu görülür. Bu durumda Denklem (3.88) ve (3.89) şu hale gelir,

$$v''(l) = -C_2 k^2 \sin kl + C_4 k^2 \sinh kl = 0 \quad (3.90)$$

$$v''''(l) = -C_2 k^3 \cos kl + C_4 k^3 \cosh kl = 0 \quad (3.91)$$

Denklem (3.90) ve (3.91) 2 bilinmeyenli 2 denklemdir, bunları matris formda yazarsak,

$$\begin{bmatrix} -k^2 \sin kl & k^2 \sinh kl \\ -k^3 \cos kl & k^3 \cosh kl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

Denklem (3.92)'de görülen determinantını alırsak,

$$\cos kl \cosh kl + 1 = 0 \quad (3.93)$$

$$k_n l = \left(n - \frac{1}{2}\right)\pi$$

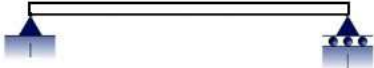
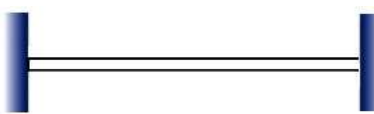
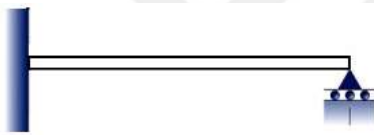
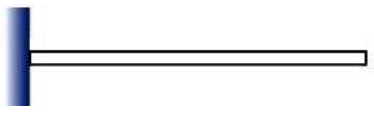
Denklem (3.93) düzenlenerek frekans denklemi elde edilir.

$$\omega_n = (k_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}}, \quad k_n l \cong \frac{(2n-1)\pi}{2} \quad (3.94)$$

Denklem (3.94)'ten yararlanılarak n. dereceden mod şekil denklemi şöyle elde edilir:

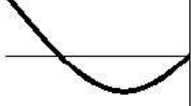
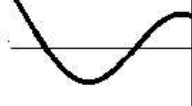
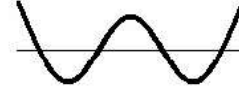
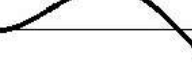
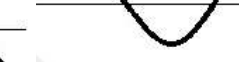
$$v_n(x) = (\cos k_n x - \cosh k_n x) - \frac{\cos k_n l + \cosh k_n l}{\sin k_n l + \sinh k_n l} (\sin k_n x - \sinh k_n x) \quad (3.95)$$

Çizelge 3.1. Kenar koşullarına bağlı frekans denklem ve değerleri

Kenar Koşulları	Frekans Denklemi	$k_n l = \beta_n$ Değerleri
	$\sin k_n l = 0$	$\beta_1=3.141592654$ $\beta_2=6.283185307$ $\beta_3=9.424777961$ $\beta_4=12.56637061$ $\beta_5=15.70796327$
	$\cos k_n l \cdot \cosh k_n l = 1$	$\beta_1= 4.71238898$ $\beta_2= 7.853981634$ $\beta_3= 10.99557429$ $\beta_4= 14.13716694$ $\beta_5= 17.27875959$
	$\tan k_n l = \tanh k_n l$	$\beta_1= 3.926990817$ $\beta_2= 7.068583471$ $\beta_3= 10.21017612$ $\beta_4= 13.35176878$ $\beta_5= 16.49336143$
	$\cos k_n l \cdot \cosh k_n l = -1$	$\beta_1= 1.570796327$ $\beta_2= 4.71238898$ $\beta_3= 7.853981634$ $\beta_4= 10.99557429$ $\beta_5= 14.13716694$
	$\cos k_n l \cdot \cosh k_n l = 1$	$\beta_1= 4.71238898$ $\beta_2= 7.853981634$ $\beta_3= 10.99557429$ $\beta_4= 14.13716694$ $\beta_5= 17.27875959$

Her bir sınır koşulu için verilen denklemler temel frekans değerlerini bulmak için kullanılır ve tabloda ilk beş mod için katsayılar verilmiştir.

Çizelge 3.2. Farklı sınır koşullarındaki titreşim modları

Kenar Koşulları	1. Mod şekli	2. Mod şekli	3. Mod şekli
			
			
			
			

Bu durumda doğal frekans ve titreşim denklemleri şu hale gelir,

$$\omega_n = (k_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}}, \quad n=1,2,\dots \quad (3.95)$$

$$v_n(x) = C_n \sin k_n x = C_n \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad n=1,2,\dots \quad (3.96)$$

Her bir mod için hesap verilen formülasyon ile kolayca hesaplanır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Statik Analiz

Analizlerde kullanılacak olan kesitler ve geometrik özellikleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.1. Farklı kesitler için atalet değerleri

Kesit	Genişlik, a (nm)	Yükseklik, h (nm)	Yarıçap, r (nm)	Alan, A (nm ²)	Atalet, I (nm ⁴)
Kare	3.544907701	3.544907701	-	12.56637061	13.15947253
Dikdörtgen	2.75	4.569589313	-	12.56637061	21.86668546
Daire	-	-	2	12.56637061	12.56637061
Üçgen	5.387090474	4.665364605	-	12.56637061	15.19527412

Tablo ve grafikteki değerler incelendiğinde aynı alana sahip kesitler içinde en yüksek ataletle sahip olanın dikdörtgen kesit olduğu görülmektedir. En düşük deplasman değerini dikdörtgen kesit ile elde ederiz.

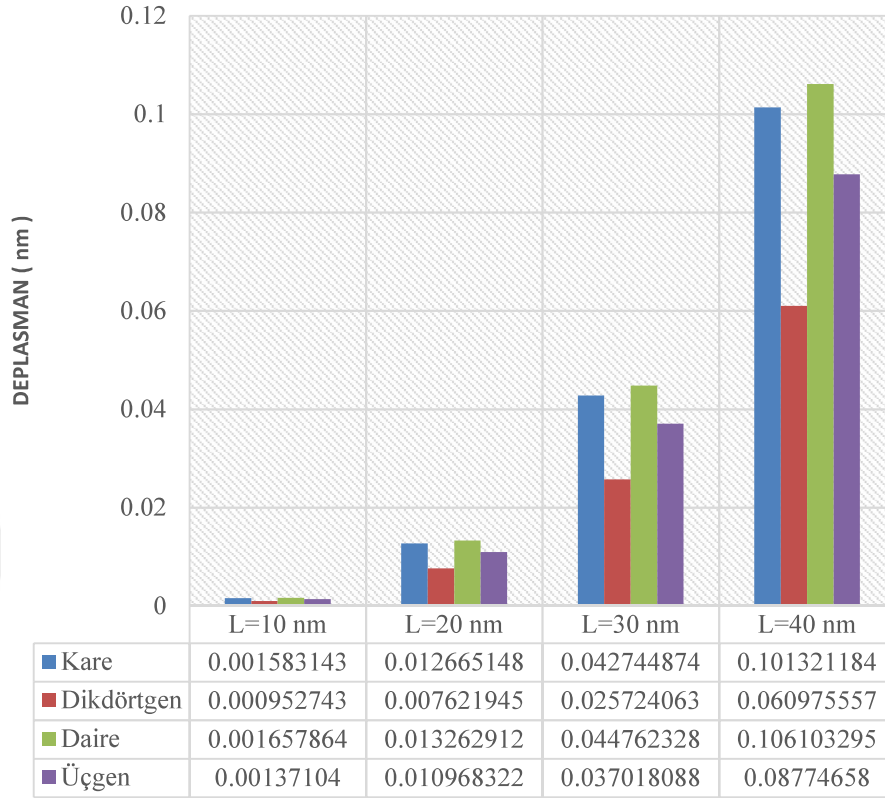
4.1.1. Her iki ucu basit mesnet durumu

Kullanılan kesitlerde L boylarının değişimi ile yapılan deplasmanlarda oluşacak farkı inceleyelim.

Çizelge 4.2. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kesit	P (nN)	Maksimum Deplasman (nm)			
		L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm
Kare	1	0.001583143	0.012665148	0.042744874	0.101321184
Dikdörtgen	1	0.000952743	0.007621945	0.025724063	0.060975557
Daire	1	0.001657864	0.013262912	0.044762328	0.106103295
Üçgen	1	0.00137104	0.010968322	0.037018088	0.08774658

Tabloda bulunan değerlere benzer olarak yapılan detaylı bir analizde elde edilen sonuçlar farklı kesit ve yük değerleri için bir grafik üzerinde özetlenirse, Çizelge 4.3 elde edilir.

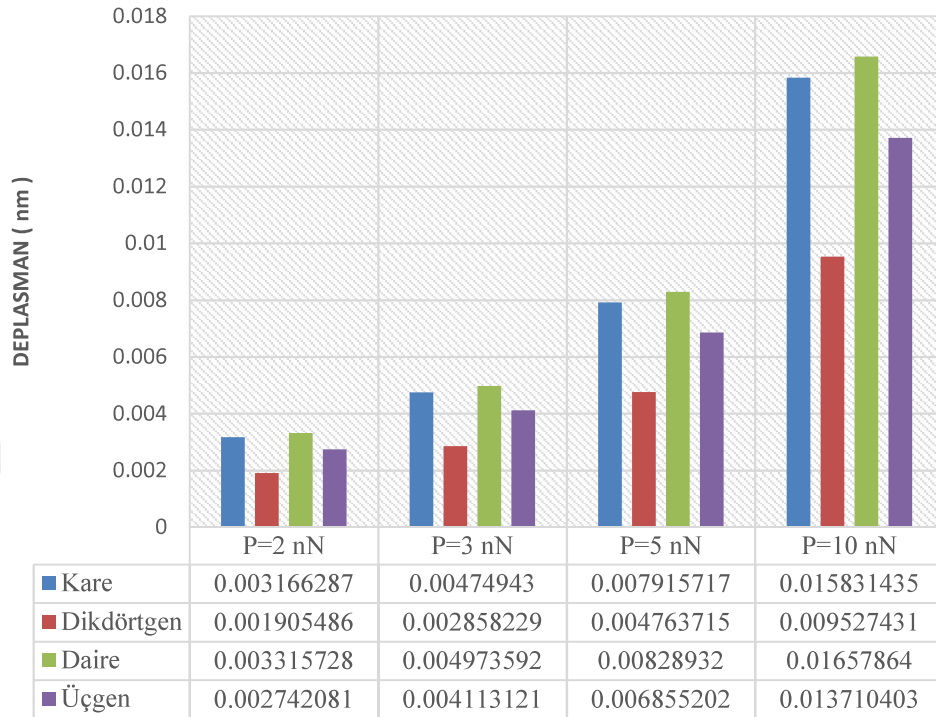
Çizelge 4.3. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kirişin uzunluğunu sabit tutup yükü arttırdığımızda kesitlerimizde meydana gelen deplasmanlar şöyle olacaktır.

Çizelge 4.4. Farklı P değerleri için deplasman değerleri

Kesit	L (nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		P=2 nN	P=3 nN	P=5 nN	P=10 nN
Kare	10	0.003166287	0.00474943	0.007915717	0.015831435
Dikdörtgen	10	0.001905486	0.002858229	0.004763715	0.009527431
Daire	10	0.003315728	0.004973592	0.00828932	0.01657864
Üçgen	10	0.002742081	0.004113121	0.006855202	0.013710403

Bulduğumuz değerleri benzer olarak yapılan farklı kesit özellikler için detaylı olarak incelersek sonuçlar farklı geometrik kesit ve yük değerleri için bir grafik üzerinde verilmiştir.

Çizelge 4.5. Farklı P değerleri için deplasman değerleri

4.1.2. Her iki ucu ankastre mesnet ve üzerinde yayılı yük olma durumu

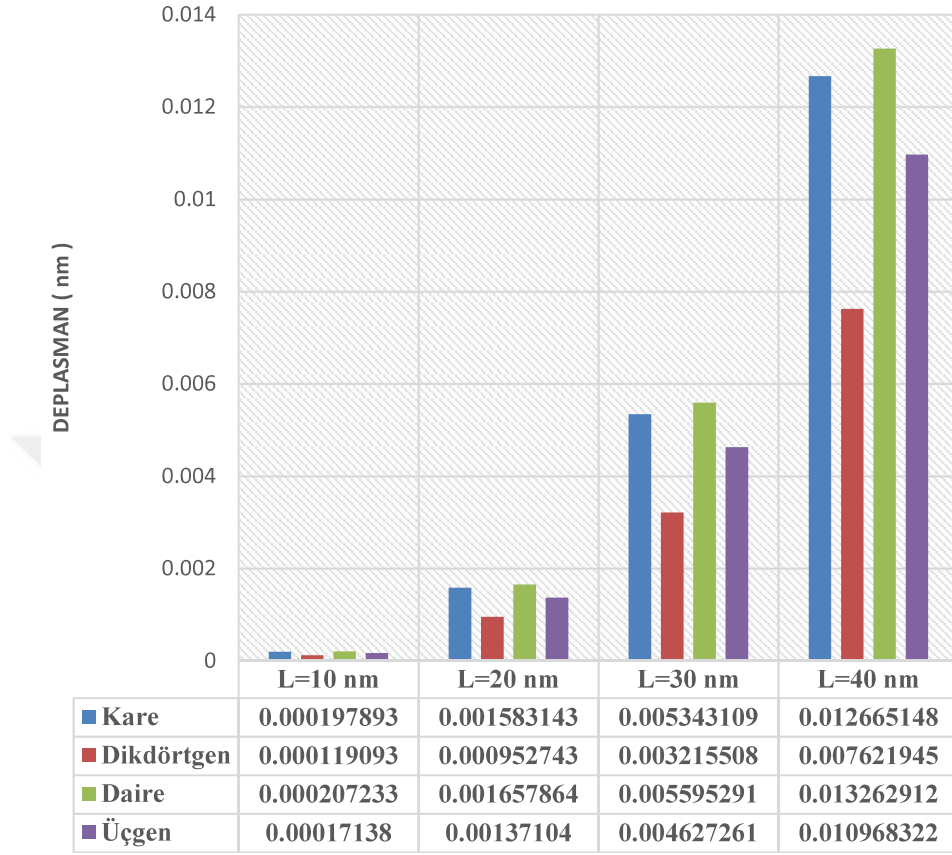
Kesit ve kesit alanlarında herhangi bir değişiklik yapmadığımız için Çizelge 4.2’de elde ettiğimiz değerler ile hesaplamalarımıza devam edeceğiz. İncelenen bazı durumlarda dikdörtgen kesitlerin kesit değerlerini değiştirerek ayrı bir karşılaştırma yapılacaktır.

Öncelikle bir tablo oluşturarak kesitlerimizin yapmış olduğu deplasman değerlerini inceleyelim;

Çizelge 4.6. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kesit	q (nN/nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm
Kare	1	0.000197893	0.001583143	0.005343109	0.012665148
Dikdörtgen	1	0.000119093	0.000952743	0.003215508	0.007621945
Daire	1	0.000207233	0.001657864	0.005595291	0.013262912
Üçgen	1	0.00017138	0.00137104	0.004627261	0.010968322

Bulduğumuz değerleri grafik üzerinden değerlendirmek istersek;

Çizelge 4.7. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Tablo ve grafikten okunan değerler incelendiğinde tüm L değerlerinde en düşük deplasman değerini dikdörtgen kesitten alırız.

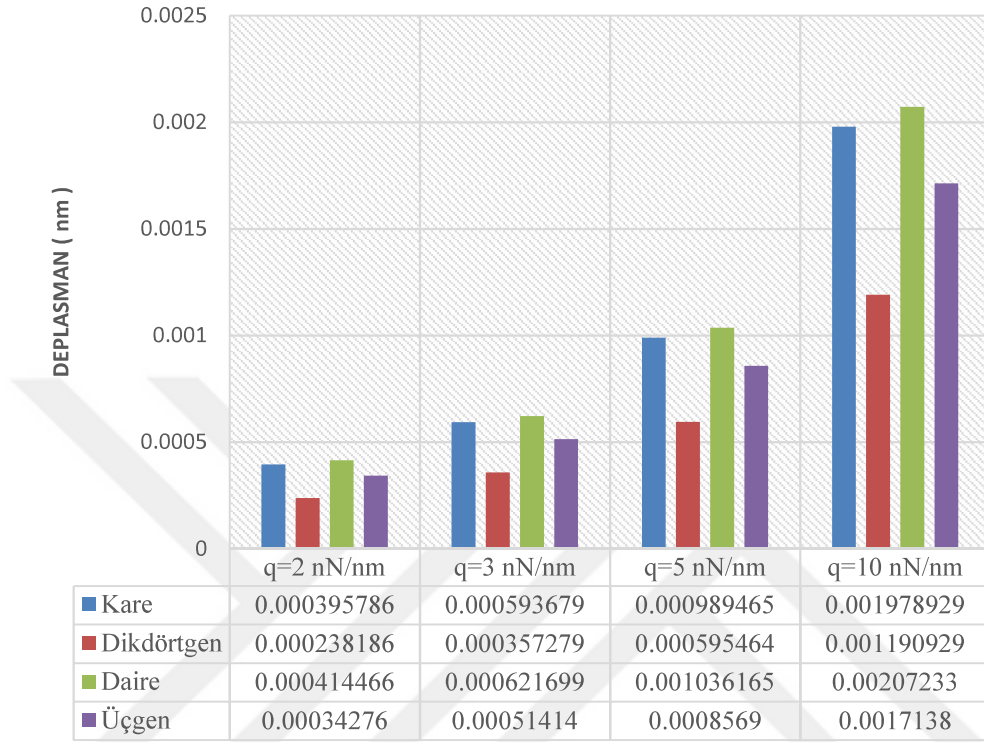
Kirişin uzunluğunu sabit tutup üzerine etkiyen yükü arttırsak elde edeceğimiz deplasman değerlerini incelemek istersek;

Çizelge 4.8. Farklı q değerleri için deplasman değerleri

Kesit	L (nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		q=2 nN/nm	q=3 nN/nm	q=5 nN/nm	q=10 nN/nm
Kare	10	0.000395786	0.000593679	0.000989465	0.001978929
Dikdörtgen	10	0.000238186	0.000357279	0.000595464	0.001190929
Daire	10	0.000414466	0.000621699	0.001036165	0.00207233
Üçgen	10	0.00034276	0.00051414	0.0008569	0.0017138

Tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

Çizelge 4.9. Farklı q değerleri için deplasman değerleri



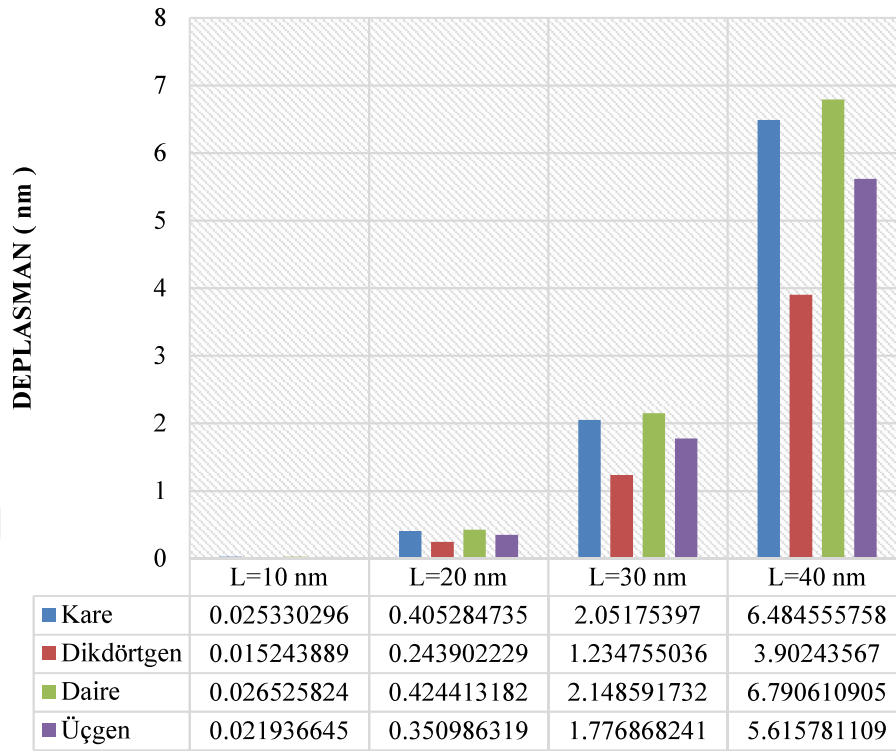
4.1.3. Ankastre mesnet azalan yük olma durumu

Kesit ve kesit alanlarında herhangi bir değişiklik yapmadığımız için Çizelge 4.2’de elde ettiğimiz değerler ile hesaplamalarımıza devam edeceğiz. Kesitlerimizde L değerinin değişimine bağlı olarak elde edeceğimiz maksimum deplasman değerleri tablodaki gibi olacaktır;

Çizelge 4.10. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kesit	q (nN/nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm
Kare	1	0.025330296	0.405284735	2.05175397	6.484555758
Dikdörtgen	1	0.015243889	0.243902229	1.234755036	3.90243567
Daire	1	0.026525824	0.424413182	2.148591732	6.790610905
Üçgen	1	0.021936645	0.350986319	1.776868241	5.615781109

Farklı değerler için hesaplanan sonuçları bir grafik üzerine özetlersek aşağıdaki Çizelge değerleri bulunur.

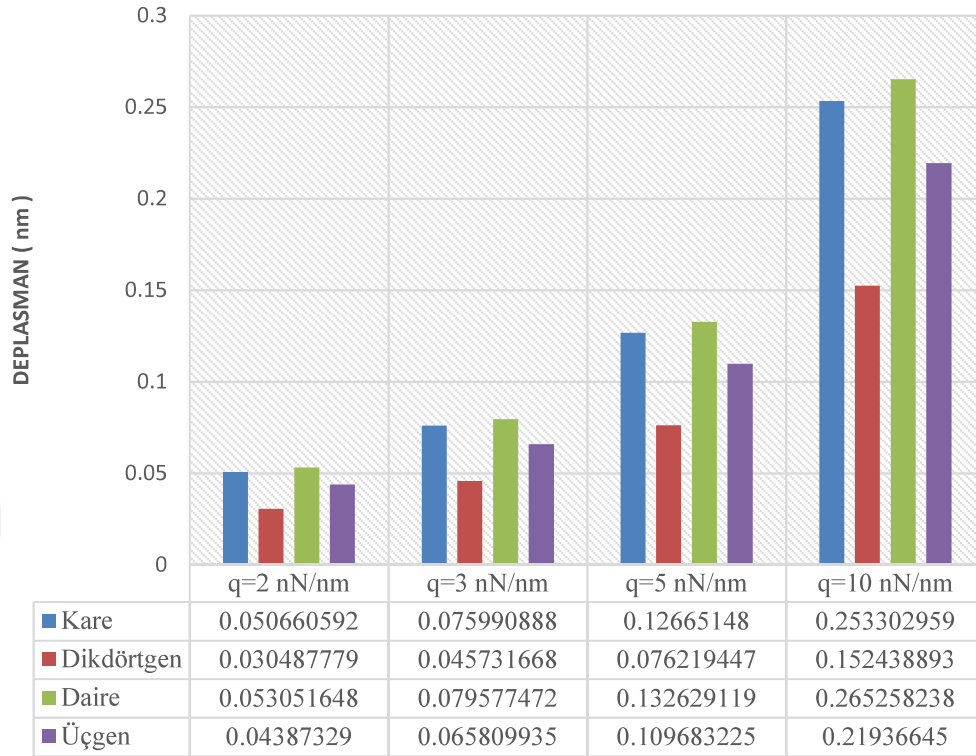
Çizelge 4.11. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Grafik ve tablo incelendiğinde dikdörtgen kesitin en iyi ataletle sahip kesit modeli olduğu görülür. Kirişin uzunluğunu sabit tutup üzerine etkiyen yayılı yükümüzü arttırsak elde edeceğimiz deplasman değerleri tablodaki gibi olacaktır;

Çizelge 4.12. Farklı q değerleri için deplasman değerleri

Kesit	L (nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		q=2 nN/nm	q=3 nN/nm	q=5 nN/nm	q=10 nN/nm
Kare	10	0.050660592	0.075990888	0.12665148	0.253302959
Dikdörtgen	10	0.030487779	0.045731668	0.076219447	0.152438893
Daire	10	0.053051648	0.079577472	0.132629119	0.265258238
Üçgen	10	0.04387329	0.065809935	0.109683225	0.21936645

Daha detaylı analiz yapılarak elde edilen yeni değerleri bir grafik üzerinde verirsek;

Çizelge 4.13. Farklı q değerleri için deplasman değerleri

4.1.4. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta moment olma durumu

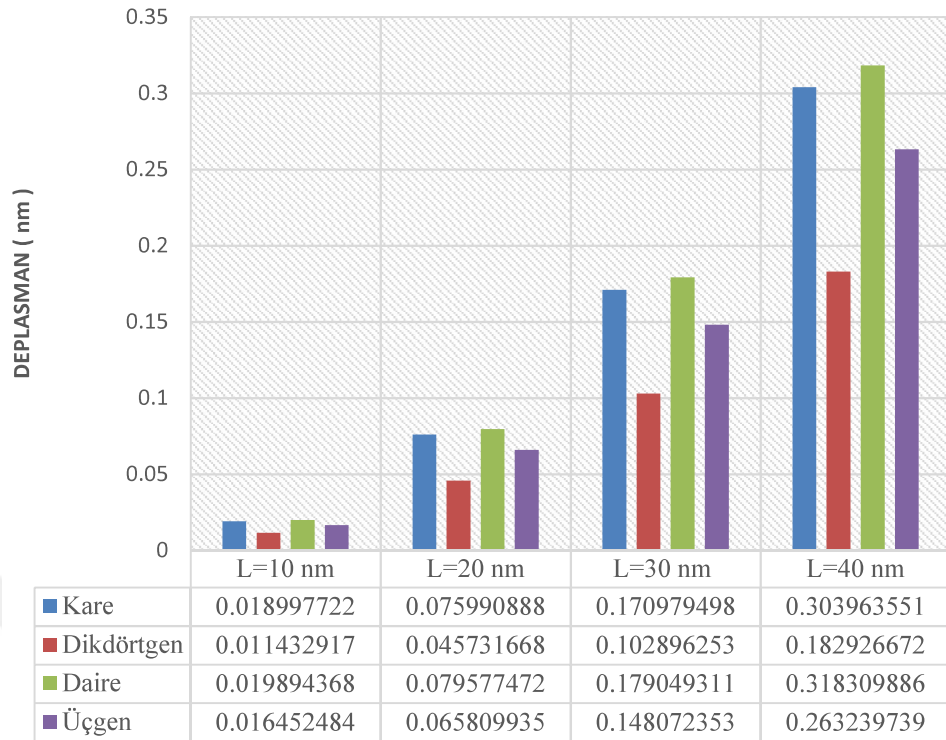
Kesit ve kesit alanlarında herhangi bir değişiklik yapmadığımız için Çizelge 4.2’de elde ettiğimiz değerler ile hesaplamalarımıza devam edeceğiz.

Kullanılan kesitlerde L boylarının değişimi ile yapılan deplasmanlarda oluşacak farkı inceleyelim.

Çizelge 4.14. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kesit	M (nN.nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm
Kare	5	0.018997722	0.075990888	0.170979498	0.303963551
Dikdörtgen	5	0.011432917	0.045731668	0.102896253	0.182926672
Daire	5	0.019894368	0.079577472	0.179049311	0.318309886
Üçgen	5	0.016452484	0.065809935	0.148072353	0.263239739

Tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

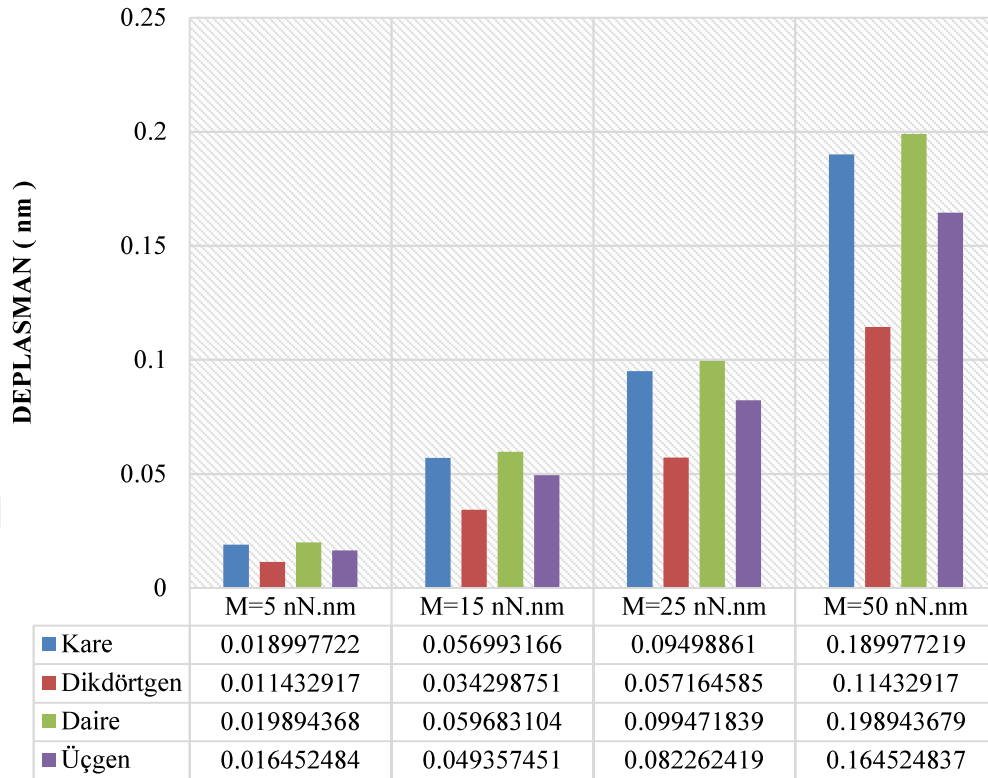
Çizelge 4.15. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kirişin uzunluğunu sabit tutarak uygulanan momentin değerine bağlı olarak maksimum deplasman değişimi tablodaki gibi olacaktır;

Çizelge 4.16. Farklı M değerleri için deplasman değerleri

Kesit	L (nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		M=5 nN.nm	M=15 nN.nm	M=25 nN.nm	M=50 nN.nm
Kare	10	0.018997722	0.056993166	0.09498861	0.189977219
Dikdörtgen	10	0.011432917	0.034298751	0.057164585	0.11432917
Daire	10	0.019894368	0.059683104	0.099471839	0.198943679
Üçgen	10	0.016452484	0.049357451	0.082262419	0.164524837

Farklı momentler için tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

Çizelge 4.17. Farklı M değerleri için deplasman değerleri

4.1.5. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu boşta ve boş uçta tekil yük olma durumu

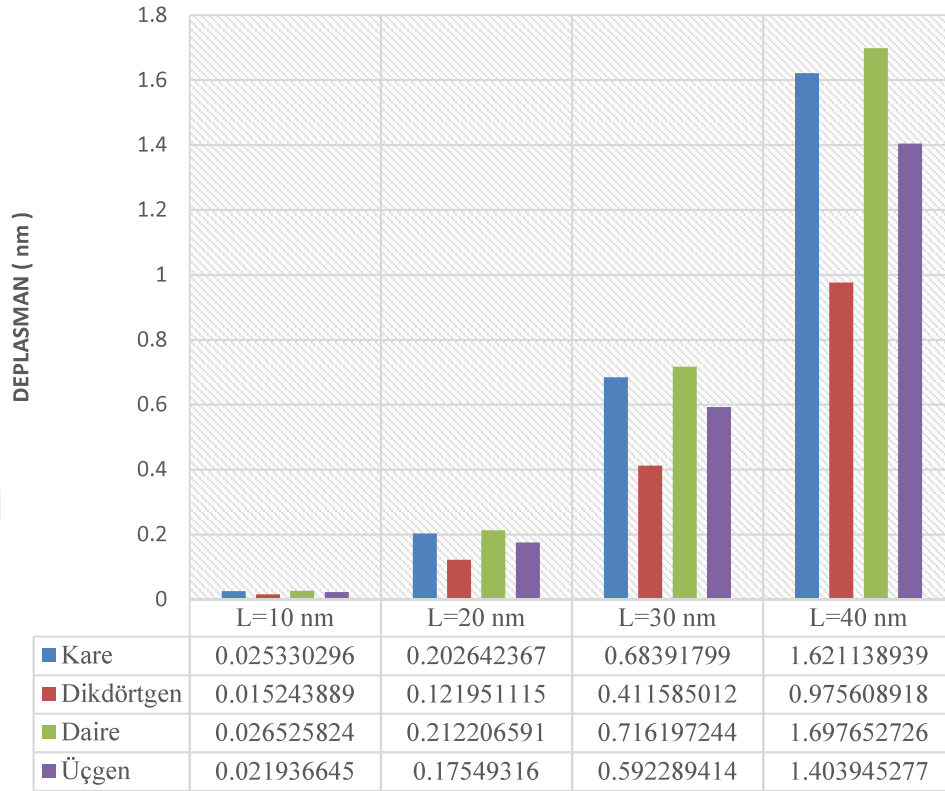
Kesit ve kesit alanlarında herhangi bir değişiklik yapmadığımız için Çizelge 4.2’de elde ettiğimiz değerler ile hesaplamalarımıza devam edeceğiz.

Kullanılan kesitlerde L boylarının değişimi ile yapılan deplasmanlarda oluşacak farkı inceleyelim.

Çizelge 4.18. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kesit	P (nN)	Maksimum Deplasman (nm)			
		L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm
Kare	1	0.025330296	0.202642367	0.68391799	1.621138939
Dikdörtgen	1	0.015243889	0.121951115	0.411585012	0.975608918
Daire	1	0.026525824	0.212206591	0.716197244	1.697652726
Üçgen	1	0.021936645	0.17549316	0.592289414	1.403945277

Benzer olarak değişim bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

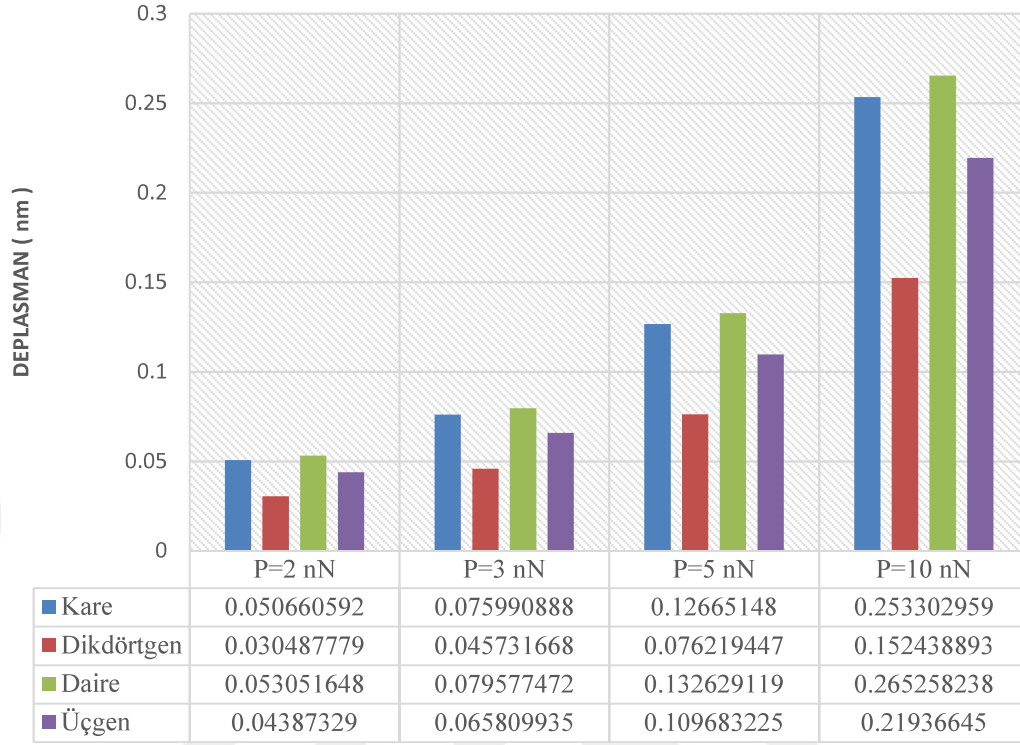
Çizelge 4.19. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kirişin uzunluğunu sabit tutup yükü arttırdığımızda kesitlerimizde meydana gelen deplasmanlar şöyle olacaktır.

Çizelge 4.20. Farklı P değerleri için deplasman değerleri

Kesit	L (nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		P=2 nN	P=3 nN	P=5 nN	P=10 nN
Kare	10	0.050660592	0.075990888	0.12665148	0.253302959
Dikdörtgen	10	0.030487779	0.045731668	0.076219447	0.152438893
Daire	10	0.053051648	0.079577472	0.132629119	0.265258238
Üçgen	10	0.04387329	0.065809935	0.109683225	0.21936645

Tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

Çizelge 4.21. Farklı P değerleri için deplasman değerleri

4.1.6. İki ucu boşta ve uçlarında moment olma durumu

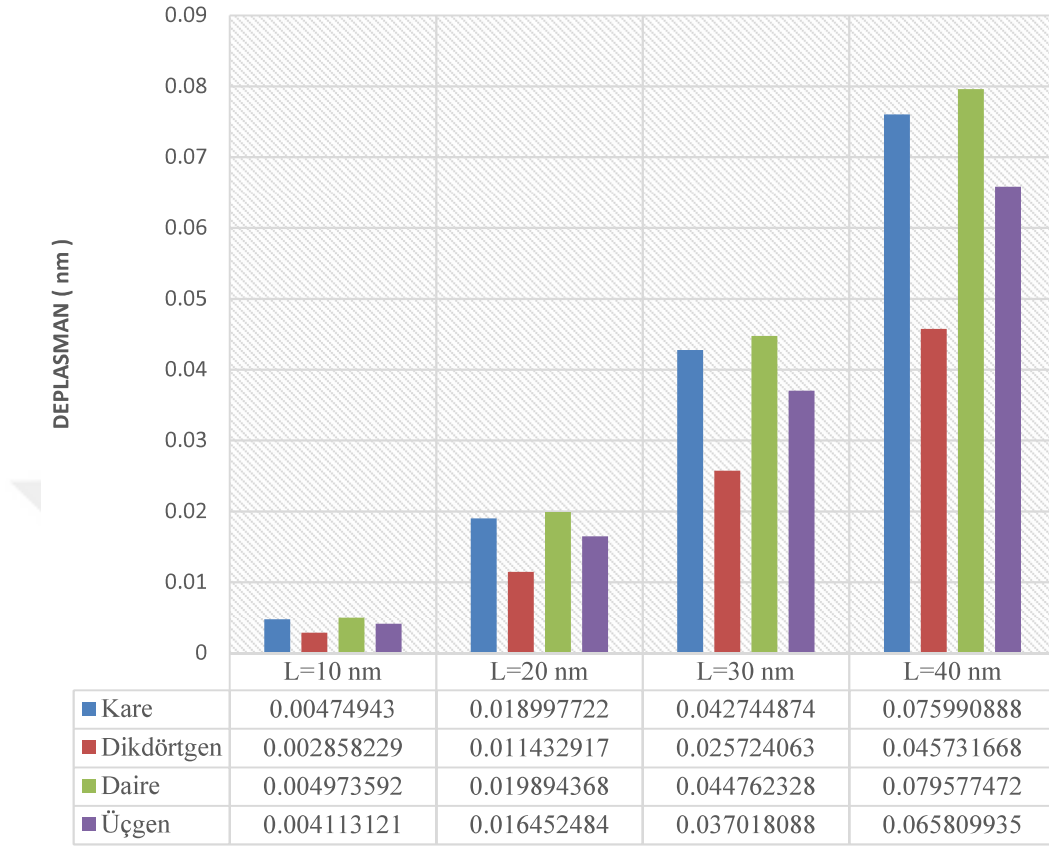
Kesit ve kesit alanlarında herhangi bir değişiklik yapmadığımız için Çizelge 4.2’de elde ettiğimiz değerler ile hesaplamalarımıza devam edeceğiz.

Kullanılan kesitlerde L boylarının değişimi ile yapılan deplasmanlarda oluşacak farkı inceleyelim.

Çizelge 4.22. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kesit	M (nN.nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm
Kare	5	0.00474943	0.018997722	0.042744874	0.075990888
Dikdörtgen	5	0.002858229	0.011432917	0.025724063	0.045731668
Daire	5	0.004973592	0.019894368	0.044762328	0.079577472
Üçgen	5	0.004113121	0.016452484	0.037018088	0.065809935

Tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

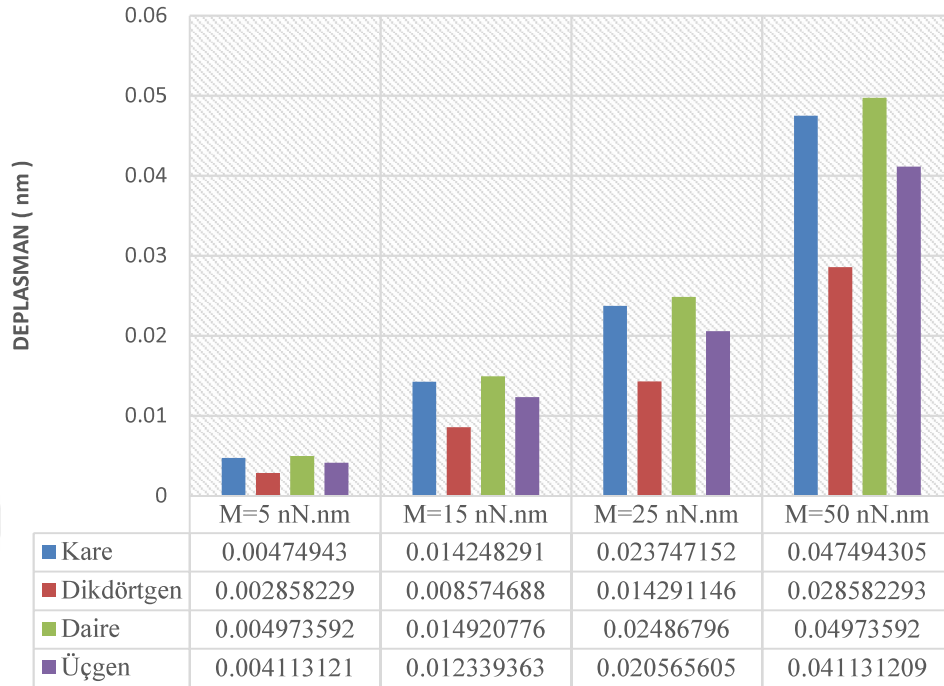
Çizelge 4.23. Farklı L değerleri için deplasman değerler

Kirişin uzunluğunu sabit tutup uygulanan moment değerini değiştirdiğimizde kesitlerimizde meydana gelen deplasmanlar şöyle olacaktır.

Çizelge 4.24. Farklı M değerleri için deplasman değerleri

Kesit	L (nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		M=5 nN.nm	M=15 nN.nm	M=25 nN.nm	M=50 nN.nm
Kare	10	0.00474943	0.014248291	0.023747152	0.047494305
Dikdörtgen	10	0.002858229	0.008574688	0.014291146	0.028582293
Daire	10	0.004973592	0.014920776	0.02486796	0.04973592
Üçgen	10	0.004113121	0.012339363	0.020565605	0.041131209

Benzer olarak ilgili datayı bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

Çizelge 4.25. Farklı M değerleri için deplasman değerleri

4.1.7. Bir ucu ankastre mesnet diğer ucu boşta ve üzerinde yayılı yük olma durumu

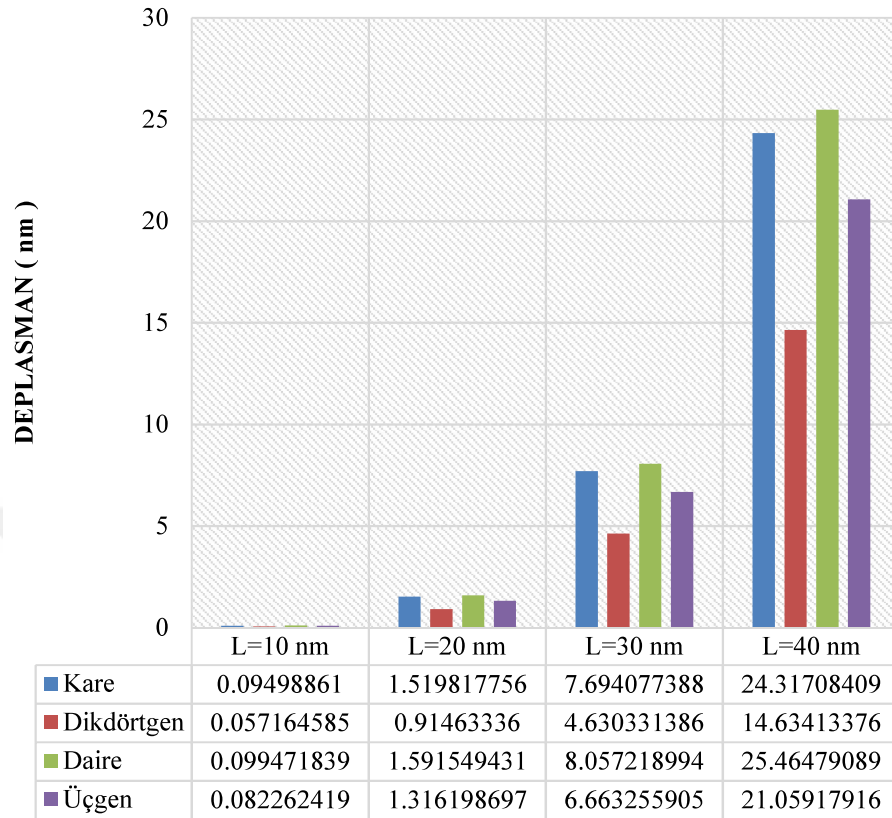
Kesit ve kesit alanlarında herhangi bir değişiklik yapmadığımız için Çizelge 4.2’de elde ettiğimiz değerler ile hesaplamalarımıza devam edeceğiz.

Kullanılan kesitlerde L boylarının değişimi ile yapılan deplasmanlarda oluşacak farkı inceleyelim.

Çizelge 4.26. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kesit	q (nN/nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm
Kare	1	0.09498861	1.519817756	7.694077388	24.31708409
Dikdörtgen	1	0.057164585	0.91463336	4.630331386	14.63413376
Daire	1	0.099471839	1.591549431	8.057218994	25.46479089
Üçgen	1	0.082262419	1.316198697	6.663255905	21.05917916

Tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

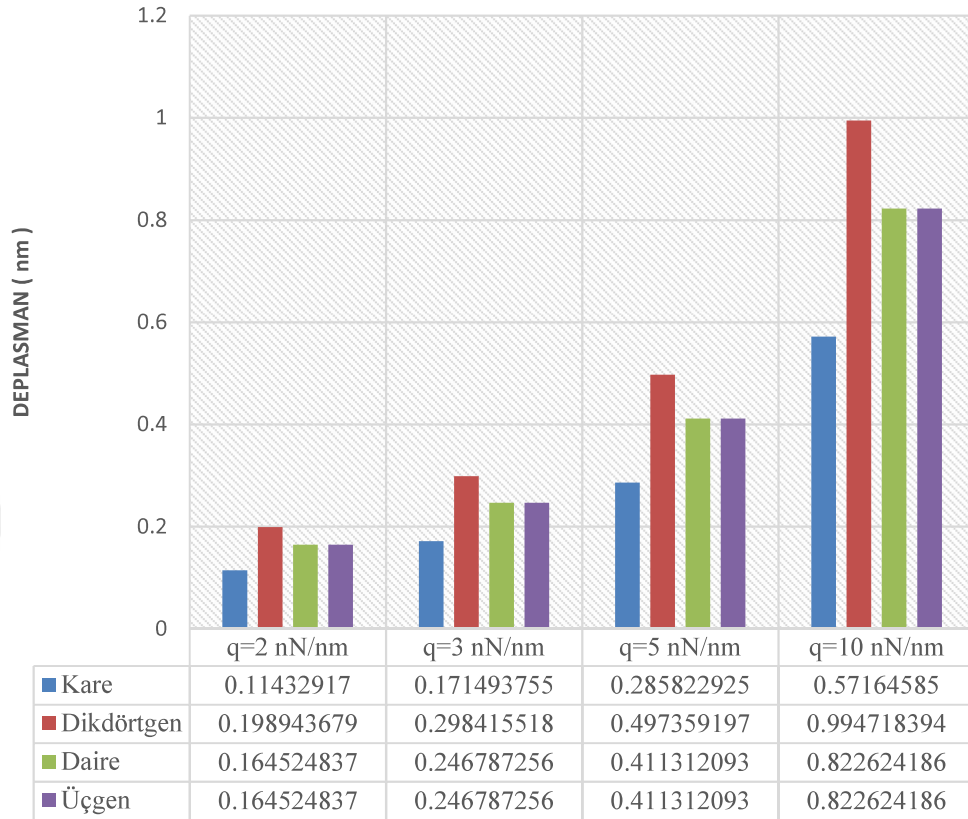
Çizelge 4.27. Farklı L değerleri için deplasman değerler

Eğer kirişin uzunluğunu sabit tutup uygulanan yükü değiştirirsek ortaya çıkacak durum ise şöyle olacaktır;

Çizelge 4.28. Farklı q değerleri için deplasman değerleri

Kesit	L (nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		q=2 nN/nm	q=3 nN/nm	q=5 nN/nm	q=10 nN/nm
Kare	10	0.11432917	0.171493755	0.285822925	0.57164585
Dikdörtgen	10	0.198943679	0.298415518	0.497359197	0.994718394
Daire	10	0.164524837	0.246787256	0.411312093	0.822624186
Üçgen	10	0.164524837	0.246787256	0.411312093	0.822624186

Tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

Çizelge 4.29. Farklı q değerleri için deplasman değerleri

4.1.8. İki ucu basit mesnet ve üzerinde yayılı yük olma durumu

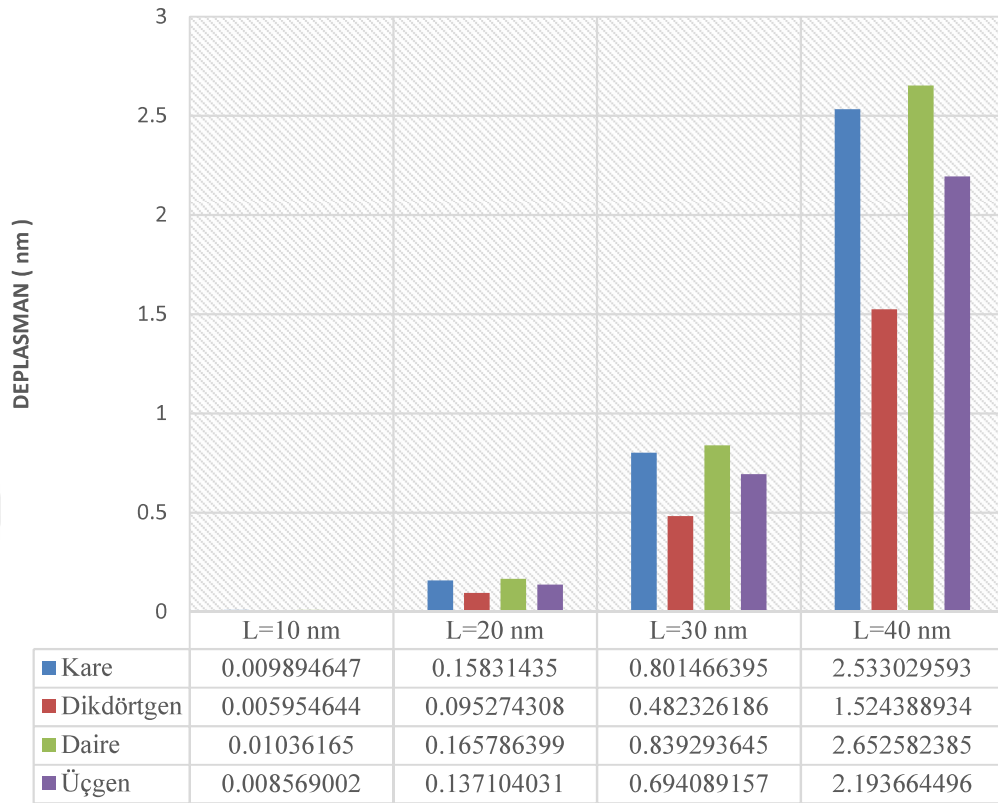
Kesit ve kesit alanlarında herhangi bir değişiklik yapmadığımız için Çizelge 4.2’de elde ettiğimiz değerler ile hesaplamalarımıza devam edeceğiz.

Kullanılan kesitlerde L boylarının değişimi ile yapılan deplasmanlarda oluşacak farkı inceleyelim.

Çizelge 4.30. Farklı L değerleri için deplasman değerleri

Kesit	q (nN/nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		$L=10$ nm	$L=20$ nm	$L=30$ nm	$L=40$ nm
Kare	1	0.009894647	0.15831435	0.801466395	2.533029593
Dikdörtgen	1	0.005954644	0.095274308	0.482326186	1.524388934
Daire	1	0.01036165	0.165786399	0.839293645	2.652582385
Üçgen	1	0.008569002	0.137104031	0.694089157	2.193664496

Tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek farklı yükler için elde edilen deplasmanlara ulaşılır.

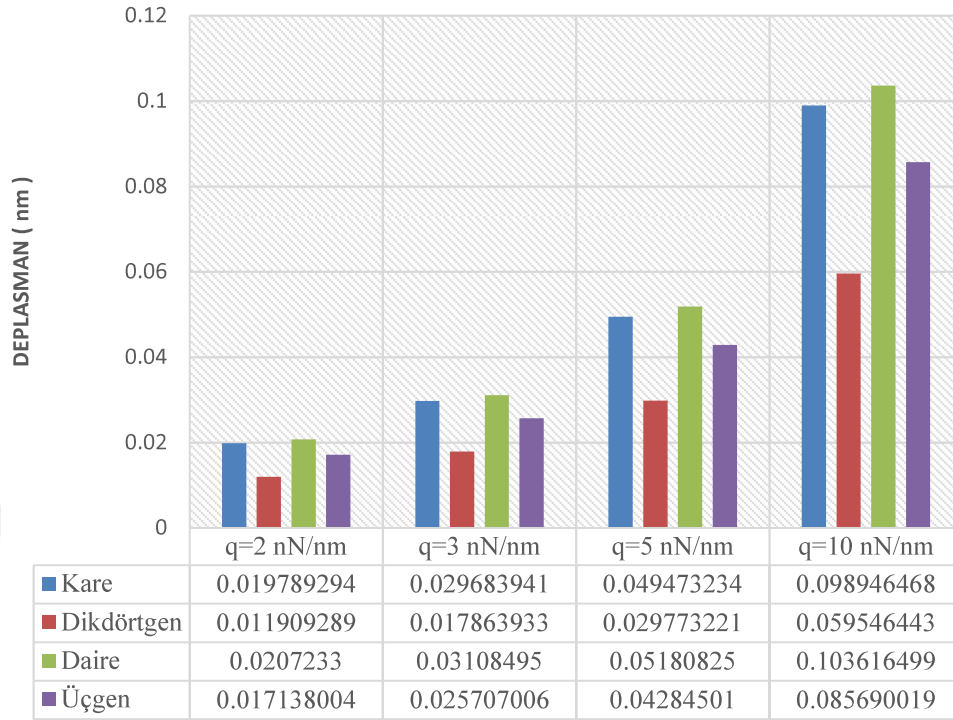
Çizelge 4.31. Farklı q değerleri için deplasman değerleri

Kullanılan kesitlerde L boylarının değişimi ile yapılan deplasmanlarda oluşacak farkı inceleyelim.

Çizelge 4.32. Farklı q değerleri için deplasman değerleri

Kesit	L (nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		q=2 nN/nm	q=3 nN/nm	q=5 nN/nm	q=10 nN/nm
Kare	10	0.019789294	0.029683941	0.049473234	0.098946468
Dikdörtgen	10	0.011909289	0.017863933	0.029773221	0.059546443
Daire	10	0.0207233	0.03108495	0.05180825	0.103616499
Üçgen	10	0.017138004	0.025707006	0.04284501	0.085690019

Tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

Çizelge 4.33. Farklı q değerleri için deplasman değerleri

4.1.9. İki ucu basit mesnet ve üzerinde birinci mesnede yakın tekil yük

Kesit ve kesit alanlarında herhangi bir değişiklik yapmadığımız için Çizelge 4.2’de elde ettiğimiz değerler ile hesaplamalarımıza devam edeceğiz. Fakat bu kesitlerde tekil yük kesitin tam ortasından değil mesnetlerden birine yakın bir yerden yapıldığı için uzaklıklar da göz önüne alınarak aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 4.34. Tekil yükleme için a, b ve c değerleri

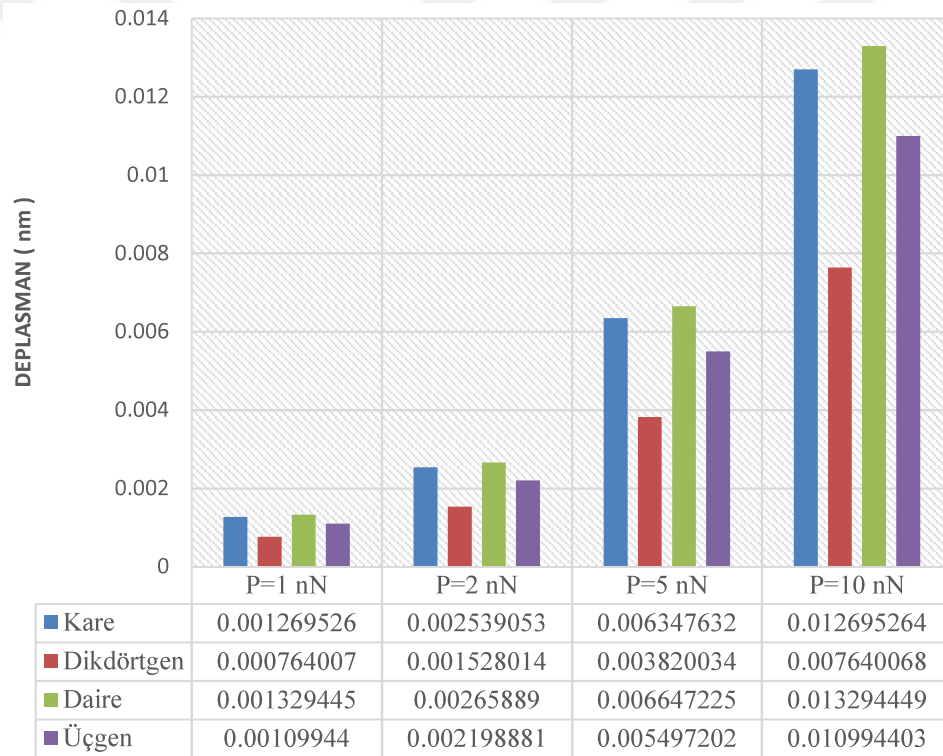
Kesit	L	a	b	c
Kare	10	3	7	5.50757055
Dikdörtgen	10	3	7	5.50757055
Daire	10	3	7	5.50757055
Üçgen	10	3	7	5.50757055

Aşağıdaki tabloda kesitlerin farklı P yüklemelerinde yapmış oldukları deplasman değerlerini inceleyelim;

Çizelge 4.35. Farklı P değerleri için deplasman değerleri

Kesit	L (nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		P=1 nN	P=2 nN	P=5 nN	P=10 nN
Kare	10	0.001269526	0.002539053	0.006347632	0.012695264
Dikdörtgen	10	0.000764007	0.001528014	0.003820034	0.007640068
Daire	10	0.001329445	0.00265889	0.006647225	0.013294449
Üçgen	10	0.00109944	0.002198881	0.005497202	0.010994403

Tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek;

Çizelge 4.36. Farklı P değerleri için deplasman değerleri

4.1.10. Ankastre mesnet bir ucu boşta ve üzerinde boş uca yakın tekil yük durumu

Kesit ve kesit alanlarında herhangi bir değişiklik yapmadığımız için Çizelge 4.2’de elde ettiğimiz değerler ile hesaplamalarımıza devam edeceğiz. Fakat bu kesitlerde tekil yük kesitin tam ortasından değil mesnetlerden birine yakın bir yerden yapıldığı için uzaklıklar da göz önüne alınarak aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 4.37. Tekil yükleme için a ve b değerleri

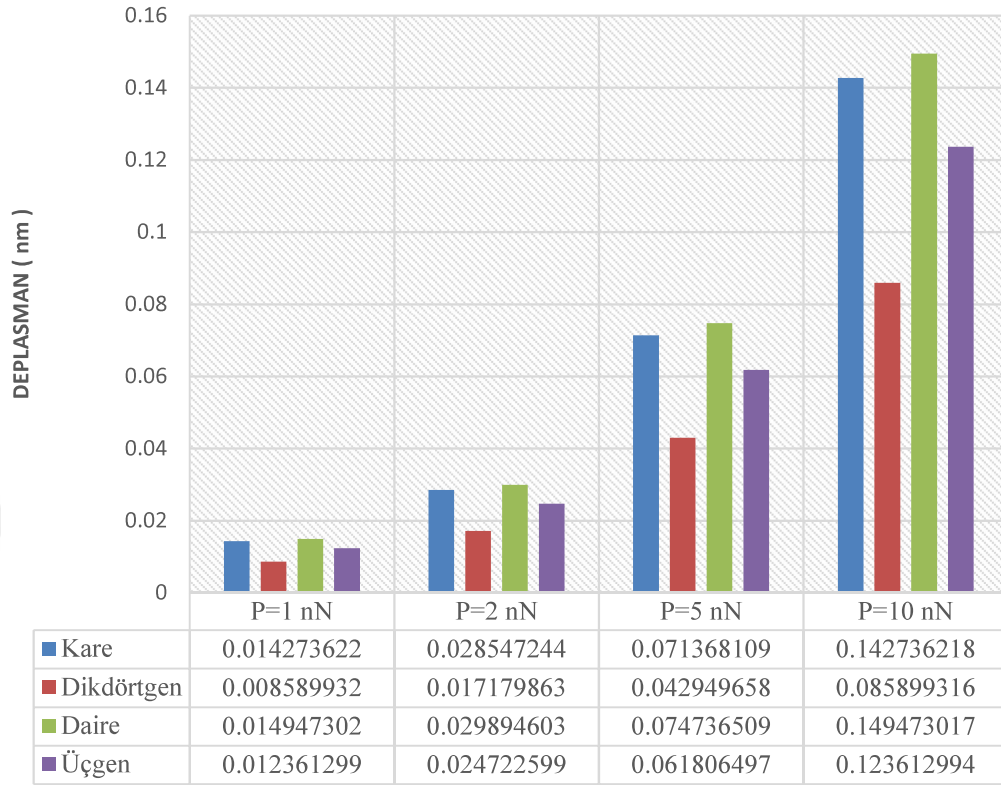
Kesit	L	a	b
Kare	10	7	3
Dikdörtgen	10	7	3
Daire	10	7	3
Üçgen	10	7	3

Aşağıdaki tabloda kesitlerin farklı P yüklemelerinde yapmış oldukları deplasman değerlerini inceleyelim;

Çizelge 4.38. Farklı P değerleri için deplasman değerleri

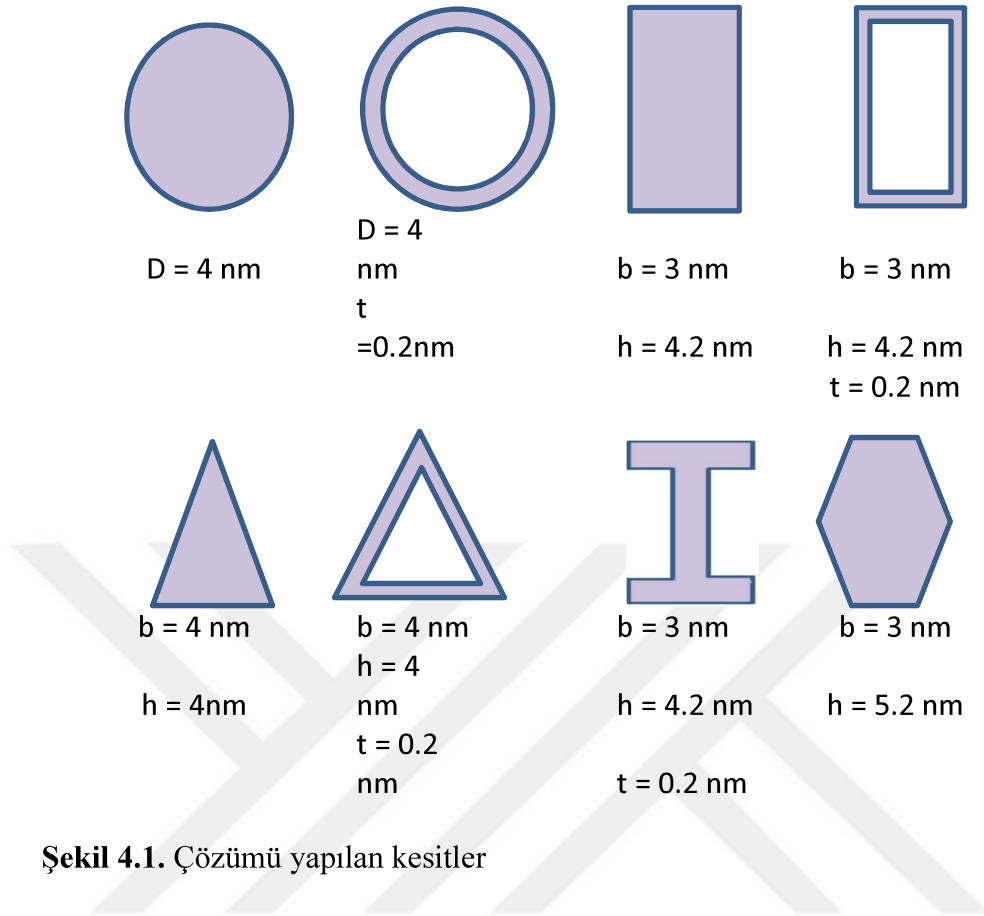
Kesit	L (nm)	Maksimum Deplasman (nm)			
		P=1 nN	P=2 nN	P=5 nN	P=10 nN
Kare	10	0.014273622	0.028547244	0.071368109	0.142736218
Dikdörtgen	10	0.008589932	0.017179863	0.042949658	0.085899316
Daire	10	0.014947302	0.029894603	0.074736509	0.149473017
Üçgen	10	0.012361299	0.024722599	0.061806497	0.123612994

Tablo değerlerini bir grafik üzerinde değerlendirmek istersek farklı kesit tipleri dikkate alarak değişken yükler için deplasman değerleri hesaplanmış ve her bir kesit için grafikte sunulmuştur. Böylelikle hangi tip kesitin daha avantajlı sonuç verdiği açıkça ortaya çıkmaktadır. Genel olarak statik analiz için aynı açıklığa sahip nano kirişin deplasman değerleri dikdörtgen için daha küçüktür.

Çizelge 4.39. Farklı P değerleri için deplasman değerleri

4.2. Dinamik Analiz

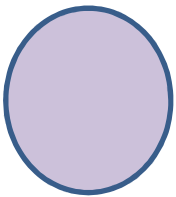
Bu bölümde yukarıda sürekli sistemlerden çıkartılmış olan denklemlerden her iki ucu basit mesnet, bir ucu ankastre bir ucu basit mesnet ve her iki ucu ankastre mesnet durumlarının ait olduğu sınır koşulları altında frekans değerleri incelenecektir. Karbon nanotüp için dört farklı kesite göre hesap yapılacaktır. Aralarındaki fark irdelenecektir. Mod sayısı olarak 5 belirlenmiştir. Statik analize benzer olarak farklı kesit ve açıklık değerlerinin titreşim üzerinde etkisi analiz edilecektir. Kesitlere ait temel özellikler ise aşağıdaki gibidir:



Şekil 4.1. Çözümü yapılan kesitler

4.2.1. Her iki ucu basit mesnet durumu

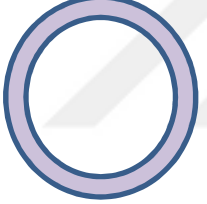
Çizelge 4.40. İçi dolu daire kesit özellikleri

Kesit	A (nm^2)	I (nm^4)	E (nN/nm^2)	ρ (g/cm^3)
	12.5664	12.5664	1054	1.4

Çizelge 4.41. İçi dolu daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	2.708046	0.6770115	0.300894	0.1692529	0.1083218
2	10.832184	2.708046	1.203576	0.6770115	0.4332874
3	24.372414	6.0931034	2.708046	1.5232759	0.9748966
4	43.328736	10.832184	4.814304	2.708046	1.7331494
5	67.701149	16.925287	7.5223499	4.2313218	2.708046

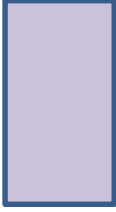
Çizelge 4.42. İçi boş daire kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	2.3876	4.3216	1054	1.4

Çizelge 4.43. İçi boş daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	3.6433218	0.9108304	0.4048135	0.2277076	0.1457329
2	14.573287	3.6433218	1.6192541	0.9108304	0.5829315
3	32.789896	8.197474	3.6433218	2.0493685	1.3115958
4	58.293149	14.573287	6.4770165	3.6433218	2.3317259
5	91.083045	22.770761	10.120338	5.6926903	3.6433218

Çizelge 4.44. İçi dolu dikdörtgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	12.6	18.522	1054	1.4

Çizelge 4.45. İçi dolu dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	3.2833313	0.8208328	0.3648146	0.2052082	0.1313333
2	13.133325	3.2833313	1.4592583	0.8208328	0.525333
3	29.549981	7.3874953	3.2833313	1.8468738	1.1819993
4	52.5333	13.133325	5.8370333	3.2833313	2.101332
5	82.083281	20.52082	9.1203646	5.1302051	3.2833313

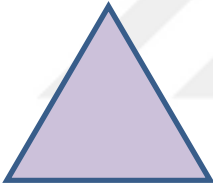
Çizelge 4.46. İçi boş dikdörtgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	2.72	6.6331	1054	1.4

Çizelge 4.47. İçi boş dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	4.2289237	1.0572309	0.4698804	0.2643077	0.1691569
2	16.915695	4.2289237	1.8795217	1.0572309	0.6766278
3	38.060314	9.5150784	4.2289237	2.3787696	1.5224125
4	67.66278	16.915695	7.5180866	4.2289237	2.7065112
5	105.72309	26.430773	11.74701	6.6076933	4.2289237

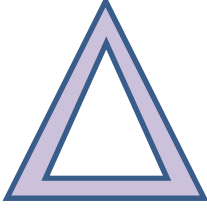
Çizelge 4.48. İçi dolu üçgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	6.928	4.608	1054	1.4

Çizelge 4.49. İçi dolu üçgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n(mod sayısı)	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	2.208556	0.5521389	0.245395	0.13803472	0.08834222
2	8.834222	2.2085556	0.981580	0.55213889	0.35336889
3	19.877000	4.9692500	2.208556	1.2423125	0.79508
4	35.336889	8.8342222	3.926321	2.20855556	1.41347556
5	55.213889	13.8034722	6.134877	3.45086806	2.20855556

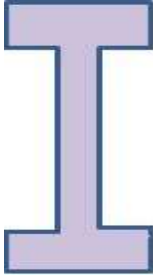
Çizelge 4.50. İçi boş üçgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	2.192	2.203	1054	1.4

Çizelge 4.51. İçi boş üçgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n(mod sayısı)	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	2.7144876	0.678621892	0.30160973	0.16965547	0.1085795
2	10.85795	2.714487566	1.206438918	0.67862189	0.43431801
3	24.430388	6.107597024	2.714487566	1.52689926	0.97721552
4	43.431801	10.85795026	4.82575567	2.71448756	1.73727204
5	67.862189	16.96554729	7.540243241	4.24138682	2.71448757

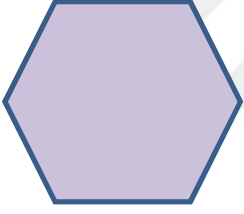
Çizelge 4.52. I kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	7.28	12.12	1054	1.4

Çizelge 4.53. I kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	3.4941509	0.873537718	0.388238986	0.21838443	0.13976603
2	13.976603	3.494150872	1.552955943	0.87353772	0.55906414
3	31.447358	7.861839463	3.494150872	1.96545987	1.25789431
4	55.906414	13.97660348	6.211823769	3.49415087	2.23625656
5	87.353772	21.83844296	9.705974648	5.45961074	3.49415087

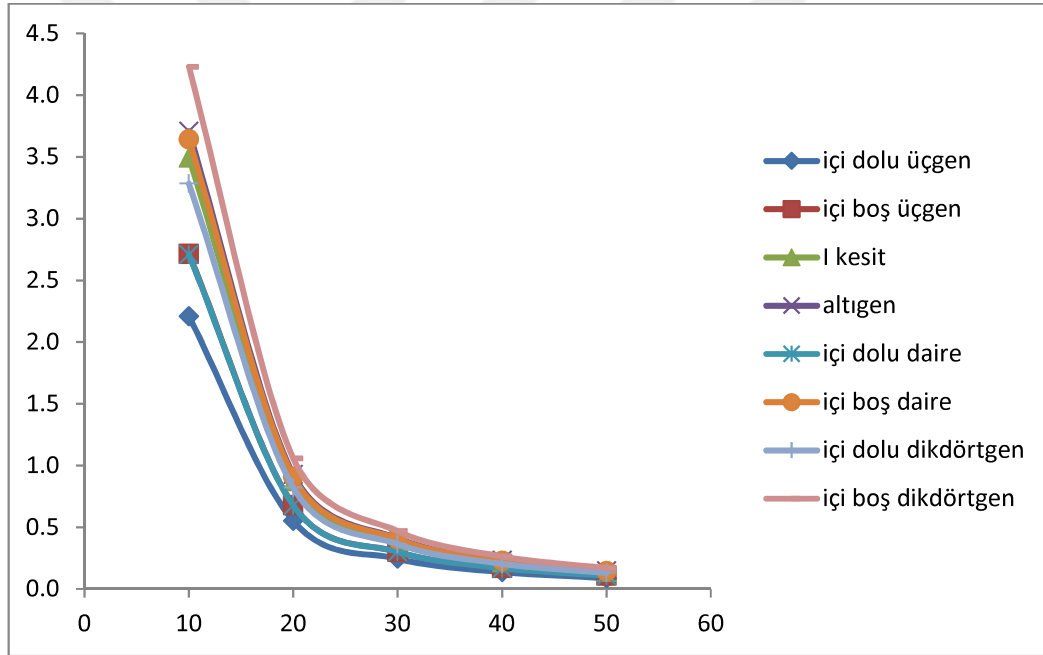
Çizelge 4.54. İçi dolu altıgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	23.382	43.821	1054	1.4

Kesite ait en temel fiziksel ve malzeme özellikleri her bir kesit tipi için ilgili tablolarda listelenmiştir. Farklı açıklık ve kesit alanlarını değişimi detaylı olarak elde edilen sonuçlarda tartışılmıştır.

Çizelge 4.55. İçi dolu altıgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

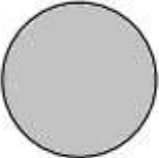
	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	3.7072882	0.926822046	0.411920909	0.23170551	0.14829153
2	14.829153	3.707288183	1.647683637	0.92682205	0.59316611
3	33.365594	8.341398413	3.707288183	2.0853496	1.33462375
4	59.316611	14.82915272	6.590734543	3.70728818	2.37266444
5	92.682205	23.17055115	10.29802273	5.79263779	3.70728818

**Şekil 4.2.** Kesitlerin birinci moddaki frekanslarının uzunluk ile değişimleri

Her iki ucu basit mesnet durumunda en küçük frekans değerleri içi dolu üçgen kesitte; en büyük frekans değerleri ise içi boş dikdörtgen kesitte çıkmaktadır.

4.2.2. Bir ucu ankastre mesnet bir ucu basit mesnet durumu

Çizelge 4.56. İçi dolu daire kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	12.5664	12.5664	1054	1.4

Çizelge 4.57. İçi dolu daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	4.2313218	1.0578305	0.4701469	0.2644576	0.1692529
2	13.709483	3.4273707	1.5232759	0.8568427	0.5483793
3	28.603736	7.1509339	3.1781928	1.7877335	1.1441494
4	48.91408	12.22852	5.4348978	3.05713	1.9565632
5	74.640517	18.660129	8.2933908	4.6650323	2.9856207

Çizelge 4.58. İçi boş daire kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	2.3876	4.3216	1054	1.4

Çizelge 4.59. İçi boş daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	5.6926903	1.4231726	0.6325211	0.3557931	0.2277076
2	18.444317	4.6110791	2.0493685	1.1527698	0.7377727
3	38.482586	9.6206466	4.2758429	2.4051617	1.5393035
4	65.8075	16.451875	7.3119444	4.1129687	2.6323
5	100.41906	25.104764	11.157673	6.2761911	4.016762

Çizelge 4.60. İçi dolu dikdörtgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	12.6	18.522	1054	1.4

Çizelge 4.61. İçi dolu dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	5.1302051	1.2825513	0.5700228	0.3206378	0.2052082
2	16.621864	4.1554661	1.8468738	1.0388665	0.6648746
3	34.680186	8.6700466	3.853354	2.1675116	1.3872075
4	59.305171	14.826293	6.5894634	3.7065732	2.3722068
5	90.496818	22.624204	10.055202	5.6560511	3.6198727

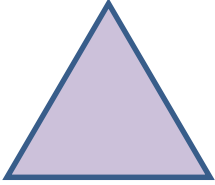
Çizelge 4.62. İçi boş dikdörtgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	2.72	6.6331	1054	1.4

Çizelge 4.63. İçi boş dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	6.6076933	1.6519233	0.7341881	0.4129808	0.2643077
2	21.408926	5.3522316	2.3787696	1.3380579	0.8563571
3	44.668007	11.167002	4.9631119	2.7917504	1.7867203
4	76.384935	19.096234	8.487215	4.7740584	3.0553974
5	116.55971	29.139928	12.951079	7.2849819	4.6623884

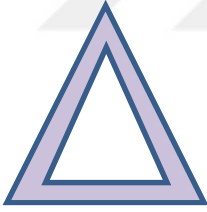
Çizelge 4.64. İçi dolu üçgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	6.928	4.608	1054	1.4

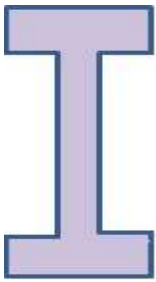
Çizelge 4.65. İçi dolu üçgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	3.4508681	0.862717015	0.383429784	0.21567925	0.13803472
2	11.180813	2.795203128	1.242312501	0.69880078	0.4472325
3	23.327868	5.831967015	2.59198534	1.45799175	0.93311472
4	39.892035	9.973008693	4.432448308	2.49325217	1.59568139
5	60.873313	15.21832814	6.763701394	3.80458203	2.4349325

Çizelge 4.66. İçi boş üçgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	2.192	2.203	1054	1.4

Çizelge 4.67. I kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	7.28	12.12	1054	1.4

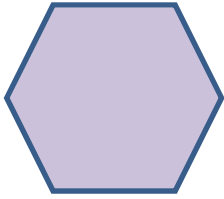
Çizelge 4.68. İçi boş üçgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	4.2413868	1.060346705	0.471265202	0.26508668	0.16965547
2	13.742093	3.435523326	1.526899256	0.85888083	0.54968373
3	28.671775	7.167943723	3.185752766	1.79198593	1.146871
4	49.030432	12.25760792	5.447825742	3.06440198	1.96121727
5	74.818064	18.70451588	8.313118169	4.67612897	2.99272254

Çizelge 4.69. I kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

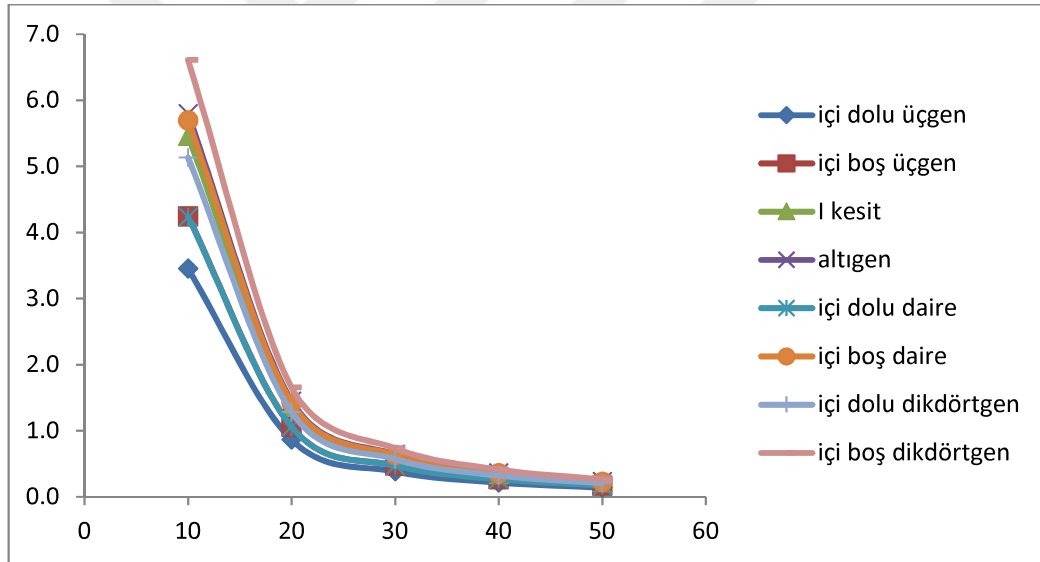
	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	5.4596107	1.364902684	0.606623415	0.34122567	0.21838443
2	17.689139	4.422284698	1.965459866	1.10557117	0.70756555
3	36.906969	9.22674214	4.100774284	2.30668553	1.47627874
4	63.1131	15.77827504	7.012566684	3.94456876	2.52452401
5	96.307533	24.07688335	10.70083704	6.01922084	3.85230134

Çizelge 4.70. İçi dolu altıgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	23.382	43.821	1054	1.4

Çizelge 4.71. İçi dolu altıgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

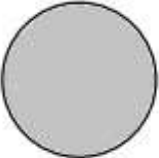
	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	5.7926378	1.448159447	0.643626421	0.36203986	0.23170551
2	18.768146	4.692036607	2.085349603	1.17300915	0.75072586
3	39.158231	9.789557851	4.3509146	2.44738946	1.56632926
4	66.962893	16.74072321	7.440321426	4.1851808	2.67851571
5	102.18213	25.54553263	11.35357006	6.38638316	4.08728522

**Şekil 4.3.** Kesitlerin birinci moddaki frekanslarının uzunluk ile değişimleri

Bir ucu ankastre bir ucu basit mesnet durumunda en küçük frekans değerleri içi dolu üçgen kesitte; en büyük frekans değerleri ise içi boş dikdörtgen kesitte çıkmaktadır.

4.2.3. İki ucu ankastre mesnet durumu

Çizelge 4.72. İçi dolu daire kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	12.5664	12.5664	1054	1.4

Çizelge 4.73. İçi dolu daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	6.0931034	1.5232759	0.6770115	0.3808190	0.2437241
2	16.925287	4.2313218	1.8805875	1.0578305	0.6770115
3	33.173563	8.2933908	3.6859515	2.0733477	1.3269425
4	54.837931	13.709483	6.0931034	3.4273707	2.1935172
5	81.918391	20.479598	9.1020434	5.1198994	3.2767356

Çizelge 4.74. İçi boş daire kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	2.3876	4.3216	1054	1.4

Çizelge 4.75. İçi boş daire kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	8.197474	2.0493685	0.9108304	0.5123421	0.3278990
2	22.770761	5.6926903	2.5300846	1.4231726	0.9108304
3	44.630692	11.157673	4.9589658	2.7894182	1.7852277
4	73.777266	18.444317	8.197474	4.6110791	2.9510907
5	110.21048	27.552621	12.245609	6.8881553	4.4084194

Çizelge 4.76. İçi dolu dikdörtgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	12.6	18.522	1054	1.4

Çizelge 4.77. İçi dolu dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	7.3874953	1.8468738	0.8208328	0.4617185	0.2954998
2	20.52082	5.1302051	2.2800911	1.2825513	0.8208328
3	40.220808	10.055202	4.4689786	2.5138005	1.6088323
4	66.487458	16.621864	7.3874953	4.1554661	2.6594983
5	99.32077	24.830193	11.035641	6.2075481	3.9728308

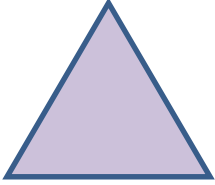
Çizelge 4.78. İçi boş dikdörtgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	2.72	6.6331	1054	1.4

Çizelge 4.79. İçi boş dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	9.5150784	2.3787696	1.0572309	0.5946924	0.3806031
2	26.430773	6.6076933	2.9367526	1.6519233	1.0572309
3	51.804316	12.951079	5.7560351	3.2377697	2.0721726
4	85.635706	21.408926	9.5150784	5.3522316	3.4254282
5	127.92494	31.981236	14.213883	7.9953089	5.1169977

Çizelge 4.80. İçi dolu üçgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	6.928	4.608	1054	1.4

Çizelge 4.81. İçi dolu üçgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	4.96925	1.242312501	0.552138889	0.31057813	0.19877
2	13.803472	3.450868059	1.533719137	0.86271701	0.55213889
3	27.054806	6.763701398	3.00608951	1.69092535	1.08219222
4	44.72325	11.18081251	4.969250004	2.79520313	1.78893
5	66.808806	16.7022014	7.42320062	4.17555035	2.67235222

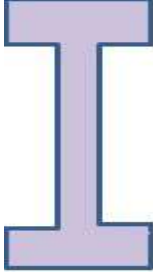
Çizelge 4.82. İçi boş üçgen kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	2.192	2.203	1054	1.4

Çizelge 4.83. İçi boş üçgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	6.107597	1.526899256	0.678621891	0.38172481	0.24430388
2	16.965547	4.241386822	1.88506081	1.06034671	0.67862189
3	33.252473	8.313118174	3.694719189	2.07827954	1.33009891
4	54.968373	13.7420933	6.107597022	3.43552333	2.19873493
5	82.113249	20.52831221	9.123694314	5.13207805	3.28452995

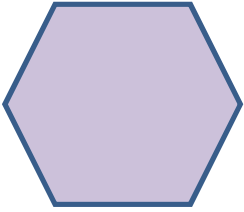
Çizelge 4.84. I kesit özellikleri

Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	7.28	12.12	1054	1.4

Çizelge 4.85. I kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

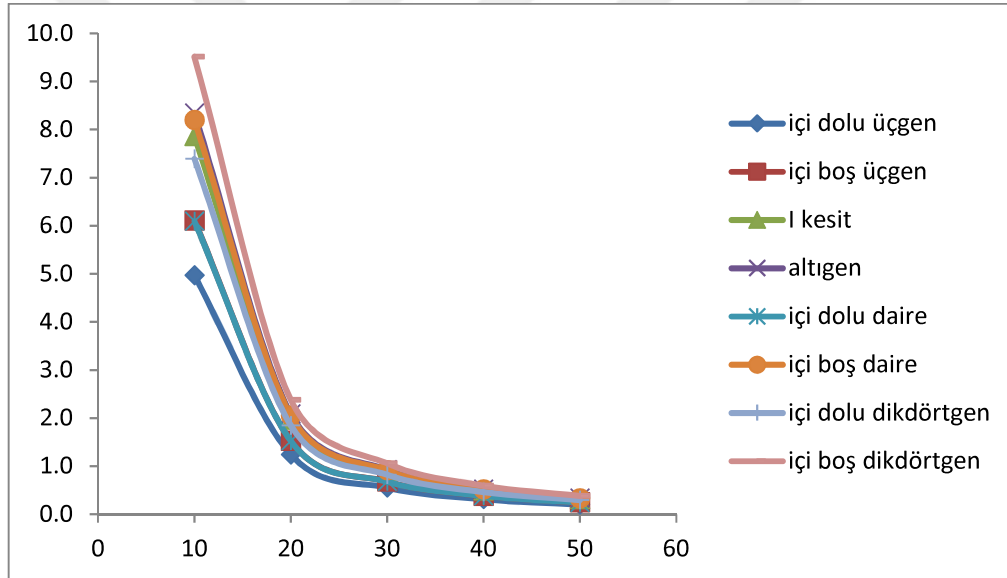
	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	7.8618395	1.965459865	0.873537718	0.49136497	0.31447358
2	21.838443	5.459610738	2.426493661	1.36490268	0.87353772
3	42.803348	10.70083705	4.755927578	2.67520926	1.71213393
4	70.756555	17.68913879	7.861839461	4.4222847	2.83026221
5	105.69806	26.42451596	11.74422931	6.60612899	4.22792255

Çizelge 4.86. İçi dolu altıgen kesit özellikleri

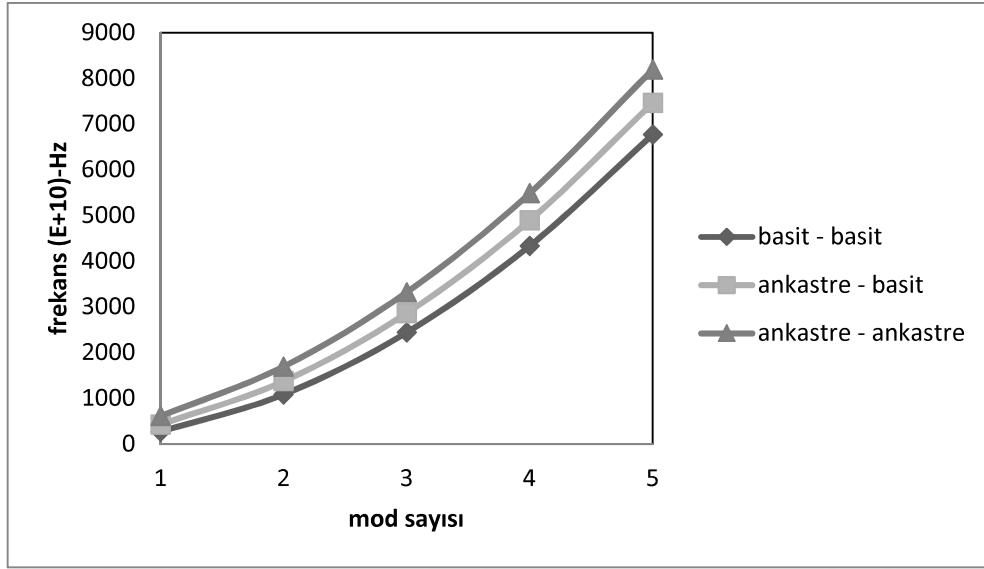
Kesit	A (nm ²)	I (nm ⁴)	E (nN/nm ²)	P (g/cm ³)
	23.382	43.821	1054	1.4

Çizelge 4.87. İçi dolu altıgen kesitin ilk 5 moddaki farklı uzunluklardaki frekansları

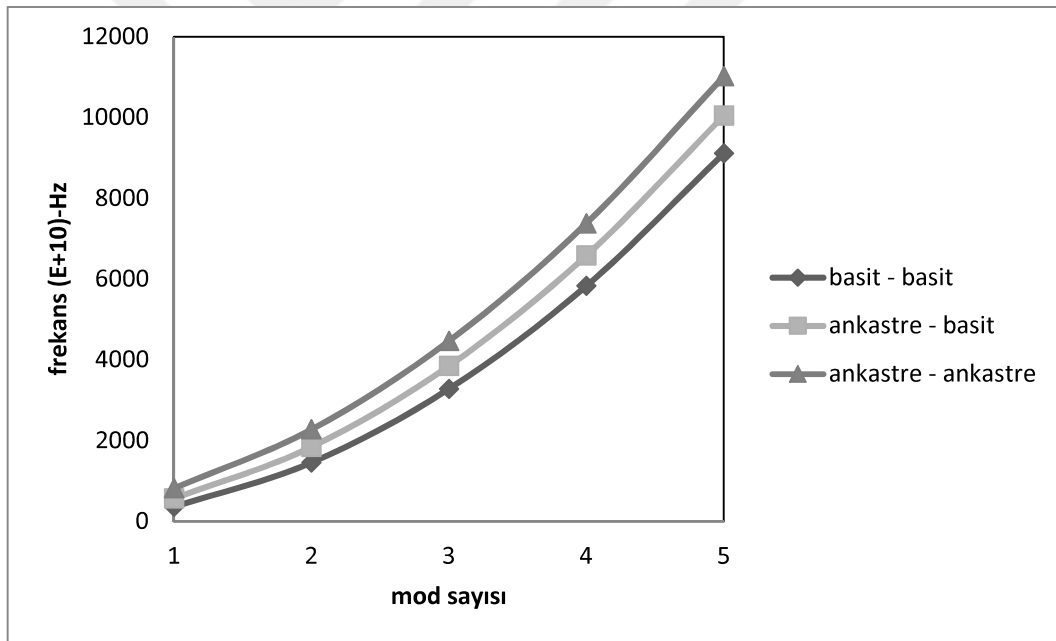
	$\omega_n = \left(\frac{\beta_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$				
n	L=10 nm	L=20 nm	L=30 nm	L=40 nm	L=50 nm
1	8.3413984	2.085349603	0.926822046	0.5213374	0.33365594
2	23.170551	5.792637786	2.574505683	1.44815945	0.92682205
3	45.41428	11.35357007	5.046031141	2.83839252	1.81657121
4	75.072586	18.76814642	8.341398411	4.69203661	3.00290343
5	112.14547	28.03636687	12.4606075	7.00909172	4.4858187

**Şekil 4.4.** Kesitlerin birinci moddaki frekanslarının uzunluk ile değişimleri

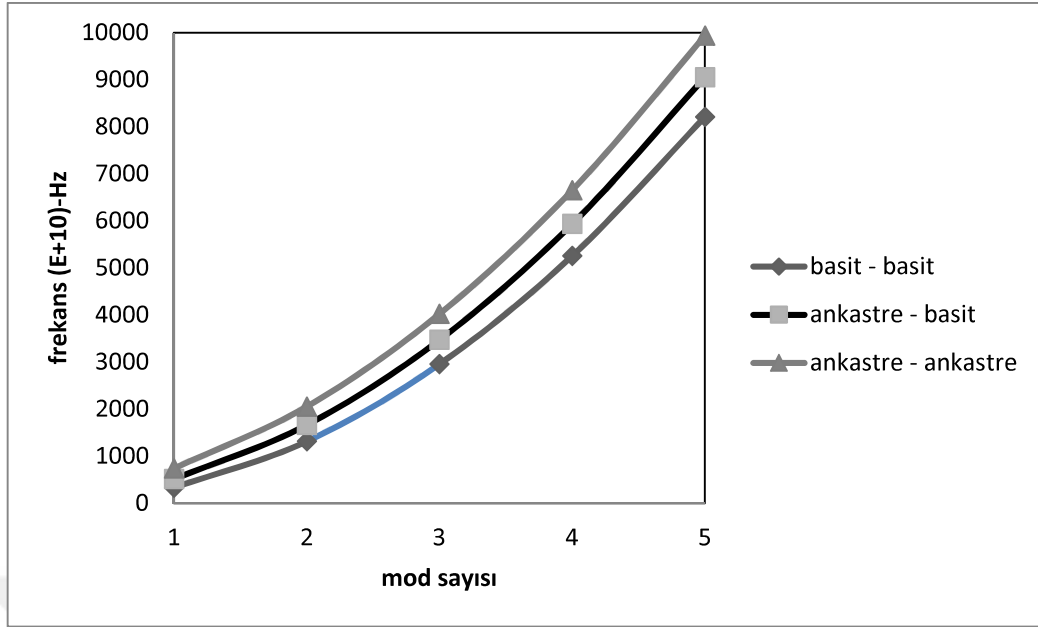
Her iki ucu ankastre mesnet durumunda en küçük frekans değerleri içi dolu üçgen kesitte, en büyük frekans değerleri ise içi boş dikdörtgen kesitte çıkmaktadır. Kesitlerin farklı mesnet koşullarındaki frekanslarının karşılaştırılmasına dair grafikler aşağıda sunulmuştur:



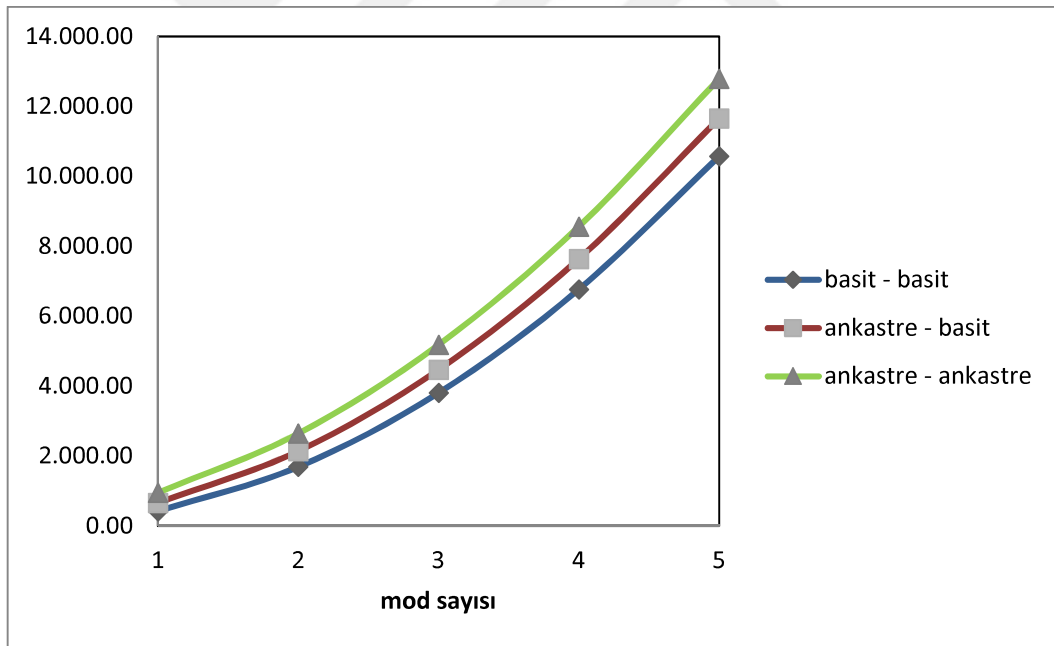
Şekil 4.5. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi dolu daire kesitin ilk 5 moddaki frekansları



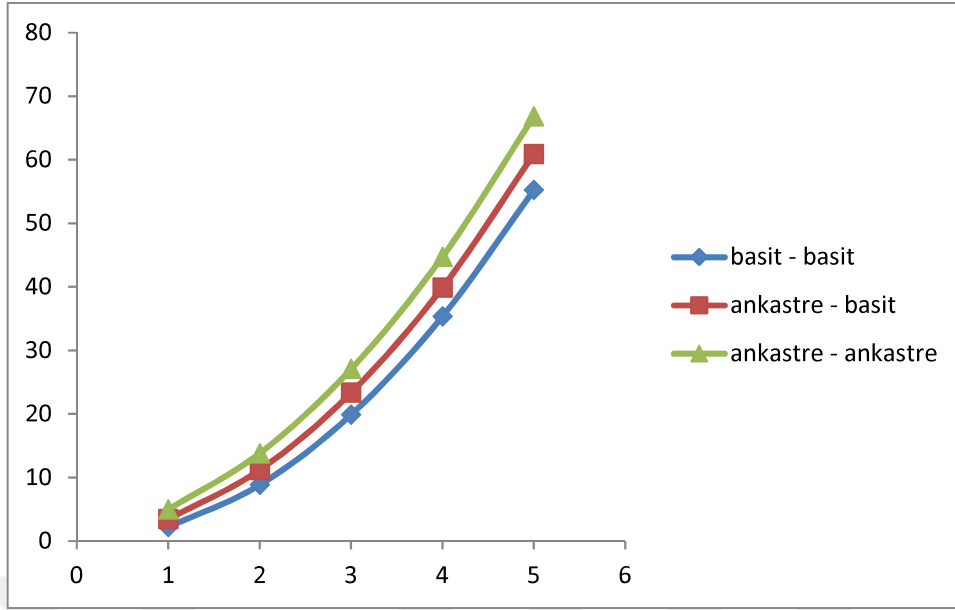
Şekil 4.6. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi boş daire kesitin ilk 5 moddaki frekansları



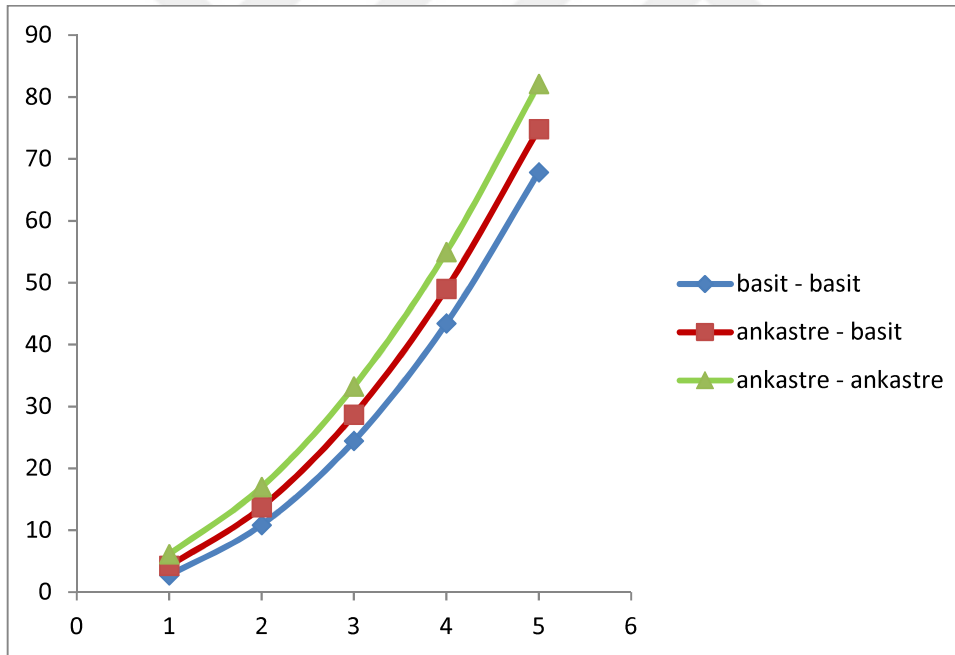
Şekil 4.7. Aynı uzunluktaki (10 nm) dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki frekansları



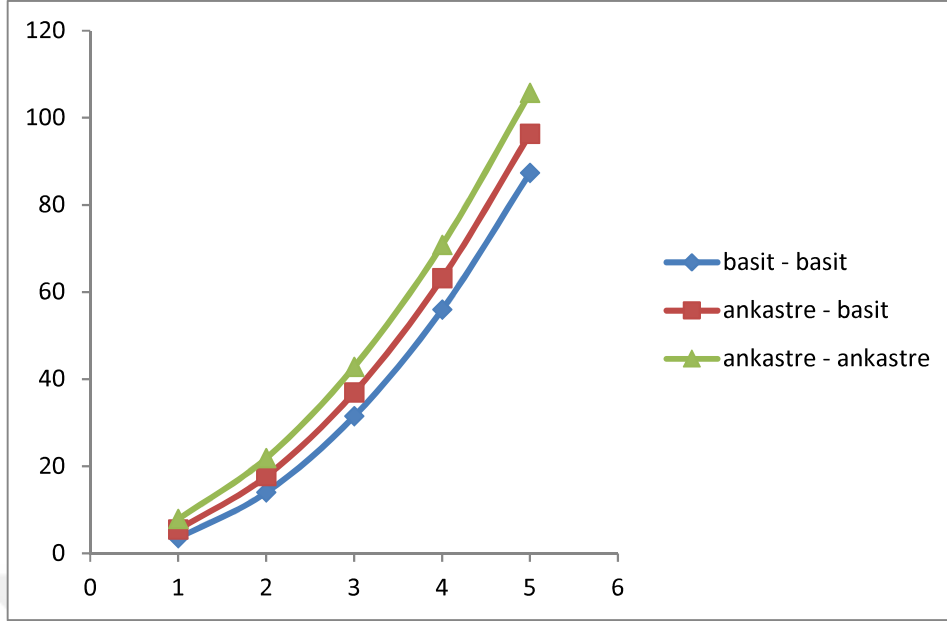
Şekil 4.8. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi boş dikdörtgen kesitin ilk 5 moddaki frekansları



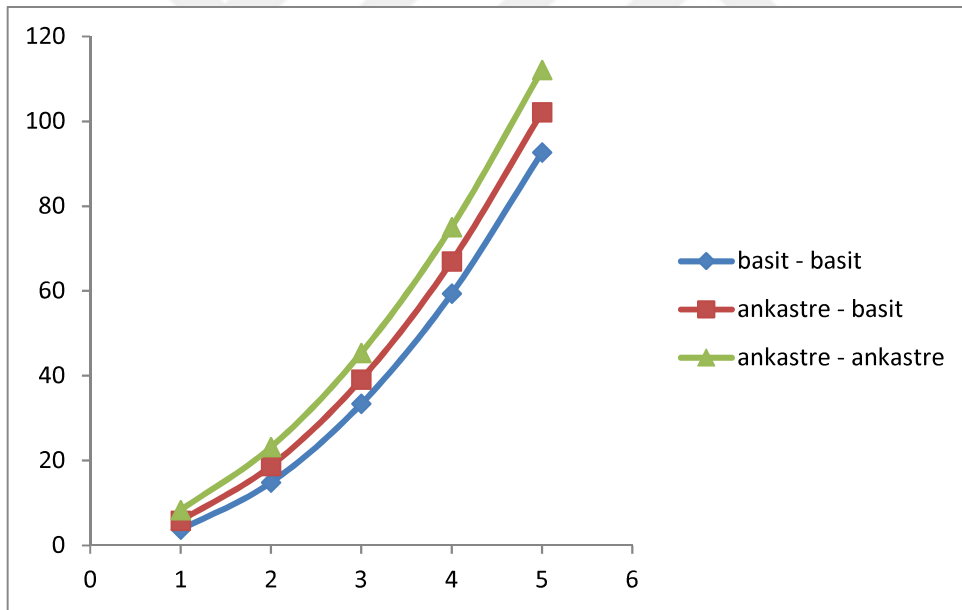
Şekil 4.9. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi dolu üçgen kesitin ilk 5 moddaki frekansları



Şekil 4.10. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi boş üçgen kesitin ilk 5 moddaki frekansları



Şekil 4.11. Aynı uzunluktaki (10 nm) I kesitin ilk 5 moddaki frekansları



Şekil 4.12. Aynı uzunluktaki (10 nm) içi dolu altıgen kesitin ilk 5 moddaki frekansları

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında nanoteknoloji ve karbon nanotüplere ait mevcut bilinenler toparlanmış. karbon nanotüplerin elastik giriş modeli üzerinde durulmuştur. Denklemler elde edilip karbon nanotüpün giriş modeline ait klasik denklemler ile sonuca gidilmiştir. Kesit özellikleri ve uzunluklarına bağlı olarak ilk 5 moddaki frekansları elde edilmiştir. Her iki ucu basit mesnet, bir ucu ankastre bir ucu basit mesnet, her iki ucu ankastre mesnet koşullarında frekans değerleri incelenmiştir. Yapılan bu çalışmanın neticesinde farklı yük ve mesnetlenme durumlarında deplasmanlar da ayrıca elde edilmiştir. Görülüyor ki deplasmanı etkileyen faktörler arasında yük durumu, giriş boyu, mesnet durumu ve yükün konumu gibi birden fazla etken vardır. Benzer şekilde titreşim analizi yapılırken farklı mesnetlenme durumları ve bunların ortaya çıkardığı farklı frekans değerleriyle en yüksek değerini içi dolu üçgen kesitte en düşük frekans değerinin ise içi boş dikdörtgen kesitte ortaya çıktığı görülmüştür. Karbon nanotüplerin güçlendirilmiş malzeme olmasına karşın kesit özelliklerinin de dayanım üzerinde etkileri gözlenmiştir.

Sonuç olarak;

- Farklı yük ve mesnetlenme durumlarında karbon nanotüplerin deplasmana gösterdikleri direnç farklılık göstermektedir.
- Titreşim hesabı yapılırken 5 mod şekli ve 5 farklı L uzunluğunda çıkarımları yapılan frekansların farklılık gösterdiği saptanmıştır.
- Her iki ucu ankastre mesnet durumunda en küçük frekans değerleri içi dolu üçgen kesitte; en büyük frekans değerleri ise içi boş dikdörtgen kesitte çıkmaktadır.
- Neticeler çizelge ve grafikler halinde bu çalışma kapsamında sunulmuştur.
- Her iki ucu ankastre mesnet durumunda en küçük frekans değerleri içi dolu üçgen kesitte, en büyük frekans değerleri ise içi boş dikdörtgen kesitte çıkmaktadır. Kesitlerin farklı mesnet koşullarındaki frekanslarının değişimi de etkilidir.

Ele alınan malzemeler geleneksel kullanılan malzemelere göre çok küçük olduğu için klasik yöntemlerle hesaplanan sonuçların yetersiz kalacağı aşıkardır. Bu nedenle boyut etkisinin dikkate alan yöntemler ile daha doğru sonuçlar hesaplanabilecektir. Bu tez çalışmasında farklı kesit özelliklerine sahip mikro/nano ölçekli girişlerin çözümü klasik yöntemle analiz edilmiştir. Hem eğilme ve deplasman hem de temel frekans değerlerinin farklı kesit, yük, uzunluk ve sınır koşuluna bağlı değişimi basitçe incelenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Akgöz, B. 2009. Karbon Nanotüplerin Kiriş Modeli ve Titreşim Hesabı. Bitirme Çalışması, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.
- 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*, 13(61): 7-20.
- Civalek, Ö. and Demir, Ç. 2014. A simple mathematical model of microtubules surrounded by an elastic matrix by nonlocal finite element method. *Applied Mathematics and Computation*, 289: 335-352.
- Civalek, Ö. and Demir, Ç. 2011. Bending analysis of microtubules using nonlocal Euler-Bernoulli beam theory. *Applied Mathematical Modelling*, 35(5): 2053-2067.
- Civalek, Ö., Demir Ç. and Akgöz, B. 2010. Free vibration and bending analyses of cantilever microtubules based on nonlocal continuum model. *Mathematical and Computational Applications*, 15(2): 289-298.
- 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: 18.02.2019]
- Erkoç, Ş. 2001. Karbon nano yapılar. *Bilim ve Teknik Dergisi*.
<http://www.nanoteknolojinedir.com/upload/files/201305302342karbon-nano-tup-nedir.pdf> [Son erişim tarihi: 25.02.2019]
- <https://www.wikizero.com/tr/Nanomekanik> [Son erişim tarihi: 25.02.2019]
- Işık, Ç. 2011. Nano ve mikro yapıların yerel olmayan elastisite teorisi ile eğilme ve titreşim hesabı. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 143s.
- Karaoğlu, P. 2011. Karbon Nanotüplerin Sürekli Ortam Kiriş Modelleri İle Titreşim Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne, 65s.
- Koç, M. B. 2003. Nanotüpler. Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği, Bitirme Tezi, Ankara.

- Koç, Y. 2006. Euler-Bernoulli ve Timoshenko Teorileri Kullanılarak Basit Mesnetli Kirişlerin Serbest Titreşimlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 64s.
- Kösegil Toksöz, A. 2010. Yerel olmayan elastisite teorisinde Açık ve Ritz yöntemlerinin nanoteknolojiye uygulanması. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 134s.
- Kutucu, B. 2010. Nanoteknoloji ve çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 111s.
- Leissa, A.W. and Qatu M.S. 2011. Vibration of Continuous Systems. Mc Graw Hill, USA.
- Murmu, T., Adhikari, S., McCarthy, M.A. 2014. Axial vibration of embedded nanorods under transverse magnetic field effects via nonlocal elastic continuum theory. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 11: 1–7.
- Özbayram, F. 2014. ‘Impermeable’ graphene yields to protons. <https://malzemebilimi.net/kompozit-malzemelerde-bor-nitrur-kullanimi.html>. [Son erişim tarihi: 23.02.2019]
- Rafı–Tabar, H. 2007. Computational physics of carbon nanotubes. Cambridge University Press, Cambridge, 493 s.
- Rao, S. 2007. Vibration of Continuous Systems. John Wiley&Sons Inc.
- 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.
- 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, İstanbul, 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.
- Ucun, İ. ve Çolakoğlu M. 2004. Değişik Kesitli Profil Malzemelerdeki Doğal Titreşim Frekanslarının Ölçülmesi ve Hesaplanması. *Teknoloji*, 7: 435-444
- Yaylı, M.Ö. 2010. Yerel olmayan elastisite teorisine göre nano ölçekteki kirişlerin doğrusal olmayan teoriye göre incelenmesi. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 85s.

ÖZGEÇMİŞ

Dahi ŞEN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2017 – 2021	Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2012 – 2016	Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Proje Mühendisi	Afyonkarahisar
2019 – Devam Ediyor	